

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

ปีการศึกษา 2553

การศึกษาศถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูง 115/24 kV ภายในสถานันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

STUDYING OF KMITL'S 115/24 kV SUBSTATION



T119546



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... **119546**  
วัน,เดือน,ปี..... **8 S.ค. 2554**

b.....  
i.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ชาย ชมภูอินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูงขนาด 115/24kV ภายในสถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้จัดทำ

1. นาย รัฐศาสตร์ ภาวะโคตร
2. นาย วรดิษฐ์ เลาเหล็กพลี
3. นาย วิศรุต ตีระเดชา



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัย ชมภูอินไหว )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูง 115/24 kV ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นาย รัฐศาสตร์ ภาวะโคตร

นาย วรดิษฐ์ เลาเหล็กพลี

นาย วิศรุต ตรีเดชา

ผศ.ดร. ชาย ชมภูอินไหว

อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2553

**บทคัดย่อ**

บทความนี้เป็นการศึกษาเรื่องสถานีไฟฟ้าย่อย 115/24kV เพื่อจ่ายภาระไฟฟ้าภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังโดยการศึกษามุ่งเน้นไปที่กระบวนการการออกแบบระบบต่อลงดิน ระบบป้องกันฟ้าผ่า การจัดวางบัส และการพิจารณาเลือกใช้ขนาดของอุปกรณ์ภายในลานไก ซึ่งการศึกษาจะเป็นการเปรียบเทียบการออกแบบระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/24kV ที่ออกแบบโดยบริษัท ซีเมนส์ เทียบกับสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/24kV ที่ออกแบบโดย กฟน. ซึ่งผลการศึกษาเปรียบเทียบช่วยให้ทราบถึงการออกแบบรูปแบบใดที่จะก่อให้เกิดความเหมาะสมที่สุด ซึ่งสอดคล้องกันทั้งความสามารถในด้านการปฏิบัติงานและด้านเศรษฐศาสตร์

# STUDYING OF KMITL'S 115/24 kV SUBSTATION

Rattasart Pawakotr

Woradit Laolekplee

Wisaroot Treedechar

Asst. Prof.Dr. Chai Chompoo-inwai

Supervisor

2010

## ABSTRACT

This study presents a KMITL's 115/24 kV substation which builds for solving system stability, system reliable, electricity bill and outage and voltage drop .The study consists of a criteria for selection of electrical bus configuration, earthing grid system, lightning protection system and sizing .The study is comparing between substation designed by SIEMEN and designed by MEA that result can be provide the optimum substation designing which correspond to their performance and economics

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ซึ่งให้การช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา

รวมทั้งต้องขอบคุณ คุณวินัย จากบริษัท INGENTEC และพี่ประณท จาก กฟน. ซึ่งให้ทั้งคำปรึกษาและให้ยืมเอกสารมากมาย และพี่สัทกะ จาก กฟน. ที่ช่วยดำเนินเรื่องให้ได้ลง  
ไปศึกษาสถานีไฟฟ้าย่อยบางพลีได้อย่างรวดเร็ว

และสุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำต้องกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ทั้งกำลังใจและ  
เงินทองจนทำให้โครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงมาได้ ขอบพระคุณมากครับ



# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อ.....   | I    |
| ABSTRACT.....   | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                      | III  |
| สารบัญ.....   | IV   |
| สารบัญภาพ.....  | VII  |
| สารบัญตาราง.....  | XI   |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....                        | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....                           | 1    |
| 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....                      | 2    |
| 1.4 แผนการดำเนินโครงการ.....                              | 2    |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....                     | 3    |
| บทที่ 2 การสร้างสถานีไฟฟ้าย่อย.....                       | 4    |
| 2.1 ชนิดของสถานีไฟฟ้า.....                                | 5    |
| 2.2 ลำดับในการออกแบบสถานีไฟฟ้าย่อย.....                   | 9    |
| 2.3 ลำดับในการออกแบบสถานีไฟฟ้าย่อย (ส่วนระบบไฟฟ้า).....   | 10   |
| 2.4 ลำดับในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อย (ส่วนระบบไฟฟ้า)..... | 12   |
| บทที่ 3 ทฤษฎีการจัดวางบัส.....                            | 14   |
| 3.1 Main and transfer bus.....                            | 14   |
| 3.2 Double main and transfer bus.....                     | 15   |
| 3.3 Double main bus single breaker.....                   | 17   |
| 3.4 Breaker and a half.....                               | 18   |
| 3.5 Double main Double Breaker.....                       | 19   |
| 3.6 ข้อคำนึงถึงในการกำหนดระยะห่างทางไฟฟ้า.....            | 21   |
| บทที่ 4 ทฤษฎีและหลักการออกแบบระบบต่อลงดิน.....            | 22   |
| 4.1 วัตถุประสงค์ของการออกแบบระบบต่อลงดิน.....             | 22   |
| 4.2 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ.....                       | 26   |
| 4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ.....                     | 28   |

## IV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 4.4     | การพิจารณาการออกแบบ.....                                      | 29  |
| 4.5     | ขั้นตอนในการออกแบบการต่อลงดินตาม IEEE Std. 80 .....           | 31  |
| บทที่ 5 | อุปกรณ์ในระบบสถานีไฟฟ้าย่อย.....                              | 38  |
| 5.1     | เพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Power circuit breaker) .....       | 38  |
| 5.2     | รีเลย์ป้องกัน (Protective Relay) .....                        | 57  |
| 5.3     | สวิตช์ตัดตอน (Disconnecting Switch) .....                     | 62  |
| 5.4     | หม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดัน (Instrument transformer) ..... | 68  |
| 5.5     | กั๊บดักฟ้าผ่า (Surge Arrester) .....                          | 74  |
| 5.6     | ตู้ควบคุมระบบจำหน่ายแรงสูง (Switchgear) .....                 | 77  |
| 5.7     | หม้อแปลงกำลัง (Power transformer).....                        | 82  |
| บทที่ 6 | ทฤษฎีฟ้าผ่าและการป้องกันฟ้าผ่า .....                          | 95  |
| 6.1     | ทฤษฎีฟ้าผ่า.....  | 95  |
| 6.2     | ลักษณะการเกิดฟ้าผ่าขึ้นและฟ้าผ่าลง .....                      | 96  |
| 6.3     | พารามิเตอร์ของการเกิดฟ้าผ่า.....                              | 96  |
| 6.4     | อันตรายของฟ้าผ่าต่อสิ่งมีชีวิต .....                          | 98  |
| 6.5     | ระบบป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อย.....                        | 98  |
| 6.6     | การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า .....                              | 101 |
| บทที่ 7 | การออกแบบระบบต่อลงดิน.....                                    | 104 |
| 7.1     | การออกแบบและติดตั้งระบบต่อลงดิน .....                         | 104 |
| 7.2     | การคำนวณและออกแบบระบบการต่อลงดิน .....                        | 105 |
| 7.3     | ขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดิน.....                             | 107 |
| บทที่ 8 | การออกแบบเลือกขนาดอุปกรณ์.....                                | 115 |
| 8.1     | การเลือกหม้อแปลงกำลัง .....                                   | 115 |
| 8.2     | การเลือกขนาดสายส่งแรงสูง 115 kV .....                         | 119 |
| 8.3     | การเลือกขนาดสายส่งแรงสูง 24 kV .....                          | 120 |
| 8.4     | การเลือกขนาดเพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ .....                   | 121 |
| 8.5     | การเลือกขนาดสวิตช์ตัดตอน.....                                 | 126 |
| 8.6     | การเลือกขนาด Instrument transformer .....                     | 128 |
| 8.7     | การเลือกกับดักฟ้าผ่า.....                                     | 135 |

|  |     |
|--|-----|
| บทที่ 9 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า .....                         | 139 |
| 9.1 การออกแบบของบริษัทซีเมนซ์ .....                              | 138 |
| 9.2 การออกแบบของ กฟน. ....                                       | 142 |
| 9.3 แนะนำการออกแบบ .....   | 145 |
| บทที่ 10 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการศึกษา.....                  | 148 |
| 10.1 วิเคราะห์และเปรียบเทียบระบบต่อลงดิน .....                   | 148 |
| 10.2 วิเคราะห์และเปรียบเทียบการเลือกอุปกรณ์และระบบต่างๆ.....     | 158 |
| 10.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบการจัดวางระยะห่างของอุปกรณ์หลัก..... | 165 |
| 10.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบระบบป้องกันฟ้าผ่า .....              | 168 |
| บทที่ 11 สรุปการแนะนำการออกแบบ.....                              | 173 |
| 11.1 แนะนำการออกแบบระบบต่อลงดิน .....                            | 173 |
| 11.2 แนะนำการออกแบบการเลือกอุปกรณ์และวางระบบ.....                | 174 |
| 11.3 แนะนำการออกแบบการจัดวางระยะห่างของอุปกรณ์หลัก.....          | 178 |
| 11.4 แนะนำการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า .....                       | 180 |
| บรรณานุกรม.....  | 181 |
| ภาคผนวก ก.....   | 182 |
| ภาคผนวก ข.....   | 220 |
| ภาคผนวก ค.....   | 223 |
| ภาคผนวก ง.....   | 225 |
| ประวัติผู้เขียน.....   | 229 |

VI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

| ภาพที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ลานไกของ AIS.....  | 5    |
| 2.2 สถานีไฟฟ้าแบบ GIS แบบภายนอกอาคารและภายในอาคาร.....                                   | 6    |
| 2.3 สถานีไฟฟ้าแบบ GIS แบบภายในอาคาร.....   | 7    |
| 2.4 เปรียบเทียบระหว่างสถานีไฟฟ้าแบบ AIS และ GIS.....                                     | 7    |
| 2.5 แผนผังการพิจารณาเลือกชนิดของสถานีไฟฟ้าย่อย.....                                      | 9    |
| 2.6 Flow Chart แสดงลำดับในการออกแบบสร้าง SUBSTATION .....<br>ในส่วนทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง | 11   |
| 2.7 Flow Chart ลำดับในสร้าง SUBSTATION ในส่วนทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง ..                    | 12   |
| 3.1 สภาพจ่ายไฟปกติของ Main and Transfer Bus .....  | 15   |
| 3.2 สภาพจ่ายไฟปกติของ Double Main and Transfer Type 1.....                               | 16   |
| 3.3 สภาพจ่ายไฟปกติของ Double Main and Transfer Type 2.....                               | 16   |
| 3.4 สภาพจ่ายไฟปกติของ Double Main Bus Single Breaker.....                                | 17   |
| 3.5 สภาพจ่ายไฟปกติของ Breaker and A half.....  | 18   |
| 3.6 สภาพจ่ายไฟปกติของ Double Main Double Breaker.....                                    | 19   |
| 3.7 ลำดับการออกแบบระยะห่างทางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าย่อย.....                                 | 20   |
| 4.1 Grounding.....   | 24   |
| 4.2 แสดงสภาวะการเกิดช็อคเมื่อเกิดลัดวงจรลงดิน.....                                       | 25   |
| 4.3 แสดงภาพจำลองกระแสไหลระหว่างแท่งถึงเท้าเนื่องจากตัดดาไฟฟ้า.....<br>ระหว่างก้าว        | 27   |
| 4.4 แสดงภาพจำลองกระแสไหลระหว่างมือถึงเท้าเนื่องจากตัดดาไฟฟ้าสัมผัส.....                  | 27   |
| 4.5 แสดงขั้นตอนการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยตาม.....<br>มาตรฐาน IEEE 80      | 31   |
| 4.6 แสดงวิธีการต่อวงจรวัดความต้านทานของดิน.....  | 32   |
| 5.1 Air break circuit breaker พิกัดกระแส 630 – 6,300 A ของบริษัท SIEMEN ..               | 42   |
| 5.2 หน้าสัมผัสอาร์ค (Arcing contact) ของ Air blast circuit breaker .....                 | 43   |
| 5.3 กลไกการดับอาร์คของ Air blast Circuit breaker .....                                   | 43   |
| 5.4 แสดงโครงสร้างของ Air blast Circuit breaker รูปแบบ Interrupter ตัว T .....            | 44   |
| 5.5 แสดงโครงสร้างของ Air blast Circuit breaker .....                                     | 44   |
| 5.6 Air blast Circuit breaker พิกัดแรงดัน 500kV .....                                    | 45   |
| 5.7 โครงสร้างของ Dead tank Bulk-oik Circuit breaker .....                                | 47   |
| 5.8 Dead tank Bulk-oik Circuit breaker.....  | 47   |

## VII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|      |  |    |
|------|--|----|
| 5.9  | โครงสร้างของ Minimum Oil Circuit breaker.....  | 48 |
| 5.10 | Indoor Vacuum Circuit Breaker สำหรับพิกัดแรงดัน 12 - 40.5kV .....  | 49 |
| 5.11 | แสดงโครงสร้างของ Vacuum Circuit breaker .....  | 50 |
| 5.12 | Interrupter ของ Vacuum circuit breaker ของบริษัท SIEMEN .....  | 50 |
| 5.13 | แสดงโครงสร้าง Interrupter ของ Vacuum circuit breaker ของ<br>บริษัท SIEMEN .....  | 51 |
| 5.14 | แสดงโครงสร้างของ Gas SF <sub>6</sub> circuit breaker แบบ Single pressure .....   | 52 |
| 5.15 | หน้าสัมผัสกำลังจะแยกออกจากกัน เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้รับสัญญาณทริป   | 53 |
| 5.16 | กระบอกสูบแบบเป่าเคลื่อนที่ไปทางซ้าย ก๊าซ SF <sub>6</sub> จะถูกอัดเข้าไปใน<br>กระบอกสูบ .....   | 53 |
| 5.17 | ก๊าซ SF <sub>6</sub> ที่ถูกอัดจะถูกปล่อยออกทางขวามือผ่านหัวฉีดจนวนและ<br>อาร์คที่เกิดขึ้นระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสองจะถูกดับโดยก๊าซ SF <sub>6</sub> ..... | 53 |
| 5.18 | แสดงโครงสร้างของหน้าสัมผัส Gas SF <sub>6</sub> Circuit Breaker .....   | 54 |
| 5.19 | แสดงกลไกการทำงานของหน้าสัมผัส Gas SF <sub>6</sub> Circuit Breaker .....  | 54 |
| 5.20 | Gas SF <sub>6</sub> Circuit Breaker รุ่น HPL ขนาดพิกัดแรงดัน 72.5 800kV .....  | 55 |
|      | ของบริษัท ABB  |    |
| 5.21 | การทำงานของ Interrupter ใน Gas SF <sub>6</sub> circuit breaker ชนิด Two pressur  | 55 |
| 5.22 | แสดงโครงสร้างของ Gas SF <sub>6</sub> circuit breaker ชนิด Two pressure .....   | 56 |
| 5.23 | Gas SF <sub>6</sub> circuit breaker ชนิด Two pressure .....  | 56 |
| 5.24 | Over current Relay ของบริษัท SIEMEN .....  | 58 |
| 5.25 | Digital over-current time protection relays ของบริษัท SIEMEN .....   | 58 |
| 5.26 | Differential Relay ของบริษัท SCHNEIDER ELECTRIC .....  | 59 |
| 5.27 | Voltage Relay สำหรับระดับแรงดันปานกลางของบริษัท SIEMEN .....   | 60 |
| 5.28 | Buchholz Relay ของบริษัท ASHISH .....  | 60 |
| 5.29 | Temperature control relay ของบริษัท Toshiba .....  | 61 |
| 5.30 | Under Frequency Relay ของบริษัท Crouzet .....  | 61 |
| 5.31 | Circuit breaker Failure Relay ของบริษัท SIEMEN .....   | 62 |
| 5.32 | Earthing Switch ของบริษัท HAPAM .....  | 63 |
| 5.33 | Disconnecting Switch ชนิด Horizontal Double side Break .....   | 64 |
|      | ของบริษัท HAPAM  |    |
| 5.34 | แสดงโครงสร้างและกลไกการทำงานของ Horizontal Double side Break .....   | 64 |
| 5.35 | Disconnecting Switch ชนิด Vertical Break ของบริษัท HAPAM .....   | 65 |

## VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|      |  |    |
|------|--|----|
| 5.36 | โครงสร้างและกลไกการทำงานของ Disconnecting Switch ชนิด Vertical Break                                 | 65 |
| 5.37 | Disconnecting Switch ชนิด Two-column Rotary Disconnecter ของบริษัท HAPAM                             | 66 |
| 5.38 | แสดงโครงสร้างและกลไกการทำงานของ Disconnecting Switch ชนิด Two-column Rotary Disconnecter             | 66 |
| 5.39 | Disconnecting Switch ชนิด VEE Center Break ขนาดพิกัดแรงดัน 69-230kV ของบริษัท Johnson Switch Company | 67 |
| 5.40 | Disconnecting Switch ชนิด Pantograph Type ของบริษัท HAPAM  | 67 |
| 5.41 | แสดงโครงสร้างและกลไกการทำงานของ Disconnecting Switch ชนิด Pantograph                                 | 68 |
| 5.42 | แสดงโครงสร้างของ Oil-immersed Current transformer สำหรับแรงดันสูง ของบริษัท Trench                   | 70 |
| 5.43 | Oil-immersed Current transformer ของบริษัท Trench  | 70 |
| 5.44 | Gas-insulated Current transformer ของบริษัท Trench   | 71 |
| 5.45 | Outdoor Current Transformer ขนาดพิกัดแรงดัน 7.2-24 kV ของบริษัท SIEMEN                               | 71 |
| 5.46 | หม้อแปลงแรงดัน 25kV ของ ABB  | 72 |
| 5.47 | แสดงโครงสร้างของหม้อแปลงแรงดัน 25kV ของ ABB  | 73 |
| 5.48 | Capacitor Voltage transformer ขนาด 72.5-800kV ของบริษัท Trench                                       | 73 |
| 5.49 | Inductive Voltage Transformer บริษัท Trench  | 74 |
| 5.50 | แสดงโครงสร้างของกั๊บดักฟ้าผ่าแบบ SiC   | 75 |
| 5.51 | Metal Oxide Surge arrester   | 76 |
| 5.52 | แสดงโครงสร้างภายในกั๊บดักฟ้าผ่าชนิด ZnO ของบริษัท ABB  | 76 |
| 5.53 | กั๊บดักฟ้าผ่าชนิดที่มี Arcing Horn ต่ออนุกรมกับ ZnO  | 77 |
| 5.54 | แสดงโครงสร้างของ Air-insulated Switchgear Type NXAIR M ของบริษัท SIEMEN                              | 78 |
| 5.55 | Air-insulated Switchgear Type NXIAR ของบริษัท SIEMEN   | 79 |
| 5.56 | Gas-insulated Switchgear Types 8DA10 and 8DB10 ของบริษัท SIEMEN                                      | 80 |
| 5.57 | Gas-insulated Switchgear และวงจรภายในของบริษัท SIEMEN  | 80 |
| 5.58 | แสดงโครงสร้างภายในของ Gas-insulated Switchgear ของบริษัท SIEMEN                                      | 81 |
| 5.59 | หม้อแปลงกำลังของบริษัท ABB   | 82 |
| 5.60 | On load tab changer ของบริษัท ABB  | 84 |

## IX

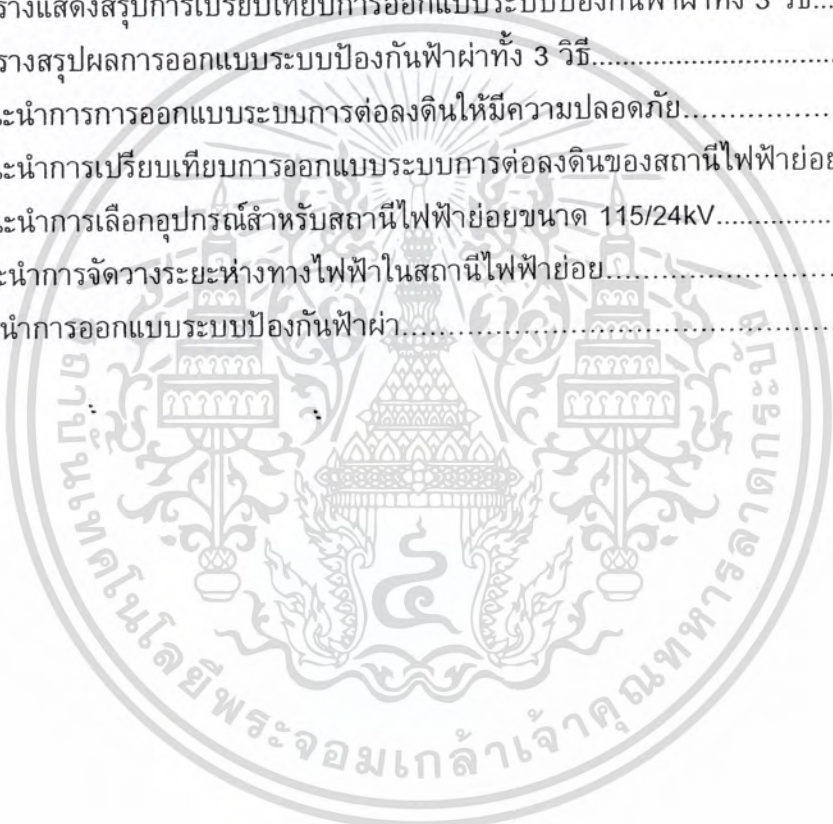
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|   |     |
|---|-----|
| 5.61 ส่วนประกอบของ Power transformer .....                          | 94  |
| 7.1 แสดงขั้นตอนการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ..... 106  |     |
| ตามมาตรฐาน IEEE 80  |     |
| 7.2 แสดงการวางกราวด์กริด ด้าน 3-D View และ ด้าน Side View .....     | 110 |
| 7.3 แสดงการวางกราวด์กริด.....                                       | 111 |
| 8.1 Current Transformer พิกัด 300-400/5/5A CL5P10 30VA .....        | 132 |
| ของบริษัท Trench  |     |
| 8.2 ตำแหน่งการวางของArrester ด้าน incoming.....                     | 136 |
| 9.1 แสดงโซนป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/24 kV ของ.....     | 141 |
| บริษัท SIEMEN   |     |
| 9.2 แสดงโซนป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/24 kV ของ กฟน..... | 144 |
| 9.3 แสดงโซนป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/24 kV .....        | 147 |
| ของการศึกษาการออกแบบโดยนักศึกษา                                     |     |
| 10.1 แสดงระบบกริดด้าน Top view .....                                | 149 |
| 10.2 แสดงระบบกริดด้าน Side view .....                               | 149 |
| 10.3 แสดงลำดับการออกแบบของระบบการต่อลงดิน มาตรฐาน IEEE Std. 80..... | 151 |
| 10.4 แสดงการกำหนดค่า D และ h.....                                   | 153 |
| 10.5 แสดงการผลการทดลองด้าน Top View และ Side View .....             | 156 |
| 10.6 แสดงการผลการทดลองด้าน 3D View .....                            | 157 |
| 11.1 แสดงลำดับการพิจารณาการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าใน.....           | 179 |
| สถานีไฟฟ้าย่อย  |     |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.1 เปรียบเทียบราคาการจัดวางบัส.....   | 19   |
| 4.1 Typical Conductor Sizes.....   | 30   |
| 5.1 การแบ่ง Class ของ Power transformer.....                                 | 83   |
| 5.2 ชนิดของ Vector Group.....  | 83   |
| 5.3 ชนิดของระบบระบายความร้อน.....  | 85   |
| 7.1 ค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้คำนวณ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000.....            | 106  |
| 7.2 Typical Conductor Size.....  | 108  |
| 8.1 แสดงกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลงของบริษัท SIEMEN.....                | 118  |
| 8.2 ราคาของหม้อแปลงกำลังไฟฟ้าของ SIEMEN และ MEA.....                         | 118  |
| 8.3 แสดงค่ากระแสขณะอินเตอร์รัพต์ของบริษัท SIEMEN และ MEA.....                | 123  |
| 8.4 แสดงค่ากระแสโมเมนทารีของบริษัท SIEMEN และ MEA.....                       | 124  |
| 8.5 ขนาด Circuit breaker ของ SIEMEN.....                                     | 125  |
| 8.6 ขนาด Circuit breaker ของ MEA.....  | 125  |
| 8.7 ราคา Power circuit breaker ของ SIEMEN และ MEA.....                       | 126  |
| 8.8 ขนาดสวิตช์ตัดตอนของ SIEMEN.....  | 127  |
| 8.9 ขนาดของสวิตช์ตัดตอนของ MEA.....  | 127  |
| 8.10 ราคาสวิตช์ตัดตอนของ SIEMEN และ MEA.....                                 | 128  |
| 8.11 แสดงการเชื่อมต่อของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าของบริษัท SIEMEN.....              | 129  |
| 8.12 แสดงการเชื่อมต่อของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าของ MEA.....                       | 130  |
| 8.13 ราคาหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าของ SIEMEN และ MEA.....                           | 133  |
| 8.14 แสดงการเชื่อมต่อของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าของบริษัท SIEMEN.....             | 134  |
| 8.15 แสดงการเชื่อมต่อของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าของ MEA.....                      | 134  |
| 8.16 ราคาของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าของทั้ง SIEMEN และ MEA.....                   | 135  |
| 8.17 ราคาบัสดักฟ้าผ่าของทั้ง SIEMEN และ MEA.....                             | 137  |
| 10.1 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานที่ใช้คำนวณระบบการต่อลงดิน.....                | 148  |
| 10.2 แสดงการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างตัวนำกริดที่ขนานกันที่มีผลต่อราคา..... | 150  |
| 10.3 แสดงการเปรียบเทียบความลึกของกริดที่มีผลต่อราคา.....                     | 150  |
| 10.4 แสดงขั้นตอนการออกแบบระบบการต่อลงดินให้มีความเหมาะสม.....                | 152  |
| 10.5 แสดงผลจากการคำนวณของโปรแกรม.....  | 154  |
| 10.6 แสดงการวิเคราะห์ผลกาทดลอง.....  | 155  |
| 10.7 วิเคราะห์การเลือกใช้อุปกรณ์ของบริษัท SIEMEN และ MEA.....                | 158  |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 10.8  | วิเคราะห์การออกแบบระบบของบริษัท SIEMEN และ ABB.....                   | 159 |
| 10.9  | เปรียบเทียบการเลือกอุปกรณ์ SIEMEN และ ABB.....                        | 161 |
| 10.10 | เปรียบเทียบการออกแบบระบบระหว่างบริษัท SIEMEN และ MEA.....             | 162 |
| 10.11 | สรุปรูปแบบที่เราจะเลือก (อุปกรณ์).....                                | 163 |
| 10.12 | สรุปรูปแบบที่เราจะเลือก (ระบบต่างๆ).....                              | 164 |
| 10.13 | การจัดวางระยะห่างของอุปกรณ์หลักภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูง 115/24 kV.....   | 165 |
| 10.14 | ข้อเสนอแนะที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบการจัดวางระยะห่าง.....             | 166 |
| 10.15 | ตารางแสดงการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระบบป้องกันฟ้าผ่า.....             | 168 |
| 10.16 | ตารางการแนะนำการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อย.....          | 170 |
| 10.17 | ตารางแสดงสรุปการเปรียบเทียบการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าทั้ง 3 วิธี..... | 171 |
| 10.18 | ตารางสรุปผลการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าทั้ง 3 วิธี.....                 | 172 |
| 31.1  | แนะนำการออกแบบระบบการต่อลงดินให้มีความปลอดภัย.....                    | 173 |
| 11.2  | แนะนำการเปรียบเทียบการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย.....     | 174 |
| 41.3  | แนะนำการเลือกอุปกรณ์สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/24kV.....            | 174 |
| 11.4  | แนะนำการจัดวางระยะห่างทางไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าย่อย.....                   | 178 |
| 11.5  | แนะนำการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า.....                                  | 180 |



**ภาคผนวก ก**  
**การเลือกอุปกรณ์**

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| ก-1 Maximum Allowable Average Temperature of Cooling Air.....   | 182  |
| for Carrying Rated kVA  |      |
| ก-5 Rated kVA Correction Factors for Altitudes greater than 3300 ft.....  | 182  |
| ก-3 Range of Voltage and Kilovolt-Ampere Ratings for Single-.....   | 182  |
| Phase Transformers, 833-8333 kVA. Ref. ANSI/IEEE Std. C57.12.10-1988  |      |
| ก-4 Range of Voltage and Kilovolt-Ampere Ratings for.....   | 183  |
| Three-Phase Transformers Without Load Tap Changing, 750-10,000kVA.<br>Ref ANSI/IEEE Std. C57.12.10-1988                           |      |
| ก-5 Range of Voltage and Kilovolt-Ampere Ratings for.....   | 183  |
| Three-Phase Transformers with Load Tap Changing, 3750-10 000 kVA.<br>Ref. ANSI/IEEE Std. C57.12.10-1988                           |      |
| ก-6 Range of Voltage and Kilovolt-Ampere Ratings for.....   | 184  |
| Three-Phase Transformers With or Without Load Tap Changing, 12000-60000<br>kVA. Ref. ANSI/IEEE Std. C57.12.10-1988                |      |
| ก-7 Relationships of Nominal System Voltage to Maximum.....   | 184  |
| System Voltage and Basic Lightning Impulse Insulation Levels (BIL) for<br>Systems 765 kV and Below. Ref. IEEE Std. C57.12.00-1993 |      |
| ก-8 High-Voltage Winding Insulation Levels.....   | 185  |
| of Single-Phase Transformers. Ref. ANSI/IEEE Std. C57.12.10-1988  |      |
| ก-9 High-Voltage Winding Insulation Levels of Three-Phase Transformers.....   | 185  |
| ก-10 Minimum Insulation Levels at Neutral.....  | 186  |
| Ref. ANSI/IEEE Std. C57.12.00-1993  |      |
| ก-14 ขนาดพิกัดของ Minimum oil circuit breaker สำหรับติดตั้งภายในอาคาร.....  | 188  |
| ตามมาตรฐาน IEC  |      |
| ก-15 ขนาดพิกัดของ Vacuum circuit breaker สำหรับติดตั้งภายในอาคาร.....   | 188  |
| ตามมาตรฐาน IEC  |      |
| ก-16 ขนาดพิกัดของ Gas $SF_6$ circuit breaker ขนาด 72.5 - 525kV.....   | 189  |
| สำหรับติดตั้งภายนอกอาคาร  |      |

|  |     |
|--|-----|
| ก-17 ตัวคูณสำหรับค่ากระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (Interrupting Current).....          | 189 |
| ก-18 ตัวคูณสำหรับการหาค่ากระแสโมเมนทารี.....                                   | 189 |
| ก-19 แสดงคุณลักษณะและสมบัติของสาย AAC.....                                     | 191 |
| ก-60 แสดงคุณลักษณะและสมบัติของสาย XLPE แบบ Single Core.....                    | 192 |
| ก-71 Preferred Voltage Ratings for Station Class Outdoor Air Switches.....     | 193 |
| Ref. ANSI Std. C37.32-1996, Table 1  |     |
| ก-82 Preferred Switching Impulse Withstand Voltage for Station Class.....      | 193 |
| Outdoor Air Switches. Ref. ANSI Std. C37.32-1996, Table 2                      |     |
| ก-93 Preferred Continuous and Withstand Currents for Station Class.....        | 194 |
| .Outdoor Air Switches. Ref. ANSI Std. C37.32-1996, Table 3                     |     |
| ก-104 Phase Spacing of Outdoor Air Switches. Ref. ANSI Std. C37.32-1996.....   | 195 |
| ก-115 Temperature Limitations for Air Switches. IEEE Std. C37.30-1997.....     | 195 |
| ก-26 Phase Spacing and Ground Clearance for Station-Class Outdoor.....         | 196 |
| Air Switches and Bus Supports. Ref. ANSI Std. C37.32-1996,                     |     |
| ก-127 Grounding Switch Electrical Clearance. Ref. ANSI Std. C37.32-1996,.....  | 197 |
| ก-138 ข้อมูลทางเทคนิค Disconnecting Switch แบบ Center-Break Disconnectors..... | 198 |
| ชนิด SGF ของบริษัท Hapam   |     |
| ก-149 แสดงการแบ่ง class ของ instrument Transformer ตามมาตรฐานต่างๆ.....        | 198 |
| ก--30 แสดงพิกัด Burden ของ CT Class Metering และ Protection.....               | 199 |
| ตาม ANSI/IEEE Std. C57.13-1978 (สำหรับCTที่มีกระแสทุติยภูมิ 5A)                |     |
| ก-31 แสดงการจำแนกประเภทของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า.....                              | 199 |
| ก-315 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ Overcurrent Realy.....                            | 200 |
| ก-33 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ Ground-fault Realy.....                            | 200 |
| ก-34 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ Current Transformer แบบ Oil-filled.....            | 201 |
| ก-35 Ratings for Current Transformers with One or Two Ratios.....              | 202 |
| Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 7  |     |
| ก-36 Current Transformer Ratings, Multi-Ratio Type.....                        | 202 |
| .Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 8   |     |
| ก-37 Standard Accuracy Class for Metering Service and Corresponding.....       | 203 |
| Limits of Transformer Correction Factor (0.6 to 1.0 Power Factor               |     |
| (Lagging) of Metered Load). Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 6                |     |

#### XIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|   |     |
|---|-----|
| ก-38 Basic Impulse Insulation Levels and Dielectric Tests.....  | 203 |
| for Current Transformers with the Same Dielectric Test Requirements as<br>Outdoor Power Circuit Breakers.*Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 3 |     |
| ก-39 Limits of Temperature Rise.* Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 4.....  | 204 |
| ก-40 Basic Impulse Insulation Levels and Dielectric Tests.....  | 204 |
| Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 2   |     |
| ก-41 แสดงค่า Rate Burden ของ PT ตามมาตรฐาน ANSI/IEEE C57.13-1978.....   | 205 |
| ของPT(60Hz)   |     |
| ก-42 Ratings and Characteristics of Group 1 Voltage Transformers.....   | 205 |
| Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 10  |     |
| ก-43 Ratings and Characteristics of Group 2 Voltage Transformers.....   | 206 |
| Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 11.   |     |
| ก-44 Ratings and Characteristics of Group 3 Outdoor Voltage Transformers.....   | 206 |
| Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 12  |     |
| ก-45 Ratings and Characteristics of Group 4 Indoor Voltage Transformers.....  | 207 |
| Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 13  |     |
| ก-46 Ratings and Characteristics of Group 5 Outdoor Voltage Transformers.....   | 207 |
| Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 14  |     |
| ก-47 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ Capacitor Voltage transformer (115kV).....  | 209 |
| ก-48 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ ANSI Indoor/Outdoor.....  | 209 |
| Metering/Protection Transformer Medium Voltage  |     |
| ก-49 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ Capacitor Voltage Transformer(72.5kV~800kV)....   | 210 |
| ก-50 แสดงค่า $U_r$ เมื่อเทียบกับค่า Norminal System voltage ของ Arrester.....   | 210 |
| ก-51 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ Surge arrester Class3EQ.....  | 211 |
| ก-516 Protective Characteristics of Gapped Silicon-Carbide.....   | 212 |
| Distribution Arresters. Ref. ANSI/IEEE C62.2-1987, Table A3.  |     |
| ก-53 Protective Characteristics of Gapped Silicon-Carbide Intermediate.....   | 213 |
| Valve Arresters. Ref. ANSI/IEEE C62.2-1987, Table A2  |     |
| ก-54 Protective Characteristics of Gapped Silicon-Carbide Intermediate.....   | 213 |
| Valve Arresters. Ref. ANSI/IEEE C62.2-1987, Table A2  |     |
| ก-55 Protective Characteristics of Gapped Silicon-Carbide Station Arresters.....  | 213 |
| Ref. ANSI/IEEE C62.2-1987, Table A1   |     |

|  |     |
|--|-----|
| ก-56 Metal Oxide Station- and Intermediate-Class Arrester Characteristics.....         | 214 |
| Ref. IEEE C62.22-1991, Table 1   |     |
| ก-57 Metal Oxide Arrester Ratings in (kV) rms.Ref. IEEE C62.11-1993,.....              | 214 |
| Table 1.   |     |
| ก-58 Rated Insulation Levels of Metal-Clad Switchgear.....                             | 215 |
| ก-59 Power Switching Equipment NEMA Std. SG6.....                                      | 215 |
| ก-60 BILs and Percentage Impedance Voltages at Self-Cooled (OA).....                   | 218 |
| Rating.Ref. ANSI/IEEE Std. C57.12.10-1988, Table 10 and Section 4.6.                   |     |
| Reproduced with permission of the National Electrical Manufacturers Association(NEMA). |     |
| ก-61 BILs and Percentage Impedance Voltages at Self-Cooled (OA).....                   | 218 |
| Rating.Ref. ANSI/IEEE Std. C57.12.10-1988, Table 10 and Section 4.6.                   |     |
| Reproduced with permission of the National Electrical Manufacturers Association(NEMA). |     |
| ก-62 ราคาอุปกรณ์ของบริษัท SIEMEN.....  | 219 |
| ก-63 ราคาอุปกรณ์ของ MEA.....   | 219 |



ภาคผนวก ข

ระบบการต่อลงดิน

ตารางที่

หน้า

|  |     |
|--|-----|
| ข-1 ค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้คำนวณ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 80..... | 220 |
| ข-17 Typical Conductor Size IEEE 80.....                     | 220 |



ภาคผนวก ค

ระยะห่างทางไฟฟ้า

ตารางที่

หน้า

|   |     |
|---|-----|
| ค-1 กำหนดระยะปลอดภัยทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC Standard.....  | 223 |
| ค-2 กำหนดระยะปลอดภัยทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน NEMA Standard..... | 224 |



ภาคผนวก ง  
ระบบป้องกันฟ้าผ่า

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| ง-1 แสดงขนาดกระแสฟ้าผ่าที่แปรผันตามค่า BIL (IEEE Std. 998-1996).....           | 225  |
| ง-2 แสดง Guild of conductor for Lightning Protection (IEEE Std. 998-1996)..... | 226  |
| ง-3 แสดงการจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าตามระดับการป้องกัน.....                     | 227  |
| ง-4 แสดงระยะเฉลี่ยระหว่างตัวนำลงดินตามระดับการป้องกัน.....                     | 227  |
| ง-5 แสดงวัสดุระบบป้องกันฟ้าผ่าและสมภาวะการใช้.....                             | 228  |



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังมีความต้องการใช้ไฟฟ้าในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าต่ำ และเป็นผลให้ความน่าเชื่อถือของระบบลดลง จึงเกิดไฟตกและไฟดับขึ้นบ่อยครั้ง จากปัญหาข้างต้นจึงมีการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/24kV เพื่อแก้ปัญหาด้านเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบ อีกทั้งการที่จ่ายแรงดันสูงจะทำให้ช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าลงได้

นอกจากนั้นแล้ว ในการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยขึ้นที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ส่งผลให้ค่าใช้ไฟฟ้าต่อหน่วยมีค่าลดลง ปัญหาที่เกี่ยวกับไฟดับไฟตกจะลดลง ทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือและมีเสถียรภาพมากขึ้น ในการออกแบบสถานีไฟฟ้าย่อย 115/24kV ประกอบด้วยระบบหลักๆที่มีความสำคัญ อาทิ เช่น ระบบการต่อลงดิน, ระบบการป้องกันฟ้าผ่า, ระบบการจัดวางบัสและการพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์เป็นต้น โดยในการออกแบบสถานีไฟฟ้าย่อย 115/24kV ให้มีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงทั้งหลักทางวิศวกรรมศาสตร์และเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นจึงได้มีการจำลองการออกแบบระบบสถานีไฟฟ้าย่อย 115/24kV เพื่อเปรียบเทียบกับระบบจริงแล้วนำผลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการเลือกอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อยอย่างเหมาะสม

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาความสำคัญของการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูง 115/24 kV ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2) เพื่อศึกษาระบบการทำงานของสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูง 115/24 kV
- 3) เพื่อสามารถออกแบบการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูง 115/24 kV ได้อย่างถูกต้องเหมาะสม ทั้งทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเศรษฐศาสตร์ในการเปรียบเทียบกับผู้ออกแบบจริง

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

โครงการนี้เป็นการศึกษาออกแบบสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูง 115 kV ภายใต้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังโดยจะเป็นการศึกษาตามวันไลน์ไดอะแกรมและแบบทางไฟฟ้าของบริษัท ซีเมนต์ จำกัด ซึ่งเป็นผู้รับเหมาก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูงขนาด 115 kV แห่งนี้ ซึ่งผู้ศึกษาจะทำการออกแบบคู่ขนานกันไปโดยใช้อรรถกถารูของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และมาตรฐาน IEC ที่เกี่ยวข้อง โดยการออกแบบโดยผู้ศึกษานั้นจะทำการออกแบบโดยพิจารณาในแง่มุมมองทางวิศวกรรมเป็นหลัก ซึ่งในสุดท้ายแล้วผู้ศึกษาจะนำผลการออกแบบทั้งสองกรณีมาทำการเปรียบเทียบกันในเรื่องมุมมองด้านวิศวกรรมและในแง่มุมมองทางเศรษฐศาสตร์

### 1.4 แผนการดำเนินโครงการ

| การดำเนินงาน   | เดือน |      |      |      |      |      |      |      |
|--|-------|------|------|------|------|------|------|------|
|  | มิ.ย. | ก.ค. | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. |
| 1. ศึกษาข้อมูล และงานวิจัยเกี่ยวกับสถานีไฟฟ้าย่อย ขนาด 115kV                               |       |      |      |      |      |      |      |      |
| 2. ศึกษาลำดับการก่อสร้าง   |       |      |      |      |      |      |      |      |
| 3. ศึกษาระบบการต่อลงดินและวางบัส   |       |      |      |      |      |      |      |      |
| 4. ศึกษาความพิเศษของการออกแบบเฉพาะที่แรงดันสูงขนาด 115kV                                   |       |      |      |      |      |      |      |      |
| 5. ศึกษาอุปกรณ์ต่างๆ ของสถานีไฟฟ้าย่อย   |       |      |      |      |      |      |      |      |
| 6. ถ่ายทำการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ภายใน สถานีไฟฟ้าย่อย บางพลี                               |       |      |      |      |      |      |      |      |
| 7. ศึกษาการออกแบบ Layout ,One line diagram โดยทำการเลือกอุปกรณ์ใหม่                        |       |      |      |      |      |      |      |      |
| 8. เปรียบเทียบการออกแบบของสองบริษัท  |       |      |      |      |      |      |      |      |
| 9. ออกแบบระบบต่างๆ ในสถานีไฟฟ้าย่อย ภายใต้เงื่อนไขที่สอดคล้องตามหลักวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ |       |      |      |      |      |      |      |      |
| 10. สรุปผลการออกแบบ และทำการนำเสนอ   |       |      |      |      |      |      |      |      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้รับความรู้ทางด้านทฤษฎีและในเชิงเทคนิคเกี่ยวกับขั้นตอนการออกแบบสร้างสถานีไฟฟ้า  
ย่อยแรงสูงขนาด 115 กิโลโวลต์
2. สามารถนำข้อมูลเทคนิคที่มีอยู่โดยอ้างอิงตามองค์ความรู้ของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.)  
และมาตรฐาน IEC มาทำการคำนวณเพื่อออกแบบพิกัดของอุปกรณ์บนลานไถไฟฟ้าภายใน  
สถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูงขนาด 115 กิโลโวลต์ได้
3. สามารถวิเคราะห์ผลการออกแบบจริงและผลการออกแบบโดยใช้อ้างอิงความรู้ของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) โดยผู้ศึกษา มาทำการพิจารณาเปรียบเทียบในแง่มุมเชิงวิศวกรรมและแง่มุม  
เชิงเศรษฐศาสตร์ได้
4. ได้รับความรู้ถึงการวิเคราะห์เลือกอุปกรณ์ในลานไถไฟฟ้าและอุปกรณ์ป้องกันต่างๆภายในสถานี  
ไฟฟ้าย่อยแรงสูง 115 กิโลโวลต์ ในแง่มุมจริง ซึ่งแตกต่างกับในทางทฤษฎี เนื่องจากต้อง  
พิจารณาเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### การสร้างสถานีไฟฟ้าย่อย

สถานีไฟฟ้า (Substation) คือสถานที่ที่ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการไหลของพลังงานไฟฟ้าในระบบและอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือต่ำลง มีสายส่งหรือโรงไฟฟ้าต่อเชื่อมเข้าและมีอุปกรณ์ระบบควบคุมและป้องกันติดตั้งเพื่อตัดอุปกรณ์หลักออกขณะเกิดการลัดวงจรในสายส่ง หรือในระบบจำหน่าย หรืออุปกรณ์ภายในสถานีเกิดความเสียหาย เป็นต้น

หน้าที่และวัตถุประสงค์ของสถานีไฟฟ้า

1. เป็นศูนย์กลางในการเชื่อมระบบแรงดันสูงกับระบบแรงดันต่ำเข้าด้วยกันและนำพลังงานเข้าหรือออกจากระบบ เช่นระบบสายส่ง (ระบบ 115 เควี.) กับระบบจำหน่ายแรงสูง (ระบบ 24, 33 เควี.) เป็นต้น
2. เป็นจุดติดตั้งเครื่องมือวัด เพื่อวัดปริมาณทางไฟฟ้า
3. เป็นจุดติดตั้งอุปกรณ์ตัดตอน, อุปกรณ์ควบคุมและอุปกรณ์ป้องกัน
4. เป็นจุดเชื่อมโยงระบบสื่อสาร
5. เปลี่ยนระดับแรงดันให้เหมาะสมและรักษาแรงดันให้คงที่ก่อนส่งไปยังระบบอื่น

การเลือกสถานที่ตั้ง

หลังจากวางแผนก่อสร้างสถานี จะทราบอุปกรณ์ที่จำเป็นในสถานีสิ่งต่อไปคือเลือกสถานที่ซึ่งต้องคำนึงถึงด้านต่างๆ ดังนี้

1. ความสวยงามและทัศนียภาพ ต้องไม่ขัดกับสิ่งแวดล้อม กลมกลืนกับสถานที่ใกล้เคียง เช่น ใกล้ชุมชน ใกล้สถานที่ใช้เพาะปลูก ในสถานีจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่มีลักษณะมีความสูงประกอบด้วยโลหะ ซึ่งถ้าเสียหายอาจเกิดอันตรายในบริเวณกว้าง ทำให้ต้องออกแบบให้มีระยะห่างระหว่าง อุปกรณ์ที่เพียงพอแต่ผู้อาศัยใกล้เคียงอาจเรียกร้องให้ลดความสูงของอุปกรณ์ภายในสถานี หรือ เสียงที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ รวมถึงอาจเรียกร้องให้เปลี่ยนหรือย้ายสถานที่ก่อสร้าง ทำให้จำเป็นต้องออกแบบให้อุปกรณ์ติดตั้งอยู่ภายในอาคาร (indoor substation) ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงสภาพทั้งในปัจจุบันและผลกระทบที่อาจเกิดในอนาคต
2. การทำงานของผู้ควบคุม หรือ ผู้บำรุงรักษา สถานีไฟฟ้าไม่เหมือนกับโรงงานที่มีผู้ปฏิบัติงาน เป็นจำนวนมากและทำงานทุกวัน ถ้าสถานีใช้ระบบควบคุมจากทางไกล (remote control) หรือไม่มีผู้ควบคุมอยู่ประจำ (unmanned substation) จะมีผู้ปฏิบัติงานมาที่สถานีเป็นครั้งคราวจึงต้อง พิจารณาเรื่องความปลอดภัย-อุปกรณ์เตือนภัยและต้องคำนึงถึงเรื่องการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ เข้า-ออก และเครื่องมือที่ใช้ติดตั้งเข้ามาที่สถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เสียงที่เกิดส่วนใหญ่มาจากการสั่นของแกนเหล็กของหม้อแปลง อาจก่อให้เกิดความรำคาญต่อผู้อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียง จึงจำเป็นต้องพิจารณาข้อกำหนดของหม้อแปลง (transformer specification) ให้มีการออกแบบความดังระดับของเสียงให้ต่ำไม่รบกวน หรือต้องออกแบบให้มีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยลดเสียงรอบหม้อแปลง (Low noise transformer) รวมถึงเสียงที่เกิดจากการทำงานของเบรกเกอร์
4. มลพิษ ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากมลพิษในอากาศที่มีต่ออุปกรณ์และมลพิษที่เกิดจากอุปกรณ์มีต่อสิ่งแวดล้อม อาจจำเป็นต้องออกแบบเป็น GIS และเรื่องการระบายความร้อนออกจากหม้อแปลงอาจทำให้อากาศบริเวณใกล้เคียงสูงขึ้น
5. ควรเลือกสถานที่ตั้งให้อยู่ใกล้กับ load center โดยเฉพาะในบริเวณที่มีไหลหนาแน่นเพื่อลดความสูญเสีย (loss) ในสายจำหน่าย

## 2.1 ชนิดของสถานีไฟฟ้าย่อย (Type of Substation)

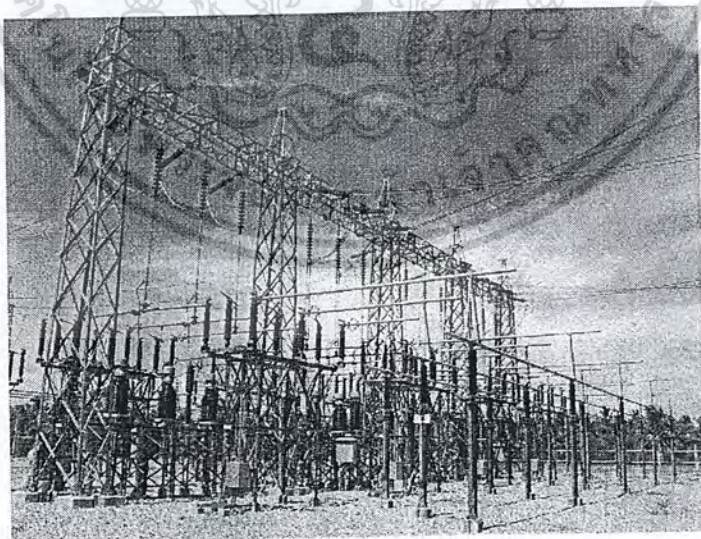
ชนิดสถานีไฟฟ้าแบ่งออกตามชนิดของฉนวนได้เป็น 2 แบบ คือ

- สถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนอากาศ (Air Insulated Substation: AIS)
- สถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas Insulated Substation: GIS)

ชนิดสถานีไฟฟ้าแบ่งออกตามลักษณะการติดตั้งได้เป็น 2 แบบ คือ

- สถานีไฟฟ้าแบบกลางแจ้ง (Outdoor Substation)
- สถานีไฟฟ้าแบบภายในอาคาร (Indoor Substation)

### 2.1.1 สถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนอากาศ (Air Insulated Substation: AIS)



รูปที่ 2.1 ลานไกของ AIS

เป็นสถานีที่นิยมใช้มากเนื่องจากอุปกรณ์มีราคาถูก ราคาที่ดินไม่แพง แต่จะต้องใช้พื้นที่

ในการก่อสร้างมากพอสมควร และสภาพแวดล้อมเหมาะสม บางครั้งอาจเรียกว่า Conventional เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Substation หรือ Open Air Substation โดยการออกแบบให้อุปกรณ์หลักต้องประกอบติดตั้งอยู่บนโครงเหล็ก ใช้อากาศเป็นฉนวนภายนอกระหว่างตัวนำแต่ละเฟส และระหว่างตัวนำกับดิน ซึ่งสภาวะของฉนวนขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศ คือ ความดัน อุณหภูมิ ความชื้น ความเปรอะเปื้อนฝุ่นละออง ดังนั้นในการออกแบบสถานีไฟฟ้าแบบ AIS จะต้องกำหนดการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ให้ระยะห่างมีความปลอดภัยทางไฟฟ้า (Electrical Clearance) โดยทั่วไปมักเป็นชนิดอยู่กลางแจ้ง (Outdoor Substation) ซึ่งต้องคำนึงมาตรการป้องกันฟ้าผ่าโดยตรง รวมถึงมาตรการป้องกันสัตว์ปีกและสัตว์เลื้อยคลานด้วย ซึ่งสามารถเป็นสาเหตุทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง

ข้อดีของสถานีไฟฟ้าแบบ AIS คือ

1. ออกแบบได้หลากหลายตามความต้องการของระบบ
2. อุปกรณ์มีราคาถูก
3. กรณีอุปกรณ์ใดเกิดเสียหาย เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์, สวิตช์ใบมีด, หม้อแปลงวัดกระแส (CT), หม้อแปลงวัดแรงดัน (PT), บัสบาร์ เป็นต้น สามารถจัดหาทดแทนได้ง่าย
4. การขยายระบบหรือเปลี่ยนพิกัดอุปกรณ์ทำได้ง่าย
5. การบำรุงรักษาง่าย สามารถทำได้เฉพาะตัวไม่กระทบกับอุปกรณ์ข้างเคียง

ข้อเสียของสถานีไฟฟ้าแบบ AIS คือ

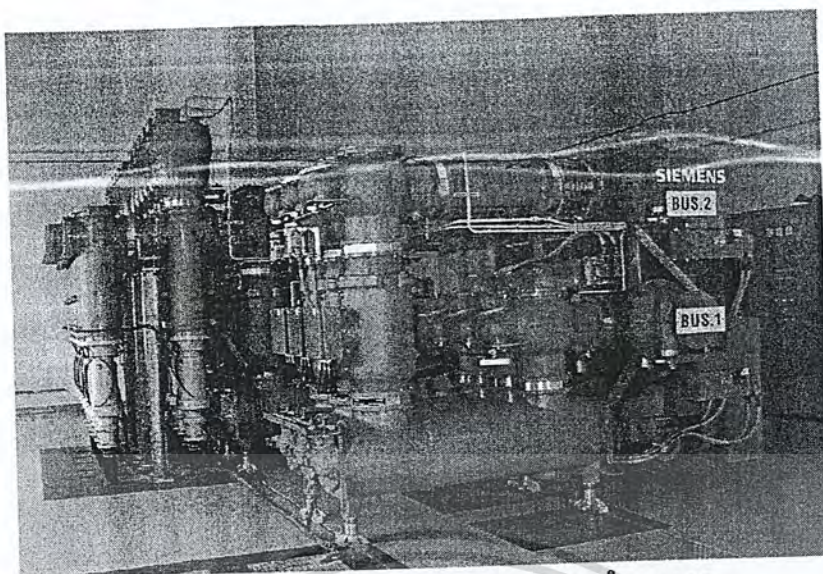
1. ใช้พื้นที่ในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าจำนวนมาก ดังนั้นต้องคำนึงถึงราคาที่ดินในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าเป็นหลัก
2. ต้องระมัดระวังเมื่อทำงานในพื้นที่สถานีไฟฟ้า
3. ต้องเลือกฉนวนให้ถูกต้องตามสภาพแวดล้อม
4. ต้องมีมาตรการป้องกันผลกระทบจากสัตว์

#### 2.1.2 สถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas Insulated Substation: GIS)

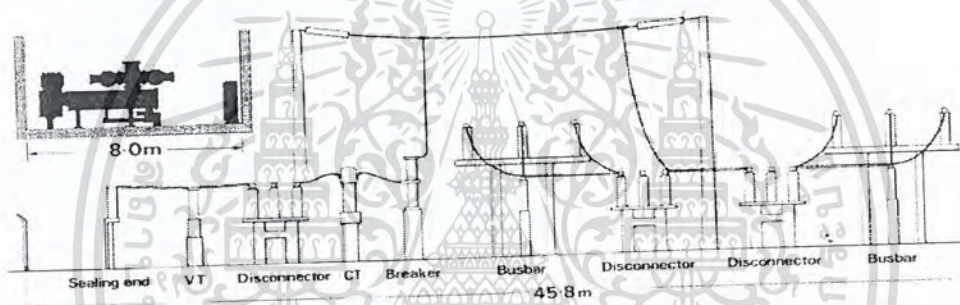


รูปที่ 2.2 สถานีไฟฟ้าแบบ GIS แบบภายนอกอาคารและภายในอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 สถานีไฟฟ้าแบบ GIS แบบภายในอาคาร



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบระหว่างสถานีไฟฟ้าแบบ AIS และ GIS

เป็นสถานีไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์, สวิตช์ไบเมทัล, หม้อแปลงวัดกระแส (CT), หม้อแปลงวัดแรงดัน (PT), บัสบาร์ เป็นต้น ติดตั้งอยู่ในท่อโลหะระบบปิด โดยอัดก๊าซ SF<sub>6</sub> เพื่อเป็นฉนวนไว้ภายใน จึงสามารถลดระยะปลอดภัยทางไฟฟ้าลงได้ ทำให้สถานีไฟฟ้าแบบ GIS มีขนาดเล็กลง สามารถออกแบบให้ติดตั้งแบบกลางแจ้ง, แบบภายในอาคาร, ใต้พื้นดินหรือภายในอุโมงค์ได้ โดยทั่วไปจะพิจารณาตามวัตถุประสงค์หลักของการติดตั้งใช้งาน เช่น ต้องการความเชื่อมั่นสูง, มีพื้นที่ว่างจำกัด, ไม่ต้องการการบำรุงรักษามาก เป็นต้น ดังนั้นปัจจุบันจึงนิยมติดตั้งสถานีไฟฟ้าแบบ GIS กันมากขึ้น

GISเป็นสถานีไฟฟ้าที่ใช้ฉนวนเป็นก๊าซชนิดหนึ่งที่มีค่าฉนวนดีกว่าสารฉนวนไฟฟ้าอื่นๆ ซึ่งในปัจจุบันก๊าซตัวนี้คือ SF<sub>6</sub> (Sulphur Hexa Fluoride) โดย GIS บรรจุก๊าซ SF<sub>6</sub> ไว้ในตัวถังให้มีความดันของก๊าซ SF<sub>6</sub> ประมาณ 3-4 บาร์ ทำให้ก๊าซ SF<sub>6</sub> มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าดีกว่าอากาศหลายเท่า ทำให้ลดระยะห่างระหว่างตัวนำลง ซึ่งก็เป็นผลทำให้ขนาดของ GIS มีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับสถานีไฟฟ้าแบบ AIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของสถานีไฟฟ้าแบบ GIS คือ

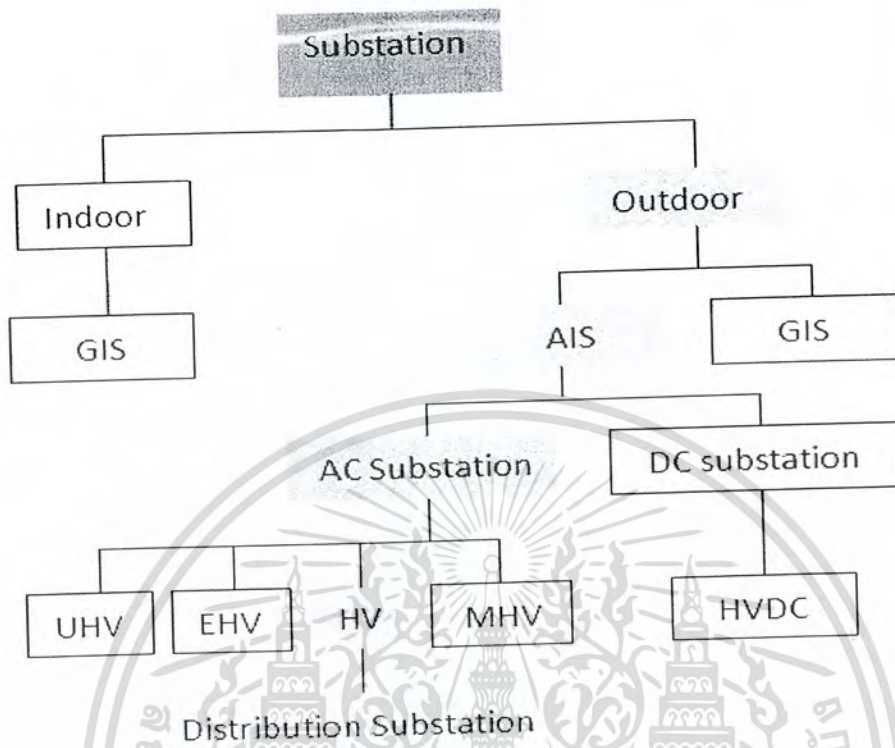
1. ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยกว่า (ประมาณ 30% ของพื้นที่สถานีไฟฟ้าแบบ AIS)
2. ใช้เวลาและแรงงานในการติดตั้งได้รวดเร็วกว่าสถานีไฟฟ้าแบบ AIS
3. มีความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดีสามารถติดตั้งในพื้นที่ที่มีปัญหาลมภาวะได้
4. มีความเชื่อมั่นสูง เพราะจุดสัมผัสจะถูกหุ้มหมด ไม่มีผลกระทบจากบรรยากาศ
5. ทักษะวิศวกรดีกว่า เหมาะสำหรับการสร้างในตัวเมือง
6. การต่อสายวงจรควบคุมเป็นแบบ Plug-in สะดวกในการใช้งาน
7. การบำรุงรักษาน้อยกว่าสถานีไฟฟ้าแบบ AIS
8. มีความปลอดภัยสูง เนื่องจากส่วนที่เป็นตัวนำถูกห่อหุ้มด้วยโลหะ
9. ปราศจากการรบกวนของสัตว์ปีก และสัตว์เลื้อยคลาน
10. อุปกรณ์สำรอง (Spare Parts) มีจำนวนน้อยกว่าสถานีไฟฟ้าแบบ AIS

ข้อเสียของสถานีไฟฟ้าแบบ GIS คือ

1. GIS มีราคาสูงกว่าแบบ AIS ในพิกัดของสถานีไฟฟ้าเท่ากัน
2. การตัดแปลงหรือเปลี่ยนขนาดอุปกรณ์ทำได้ยาก
3. การขยายขนาดของสถานีไฟฟ้า จะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า เพราะต้องใช้อุปกรณ์เช่นเดียวกับอุปกรณ์เดิม
4. การติดตั้งและการบำรุงรักษา ต้องอยู่ภายใต้การดูแลของผู้เชี่ยวชาญโดยเฉพาะ
5. การบำรุงรักษาในแต่ละครั้งจะใช้เวลาานานกว่า

ในการออกแบบสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น ในอันดับแรกจะต้องพิจารณาเลือกสถานที่ในการสร้างว่าจะเป็นที่กลางแจ้ง (Outdoor) หรือในร่ม (Indoor) ซึ่งพิจารณาได้จาก ขนาดพื้นที่ที่ใช้ในการก่อสร้าง ในกรณีสถานีไฟฟ้าแรงสูง 115/24 kV ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารนั้น มีขนาดพื้นที่เพียงพอในการก่อสร้างในลักษณะกลางแจ้ง และเลือกใช้สถานีไฟฟ้าย่อยแบบฉนวนอากาศ (AIS) เนื่องจากพื้นที่ในการก่อสร้างอยู่ในพื้นที่โล่งซึ่งมีระยะความปลอดภัยของอุปกรณ์ (Clearance) เพียงพอ และด้วยเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์คือ เนื่องจากสถานีไฟฟ้าย่อยแบบฉนวนอากาศมีราคาอุปกรณ์และการก่อสร้างที่ถูกกว่า และเนื่องจากระบบไฟฟ้าของประเทศไทยเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับจึงเลือกสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยแบบไฟฟ้ากระแสสลับ จากแนวความคิดข้างต้นนี้สามารถนำมาเขียนแผนผังการพิจารณาเลือกชนิดของสถานีไฟฟ้าย่อยได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แผนผังการพิจารณาเลือกชนิดของสถานีไฟฟ้าย่อย

## 2.2 ลำดับในการออกแบบการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อย

ในสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจะมีงานอยู่ 2 ส่วน นั่นก็คือ 1.งานทางด้านโยธา ซึ่งเป็นงานที่เกี่ยวข้องทางด้านโครงสร้างของสถานีไฟฟ้าย่อยเป็นส่วนใหญ่ และส่วนที่ 2. งานทางด้านไฟฟ้าซึ่งเป็นงานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น หม้อแปลงกำลัง ระบบป้องกันฟ้าผ่า ระบบ Over current relay ระบบการต่อลงดิน เป็นต้น ซึ่งในการศึกษาของโครงการนี้จะมุ่งเน้นการออกแบบสถานีไฟฟ้าย่อยไปทางด้านงานการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังเพียงอย่างเดียว

การสร้างไฟฟ้าย่อยที่เกี่ยวกับทางด้านไฟฟ้านั้น ก็จะมีอยู่ 2 ส่วนคือ 1. การออกแบบสร้าง SUBSTATION 2. ลำดับการสร้าง SUBSTATION โดยที่ทั้งสองส่วนนี้จะเป็นขั้นตอนของภาพรวมในการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดโครงการการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ลำดับในการออกแบบสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยในส่วนทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง

2.2.1 สำรวจความต้องการโหลด ซึ่งจะทำให้ทราบพิสัยขนาดของ Substation ที่จะจ่ายโหลด (หม้อแปลงกำลังที่จะจ่ายโหลด)

2.2.2 เลือกรูปแบบการจัดวางบัสและ Spec ของหม้อแปลงกำลัง

2.2.3 คำนวณฟอล์ทที่เกิดขึ้นภายในระบบ

2.2.4 ออกแบบระบบ Switchgear

2.2.5 ออกแบบระบบควบคุมและป้องกัน

2.2.6 ออกแบบและจัดวางระยะ Clearance ของอุปกรณ์

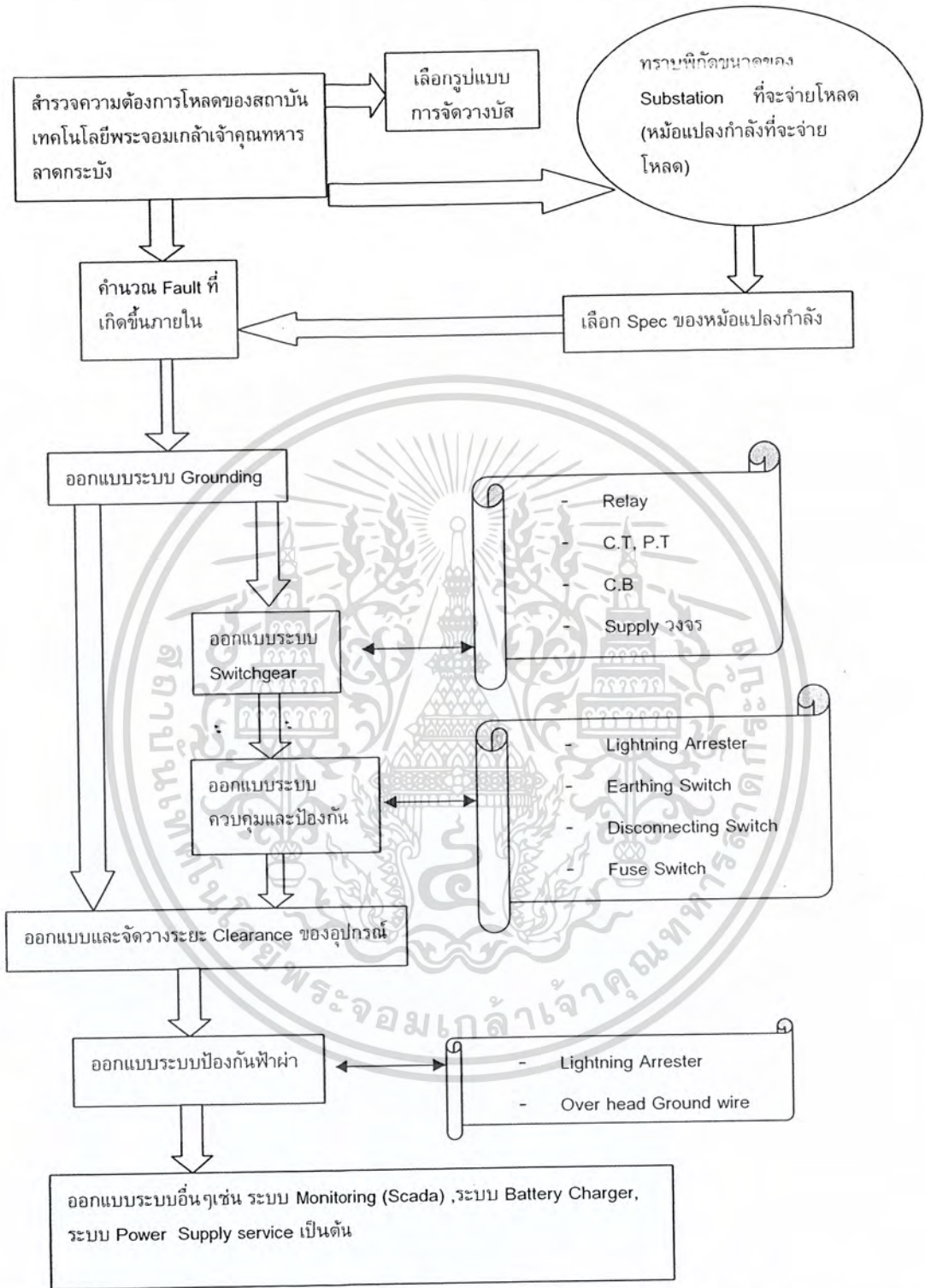
2.2.7 ออกแบบระบบการต่อลงดิน

2.2.8 ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า

2.2.9 ออกแบบระบบอื่นๆเช่น ระบบ Monitoring (Scada) ,ระบบ Battery Charger,ระบบ Power Supply service เป็นต้น

หมายเหตุ ลำดับในการออกแบบสร้าง SUBSTATION ในส่วนทางด้านระบบไฟฟ้ากำลังนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางและภาพรวมของการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อย โดยในการออกแบบจริงนั้นจะมีรายละเอียดมากกว่านี้ ซึ่งจะต้องมีการศึกษาอย่างละเอียดต่อไป

Flow Chart ลำดับในการออกแบบสร้าง SUBSTATION ในส่วนทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง

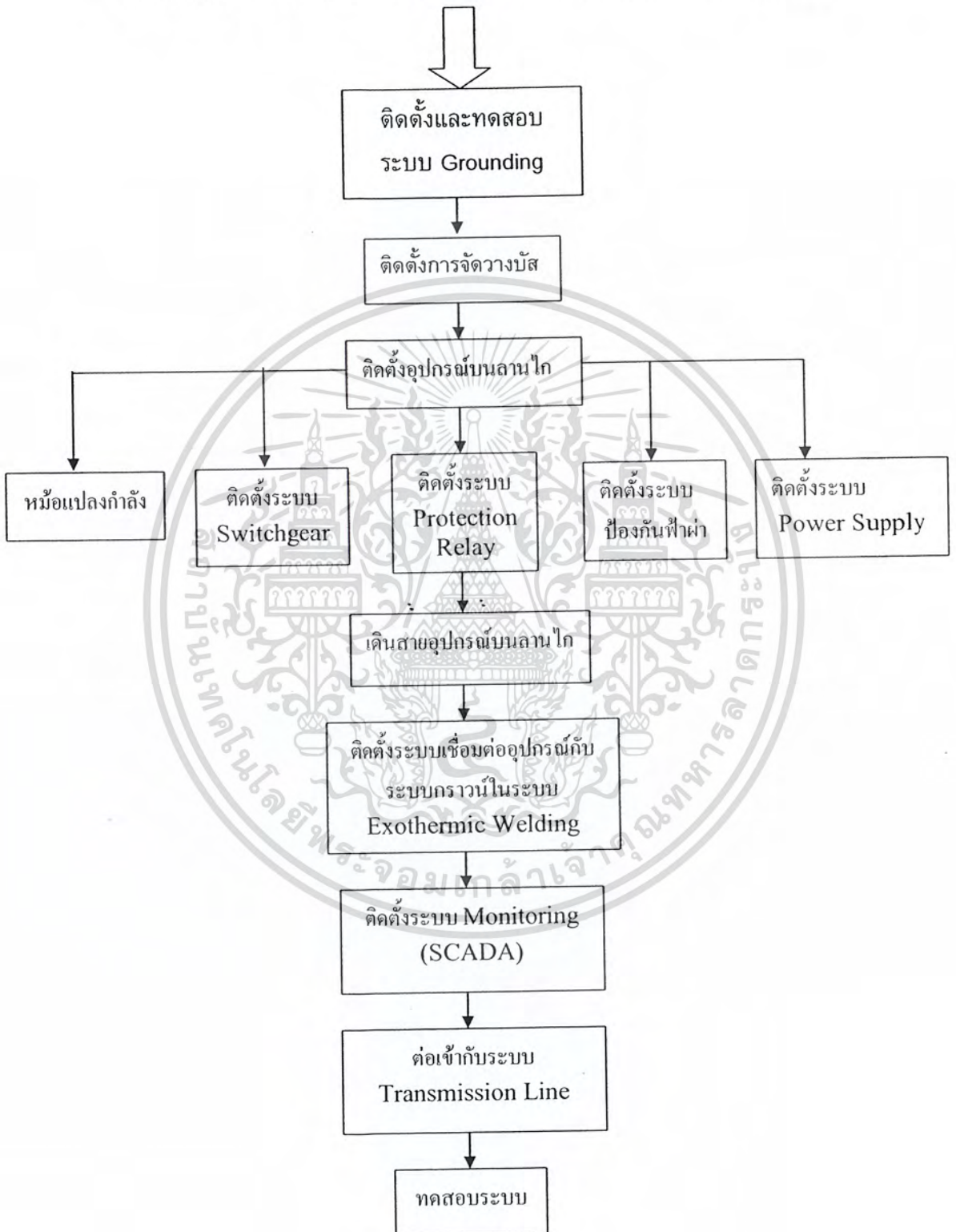


รูปที่ 2.6 Flow Chart แสดงลำดับในการออกแบบสร้าง SUBSTATION ในส่วนทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ลำดับในการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยในส่วนทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง

Flow Chart ลำดับในสร้าง SUBSTATION ในส่วนทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2.7 Flow Chart ลำดับในสร้าง SUBSTATION ในส่วนทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ลำดับในการสร้าง SUBSTATION ในส่วนทางด้านระบบไฟฟ้ากำลังนี้แสดงให้เห็นถึง  
แนวทางและภาพรวมของการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อย โดยในการออกแบบจริงนั้นจะมีรายละเอียด  
มากกว่านี้ ซึ่งจะต้องมีการศึกษาอย่างละเอียดต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ทฤษฎีการจัดวางบัส

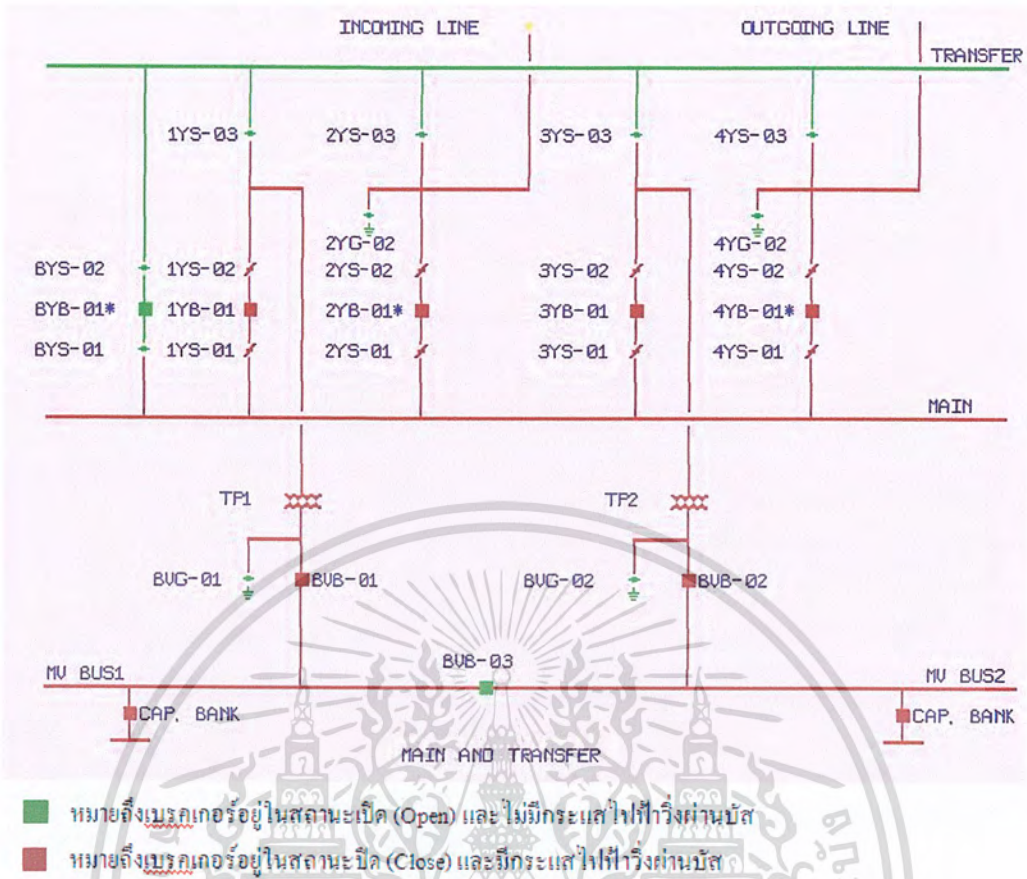
#### รูปแบบการจัดเรียงบัสภายในสถานีไฟฟ้า (Bus Scheme Arrangement)

การพิจารณาเลือกแบบใดนั้นจะต้องคำนึงถึง เงินลงทุน, ความน่าเชื่อถือ, ความมั่นคงในการจ่ายไฟ, ความยืดหยุ่นและความคล่องตัวในการปฏิบัติงาน รวมทั้งการบำรุงรักษา เป็นต้น ซึ่งการจัดเรียงบัสมีหลายรูปแบบ ดังนี้

#### 3.1 Main and Transfer Bus

การจัดวางจะมีบัส 2 ชุด ชุดหลักที่ทำงานเรียกว่า Main Bus และชุดที่สองเรียกว่า Transfer Bus และจะติดตั้ง Breaker ตัวหนึ่งไว้เพื่อใช้ในการบำรุงรักษา Line Breaker หรือ Transformer Breaker เรียกเบรกเกอร์ตัวนั้นว่า Tie Breaker โดยการจัดวางบัสแบบนี้มีความยืดหยุ่นในการบำรุงรักษาเบรกเกอร์มากขึ้นแต่ยังคงมีปัญหาการจ่ายไฟเมื่อเกิด Bus fault จึงเหมาะสำหรับสถานีที่มีวงจรต่อเข้าไม่เกิน 6-7 วงจร (Bay)

Tie Bay จะมี Tie Breaker ทำหน้าที่สำหรับจ่ายไฟแทน Breaker ตัวที่จะต้องปลดออกไป สำหรับในการทำ Switching สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการทำงานดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่า Transfer Bus ซึ่งปกติไม่ได้จ่ายไฟเป็นเวลานานๆ ยังคงสามารถทำงานได้ตามปกติอยู่ และเพื่อป้องกันการสับไบมีด Energize Transfer Bus ขณะมี Fault จึงมักใช้ Tie Breaker ในการทดลองจ่ายไฟ หรือ Energized Transfer Bus เรียกว่าเป็นการ Test Transfer Bus และหลังจากได้ทำการ Test ไปแล้ว ในการทำ Switching ที่ Bay ต่อไปที่มีการทำงานต่อเนื่องกัน ก็ไม่จำเป็นต้อง Test อีก แต่ถ้าเว้นช่วงการทำงานตั้งแต่ 2 วันขึ้นไปก็ควร Test อีกก็ควร Test Transfer Bus อีกครั้งก่อนจะตรวจสอบ Breaker ตัวต่อไป

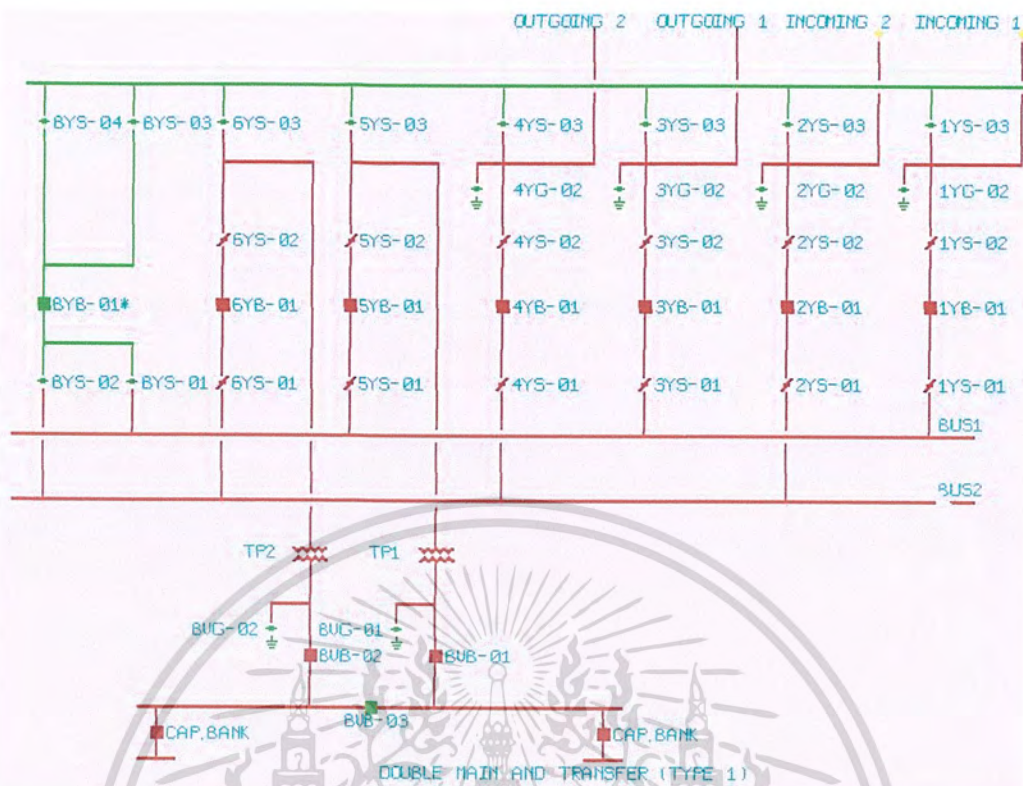


รูปที่ 3.1 สภาพจ่ายไฟปกติของ Main and Transfer Bus (ที่มา : กฟน.)

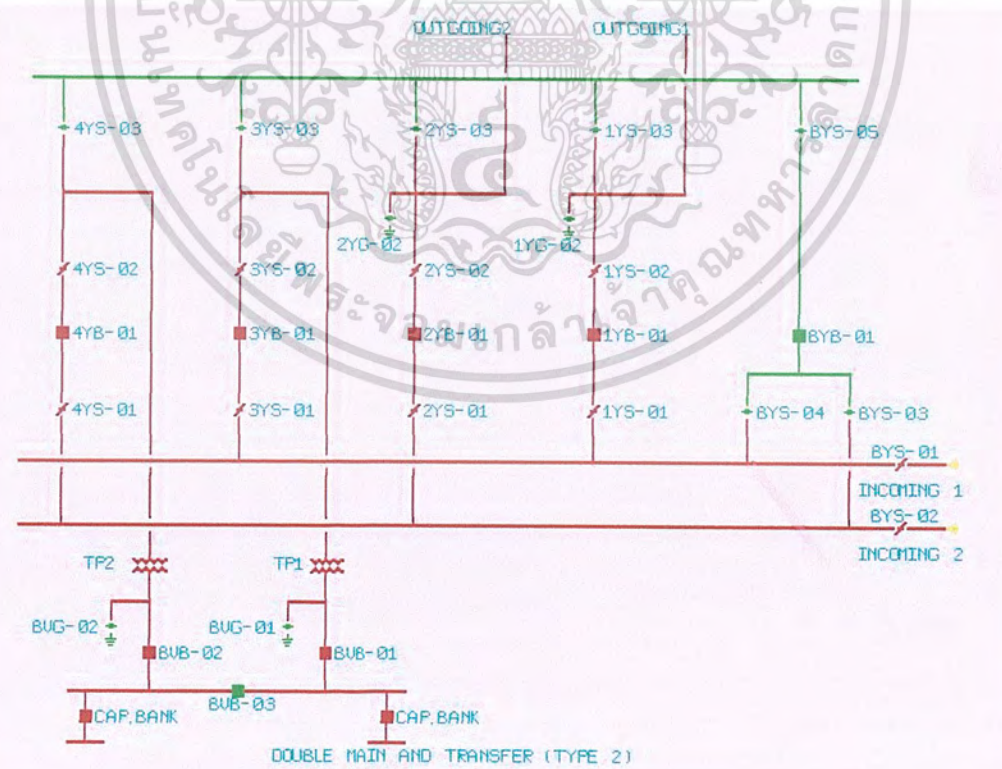
### 3.2 Double Main and Transfer

รูปแบบการจัดวางคล้ายกับ Main and Transfer แต่ต่างกันที่มี Main Bus เพิ่มเข้ามาอีก 1 ชุด การจัดวางแบบนี้จะใช้กับระบบที่มี Incoming อย่างน้อย 2 วงจร โดยแยก Incoming ของแต่ละ Bus โดยการจัดวางบัสรูปแบบนี้ถึงแม้ว่าจะมีเหตุขัดข้องในวงจรใดก็ตามก็จะไม่เกิดไฟดับในระบบ เพราะสามารถถ่ายเทพลังงานจากบัสหนึ่งไปบัสหนึ่ง โดยผ่านทางเบรกเกอร์ Tie Bus และในกรณีที่ต้องการตรวจสอบเบรกเกอร์ย่อยชุดใดชุดหนึ่ง ก็สามารถย้อนกลับทางสวิตช์ได้เช่นเดียวกัน การจัดวางแบบนี้ทำให้มีความคล่องตัวและความน่าเชื่อถือสูง แต่ข้อเสียก็คือมีราคาแพง ซึ่งรูปแบบการวางบัสแบบนี้จะมี 2 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 สภาพจ่ายไฟปกติของ Double Main and Transfer Type 1



รูปที่ 3.3 สภาพจ่ายไฟปกติของ Double Main and Transfer Type 2

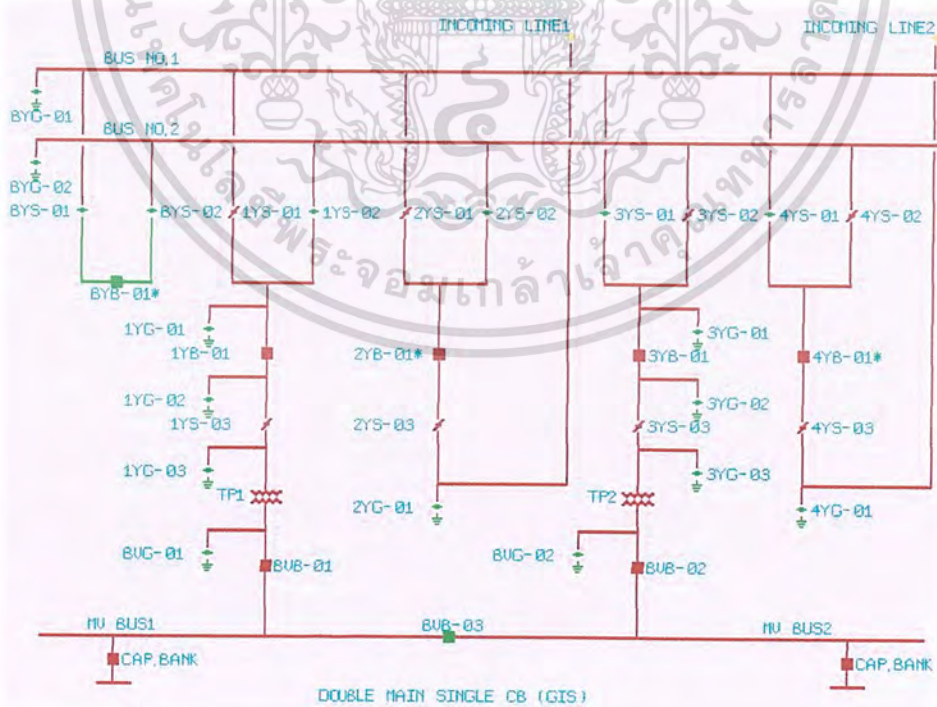
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**3.3 Double Main Bus Single Breaker**

สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูงแบบ GIS ลักษณะการจัดวางบัสแบบนี้จะมีลักษณะเฉพาะของแต่ละที่ซึ่งมีความแตกต่างกัน แต่ส่วนใหญ่แล้วจะต้องมี Switch Ground ต่อก่อนเข้าเบรกเกอร์และที่ Main Bus ทั้ง 2 บัส ทั้งนี้เพื่อทำการสับเข้าใช้งานในกรณีที่มีการตรวจซ่อมบำรุงอุปกรณ์ นอกจากนี้สถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูงแบบ GIS ยังใช้ระบบ Interlock เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายจากการทำ Switching ที่ผิดขั้นตอนหรือจากสาเหตุอื่น ๆ และในการทำงานไม่ควรปลดหรือ OFF ระบบ Interlock เพราะอาจก่อให้เกิดความผิดพลาด ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้

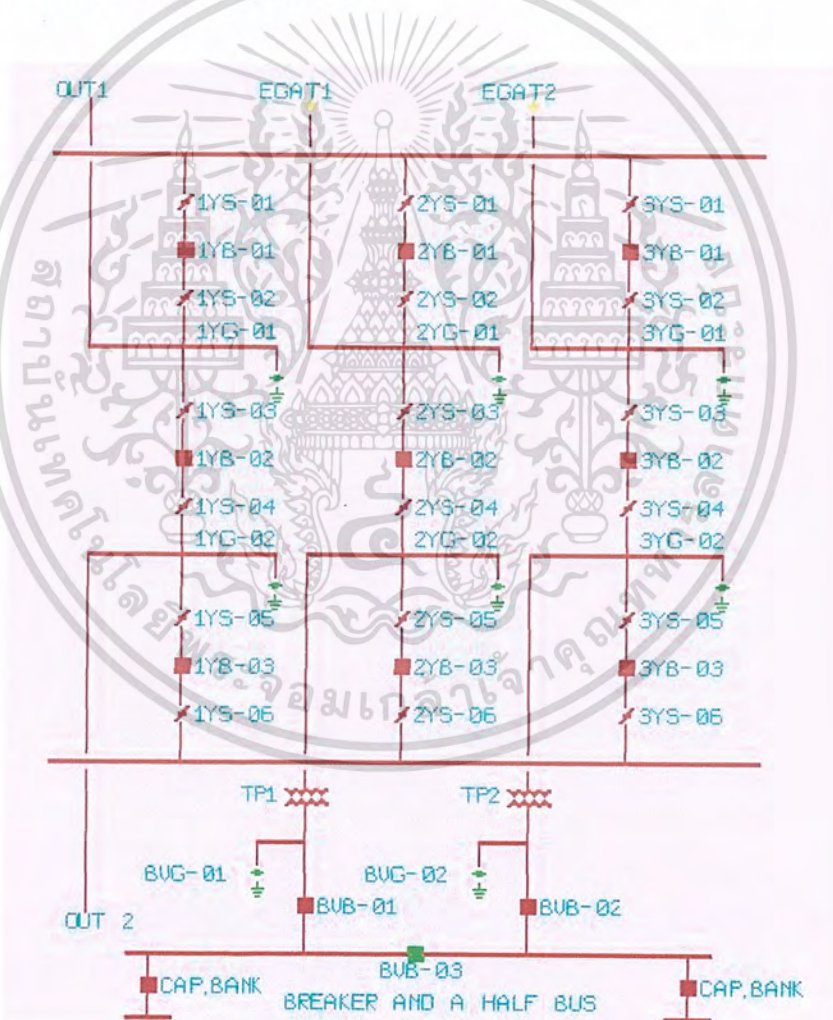
การจัดวางแบบนี้จะมี Main Bus สองชุด โดย Breaker ต่อกันตรงกับ Line และมีสวิตช์ไบมีดสองชุดเพื่อใช้เลือกว่าจะให้ Line ต่อเข้ากับ Bus ที่ 1 หรือ 2 โดยมี Breaker หนึ่งตัวทำหน้าที่เชื่อม Bus ทั้งสองเข้าด้วยกัน (Bus Coupler Breaker) การจัดแบบนี้จะมีความมั่นคงของระบบ เพราะสามารถเลือกรับหรือจ่ายไฟได้จากบัสใดก็ได้ โดยใช้ Breaker เพียงหนึ่งตัวต่อหนึ่งวงจร และในขณะบำรุงรักษา Line Breaker จะต้องปลด Line นั้นออกเว้นแต่จะจัดให้สวิตช์ไบมีด (Disconnecting Switch) เพื่อใช้เชื่อมต่อ Line เข้ากับบัสใดบัสหนึ่งโดยตรง (Bypass) แต่ต้องอาศัยระบบป้องกันตัวอื่นทำหน้าที่ป้องกัน Line นั้นแทน



**รูปที่ 3.4** สภาพจ่ายไฟปกติของ Double Main Bus Single Breaker

### 3.4 Breaker and A half

การจัดวางคล้ายกับแบบ Double Bus Double Breaker ต่างที่แบบนี้มี Bus สองชุด และมีเบรกเกอร์สามตัวต่ออนุกรมกัน ที่ปลายแต่ละด้านแยกต่อเข้ากับ Bus ที่อยู่ใกล้และนำ Line ต่อเข้ากับตำแหน่งระหว่าง Breaker ทำให้สามารถใช้ Breaker ได้ถึงสามตัวต่อหนึ่งวงจร โดยที่ Line ทั้งสองใช้ Breaker ตัวกลางร่วมกัน จึงเป็นที่มาของคำว่า “เบรกเกอร์ครึ่ง” โดยหากเกิดเหตุขัดข้องที่บัสหรือเบรกเกอร์ก็สามารถถอดซ่อมได้โดยไม่ต้องดับไฟ ดังนั้นจึงทำให้การจัดวางแบบนี้มีความมั่นคงในการจ่ายไฟสูง ความคล่องตัวและสะดวกในการถอดซ่อมบำรุงรักษา และมีความน่าเชื่อถือ (Reliability) สูง แต่ข้อเสียก็คือใช้เงินลงทุนสูง และ Breaker จะต้องมีความ Current Rating ไม่น้อยกว่าสองวงจรรวมกัน

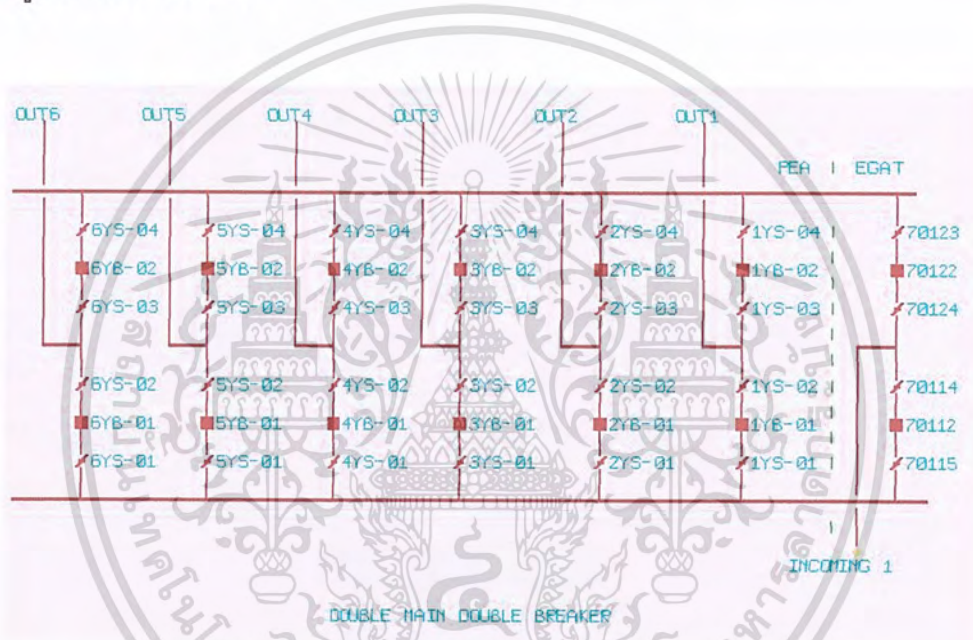


รูปที่ 3.5 สภาพจ่ายไฟปกติของ Breaker and A half

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 Double main Double Breaker

การจัดวางแบบนี้ระบบจะมีความมั่นคงในการจ่ายไฟสูง มีความคล่องตัวในการปฏิบัติงานและความน่าเชื่อถือมากกว่าแบบ Breaker and a half เนื่องจากแต่ละเบย์ที่เชื่อมต่อกับบัสทั้งสอง จะเป็นอิสระจากเบย์อื่นๆ ซึ่งทำให้สามารถเลือกรับหรือจ่ายไฟจากบัสใดก็ได้ ทำให้ไม่มีปัญหาในการซ่อมบำรุงรักษา Breaker แต่ละตัว เพราะยังมี Breaker อีกตัวพร้อมระบบป้องกันในขณะที่ยังคงใช้งานตามปกติ เมื่อบัสใดเกิดฟอลท์ก็ยังคงจ่ายไฟได้จากบัสที่เหลือ การออกแบบชนิดนี้นิยมใช้เป็น Switching Station คือสถานีไฟฟ้าที่รับไฟมา (Incoming) และจ่ายไฟออก (Outgoing) ไปหลายวงจร และไม่มีการติดตั้งหม้อแปลงกำลัง (TP) อยู่ภายในสถานีไฟฟ้า

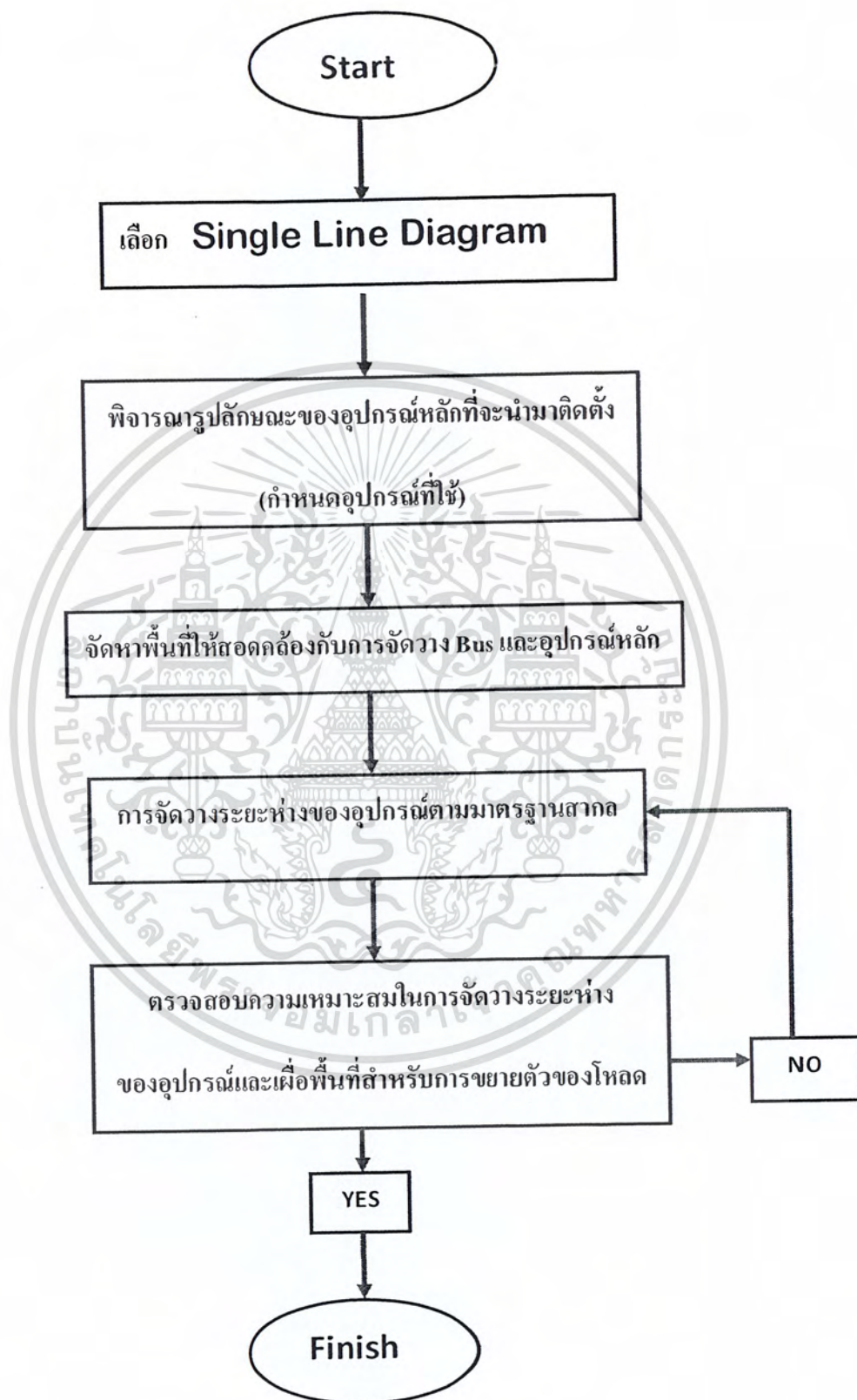


รูปที่ 3.6 สภาพจ่ายไฟปกติของ Double Main Double Breaker

ตาราง 3.1 เปรียบเทียบราคากการจัดวางบัส

| Switching Scheme          | Approximate Relative Cost Comparison |
|---------------------------|--------------------------------------|
| Single Bus                | 100%                                 |
| Ring Bus                  | 114%                                 |
| Sectionalized Bus         | 122%                                 |
| Main and Transfer Bus     | 143%                                 |
| Breaker and a Half        | 158%                                 |
| Double Breaker-Double Bus | 214%                                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ลำดับการออกแบบระยะห่างทางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องออกแบบให้มีระยะห่างระหว่าง อุปกรณ์กับอุปกรณ์ และ อุปกรณ์กับดิน (ground) ที่เหมาะสมเพื่อป้องกัน flashover นอกจากนี้ต้องคำนึงระยะห่างปลอดภัยในกรณีคนเข้าไปทำงานบำรุงรักษาอุปกรณ์ หน่วยงานต่างๆ อาจกำหนดระยะห่างเป็นมาตรฐานเอง หรือ จะใช้ข้อแนะนำตามมาตรฐานสากลที่กำหนด minimum clearance ในอากาศตามจุดต่างๆ อ้างอิงในการออกแบบ และ จำเป็นต้องคำนึงถึงเครื่องจักรเช่น รถ crane ที่นำเข้าไปใช้ทำงานในขณะที่อุปกรณ์ข้างเคียงยังมีไฟต่ออยู่ การจัดวางระยะห่างของอุปกรณ์หลักของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น จะต้องมีความเข้าใจของประเภทของอุปกรณ์หลัก เทคนิคการจัดวาง รวมถึงการวางแผนที่จะเผื่อพื้นที่เพื่อขยายระบบในอนาคต

### 3.6 ข้อคำนึงถึงในการกำหนดระยะห่างทางไฟฟ้าสถานีไฟฟ้าย่อย

1. เลือกมาตรฐานความปลอดภัยทางไฟฟ้า โดยการจัดวางจะต้องเป็นไปตามกฎเกณฑ์มาตรฐานเพื่อความปลอดภัยทางด้านไฟฟ้า
2. การเลือกการจัดวางระบบการตัดต่อนกำลังไฟฟ้า
3. วางทิศทางจุดรับไฟให้สอดคล้องกับสายส่งกำลังไฟฟ้า
4. สภาพแวดล้อมของสถานที่ตั้งทั้งในปัจจุบันและการคาดการณ์ในอนาคต

รูปแบบการจัดวางอุปกรณ์จะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. การจัดวางอุปกรณ์โดยพิจารณาระยะห่างระหว่างเฟส-เฟส (มุมมองด้านบน)
2. การจัดวางอุปกรณ์โดยพิจารณาระยะห่างระหว่างเฟส-กราวด์ (มุมมองด้านข้าง) เมื่อได้จัดวางทั้งในส่วนของ มุมมองด้านบนและมุมมองด้านข้างแล้ว ตามมาตรฐานเรียบร้อยแล้วในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการพิจารณาการวางอุปกรณ์ตามความเหมาะสม การซ่อมบำรุงในแต่ละอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อยเมื่อเกิดความเสียหาย
3. การขนย้ายอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อยด้วยรถขนาดใหญ่ เกรน หรือการใช้เครื่องจักรกลหนัก
4. มีความปลอดภัยแก่ผู้ที่ปฏิบัติงาน อุปกรณ์ไฟฟ้า และสัตว์ ในสถานีไฟฟ้าย่อยการปฏิบัติงานถนนภายใน งานอาคารควบคุม งานรั้วสถานีและประตูทางเข้า งานแสงสว่างภายนอก และงานโครงเหล็ก
5. ระยะห่างทางไฟฟ้าที่กล่าวมานั้น เป็นค่าที่ได้จากมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าต่ำสุด เพราะฉะนั้นในการออกแบบควรเลือกค่าที่สูงกว่า เพื่อความปลอดภัยทางด้านไฟฟ้า และสะดวกในการบำรุงรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ทฤษฎีและหลักการออกแบบระบบต่อลงดิน

ระบบรากสายดิน เป็นระบบนำกระแสฟ้าผ่าที่เข้ามาในสถานีไฟฟ้าแรงสูงให้ไหลลงดิน ระบบรากสายดินนี้ ถ้ามีการออกแบบที่ดีหมายถึงค่าความต้านทานของระบบรากสายดินมีค่าต่ำ ( $R_g$ ) ก็จะสามารถระบายกระแสฟ้าผ่ารวมถึงกระแสฟอลต์ (fault current) ต่างๆให้ไหลลงดินได้รวดเร็ว ซึ่งจะช่วยลดความเสียหายของระบบให้น้อยลงได้ นอกจากนี้ยังทำให้ระบบป้องกันฟ้าผ่ามีประสิทธิภาพในการล่อฟ้าในการล่อฟ้าให้ผ่าลงมาที่ตัวล่อฟ้าได้ดีขึ้น เพราะตัวล่อฟ้าสามารถสร้าง สตรีมเมอร์ (Streamer) เพื่อขึ้นไปรับขั้นนำฟ้าผ่า (Step Leader) ได้ยาวกว่าตัวล่อฟ้าที่มีระบบรากสายดินที่มีค่า  $R_g$  สูงๆ

ในขั้นตอนการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น จะต้องทำการออกแบบระบบกราวด์ให้ได้ค่าต่างๆที่มีค่าเหมาะสมตามเงื่อนไขใน ANSI/IEEE Std.80ก่อนที่จะมีการติดตั้งและใช้งานจริง ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของระบบกราวด์จะมีอยู่ 2 อย่างคือ ในส่วนแรกเพื่อเป็นการนำกระแสไหลลงดินภายใต้สภาวะปกติ และสภาวะที่เกิดกระแสสูงอันเนื่องมาจากฟ้าผ่าหรือกระแสลัดวงจรผิดปกติให้ไหลลงดินอย่างรวดเร็วโดยไม่กระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ และส่วนที่สองเพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานที่อาจได้รับอันตรายจากกระแสดังกล่าว การออกแบบระบบกราวด์ในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ติดตั้งนั้น ควรออกแบบให้มีค่าความต้านทานของระบบกราวด์ของระบบต่ำ ค่าศักดาไฟฟ้า สัมผัสสูงสุดและศักดาไฟฟ้าช่วงกาวให้อยู่ในช่วงที่มนุษย์สามารถทนได้ การออกแบบระบบกราวด์ที่ติดตั้งนั้น นอกจากจะออกแบบเพื่อให้ใช้งานได้ตามจุดประสงค์แล้ว ควรจะต้องมีการคำนึงถึงความประหยัดด้วย

#### 4.1 วัตถุประสงค์ของการออกแบบระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อย

- 1) เพื่อให้แน่ใจว่าคนที่ทำงานในสถานีไฟฟ้าย่อยจะไม่ได้รับอันตรายหรือช็อกของไฟฟ้า
- 2) เพื่อให้กระแสสูงผิดปกติที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าหรือกระแสลัดวงจรไหลลงดินในระบบเองให้ไหลลงดินได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว

##### 4.1.1 กรณีที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุไฟฟ้าช็อก มีดังนี้

- 1) กระแสไฟฟ้าสูงลงกราวด์ ซึ่งสัมพันธ์กับพื้นที่ของระบบกราวด์และความต้านทานดิน วัดจาก Remote Earth
- 2) ความต้านทานดินและการกระจายกระแสที่ทำให้เกิดศักย์ฟ้าสูงที่พื้นดิน
- 3) ตำแหน่งและเวลาที่ร่างกายสัมผัสระหว่างสองจุดที่ทำให้มีความต่างศักย์สูง
- 4) ความต้านทานที่ต่อไม่เพียงพอที่จะจำกัดกระแสผ่านร่างกายที่ไม่ทำให้เกิดอันตราย
- 5) ช่วงเวลาที่เกิด Fault

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

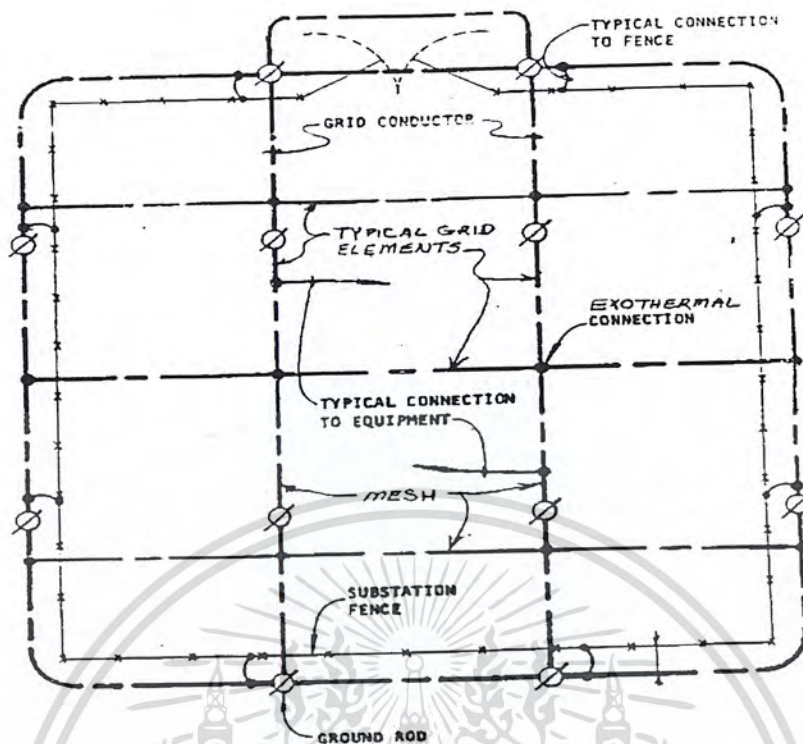
#### 4.1.2 หลักการพิจารณาการออกแบบระบบการต่อลงดิน สรุปได้ดังนี้

- 1) ศึกษาแปลนของสถานีไฟฟ้าและตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ
- 2) สำรวจความต้านทานจำเพาะของดิน
- 3) หาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินสูงสุด และเวลาที่กระแสลัดวงจรลงดินของระบบ
- 4) หาขนาดของตัวนำกริดจากกระแสลัดวงจร
- 5) หาค่าศักย์ไฟฟ้าสัมผัส และศักย์ไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์จะทนได้โดยไม่เกิดอันตราย
- 6) กำหนดกระแสกริดสูงสุด
- 7) วางตัวนำฝังกริดให้ครอบคลุมพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยทั้งหมด
- 8) คำนวณหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์
- 9) คำนวณหาศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น

#### 4.1.3 คำจำกัดความ

- 1) Grounding Grid คือ ระบบการเชื่อมต่อโดยผ่านตัวนำไปยังอุปกรณ์ ที่เป็นทางเดินของกระแสใต้พื้นโลก
- 2) Symmetrical Ground Fault Current คือ ค่า Maximum rms ของ Symmetrical Fault Current
- 3) Asymmetrical Ground Fault Current คือ Maximum rms ของ Asymmetrical Fault Current
- 4) Grid Current คือ อัตราส่วนของผลรวมของกระแสฟอลต์ที่ไหลย้อนกลับไปยัง source ผ่าน Ground Grid
- 5) Fault Duration คือ เวลาที่ใช้แยกอุปกรณ์ที่เกิดฟอลต์ จากกระแสที่มาจากแหล่งเกิด Fault หรือ ช่วงเวลาที่มีกระแสฟอลต์ไหล
- 6) Soil Resistivity คือ ตัววัดความสามารถของดินในการนำกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น (ohm-meters)
- 7) Step Potential คือ ศักย์ตาฟ้าสูงสุดระหว่างจุดสองจุดบนพื้นที่กราวด์ที่ห่างกันระยะ 1 เมตร
- 8) Touch Potential คือ ศักย์ตาฟ้าสูงสุดระหว่างจุดสองจุดที่เชื่อมต่อจากอุปกรณ์จากมือถึงเท้าในเวลาเดียวกัน
- 9) Ground Potential Rise คือ แรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยสัมพันธ์กับศักย์ไฟฟ้าของ Remote Earth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 Grounding Grid

4.1.4 นิยามศักดาไฟฟ้าในการออกแบบระบบการต่อลงดิน ขณะเกิดการลัดวงจรลงจะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นที่ผิวดินบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย โดยศักดาไฟฟ้าต่าง ๆ นิยามได้ดังนี้

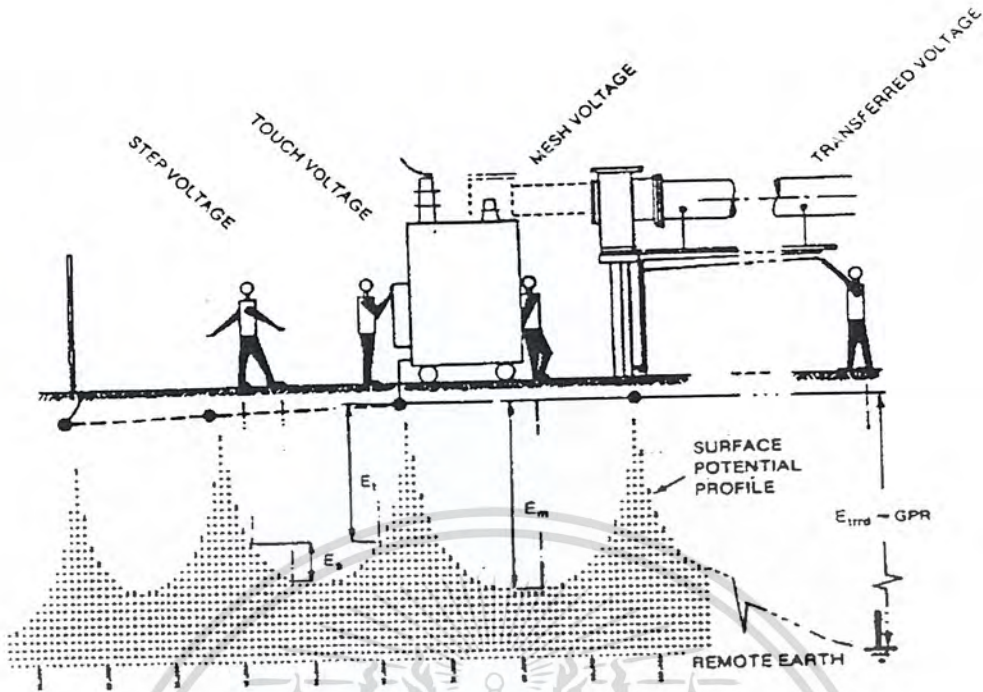
ศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นที่ตะแกรงต่อลงดิน (Grid Potential Rise ; GPR) คือแรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ระบบต่อลงดิน (เมื่อเทียบกับศักดาไฟฟ้าของดินที่อยู่ไกลจากสถานีไฟฟ้าย่อย) ศักดาไฟฟ้านี้มีค่าเท่ากับผลคูณกระแสไฟฟ้าที่มากที่สุดที่ไหลผ่านตะแกรงต่อลงดิน ( $I_g$ ) กับความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ( $R_g$ )

ศักดาไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage;  $E_t$ ) คือ แรงดันไฟเข้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างระบบต่อลงดินกับจุดที่มนุษย์ยืนอยู่และมีมือไปสัมผัสกับโครงสร้าง หรือเปลือกของอุปกรณ์ที่ต่อลงดิน

ศักดาไฟฟ้าเมช (Mesh Voltage ;  $E_m$ ) คือ แรงดันสัมผัสสูงสุดที่เป็นไปได้ภายในร่องตาข่ายของตะแกรงต่อลงดิน

ศักดาไฟฟ้าทรานสเฟอร์ (Transferred Voltage;  $E_{trd}$ ) คือ แรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เข้ามาหรือออกจากสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งเป็นกรณีย่อยกรณีหนึ่งของศักย์ไฟฟ้าสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงสภาวะการเกิดช็อคเมื่อเกิดลัดวงจรลงดิน

4.1.5 ช็อคจำกัดของกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์

ขนาดของกระแสที่มีผล หรือเป็นอันตรายต่อร่างกายในระดับต่างๆที่ความถี่ 50-60 Hz ดังนี้

- 1 mA จุดเริ่มต้นว่ามีกระแสไหลผ่าน ค่านี้อาจเพิ่มขึ้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพร่างกาย เพศ และ น้ำหนัก
- 1-6 mA ยังสามารถควบคุมกล้ามเนื้อได้อย่างไม่ทำให้เกิดอันตราย
- 9-25 mA รู้สึกเจ็บปวดเกิดอาการเกร็งจนไม่อาจสลัดมือจากตัวนำได้
- 1000-300 mA หัวใจทำงานล้มเหลวกล้ามเนื้อหัวใจไม่สามารถสูบน้ำเลือดได้

ขนาดกระแสที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์จำเป็นต้องพิจารณาถึงช่วงเวลากระแสไหลผ่านร่างกายด้วย ขนาดของกระแสที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายถึงขั้นหัวใจทำงานผิดปกติในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ คือประมาณ 0.03-3 วินาที โดยมีความน่าจะเป็น (probability) 95% ซึ่งมีค่าความสัมพันธ์กับค่าพลังงานที่ร่างกายได้รับเข้าไป ดังสมการ

$$I_B^2 t_s = S_b \tag{4.1}$$

เมื่อ  $I_B$  = กระแสที่ไหลผ่านร่างกาย (A)

$t_s$  = ช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่าน (sec)

$S_b$  = พลังงานที่สะสมในร่างกายมนุษย์เมื่อได้รับกระแส (Ws)

จากสมการที่ (2.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปกระแสได้ดังนี้

$$I_B = \sqrt{\left(\frac{S_b}{t_s}\right)} \tag{4.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่างกายมนุษย์โดยเฉลี่ยทั่วๆ ไปที่มีน้ำหนักประมาณ 50 ก.ก. จะมีความน่าจะเป็น 99.5% ที่ จะปลอดภัยเมื่อได้รับพลังงานสะสม  $0.015 W_s$  ดังนั้นจากสมการที่ (2.2) จะเขียนใหม่ได้

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{ts}} \quad \text{สำหรับคนที่มีน้ำหนัก 50 ก.ก} \quad (4.3)$$

สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนักประมาณ 70 ก.ก. ซึ่งได้จากการทดลองกับสัตว์ที่มีขนาดหัวใจใกล้เคียงกับมนุษย์ในช่วงเวลาไม่เกิน 3 นาที โดยมีค่าพลังงานสะสม  $0.0246 W_s$  จะได้สมการ

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{ts}} \quad \text{สำหรับคนที่มีน้ำหนัก 70 ก.ก} \quad (4.4)$$

#### 4.1.6 ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (Resistance of the Human Body)

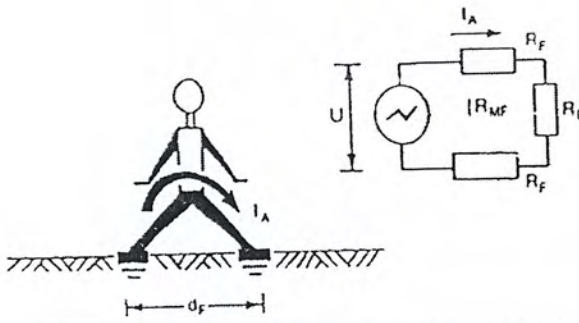
ในสภาวะปกติร่างกายมนุษย์จะมีค่าความต้านทานประมาณ 500-3000 โอห์ม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไป ความต้านทานร่างกายมนุษย์ที่ในการออกแบบระบบต่อลงดินหรือในการวิเคราะห์ ไม่ว่าจะเป็ กระแสสลับหรือกระแสตรงที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ ความต้านทานของร่างกายมนุษย์จะให้ผลเป็น Non-inductive Resistance ซึ่งการวัดความต้านทานระหว่างอวัยวะต่าง ๆ ของร่างกายมนุษย์จะได้ค่าที่ไม่ค่อยจะแน่นอนขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ IEEE Std. 80-2000 ได้กำหนดค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์ จากมือถึงเท้าทั้งคู่และจากมือถือถึงมือ หรือจากเท้าถึงเท้าอีกข้างหนึ่งเท่ากับ 1000 โอห์ม

$$R_B = 1000 \text{ โอห์ม}$$

อันตรายที่จะเกิดต่อมนุษย์เมื่อมีกระแสสลับวงไหลลงระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะไม่ว่าจะเกิดเนื่องจากศักดาไฟฟ้าระหว่างก้าว ศักดาไฟฟ้าสัมผัส ศักดาไฟฟ้า เมฆ หรือศักดาไฟฟ้าทรานสเฟอ์ คือการไหลของกระแสผ่านร่างกายจากเท้า-เท้าลงดิน และการไหลของกระแสผ่านจากมือ-เท้าลงดิน องค์ประกอบที่ต้องพิจารณาเพื่อให้ขนาดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมีขีดจำกัดจนไม่เป็นอันตรายต่อชีวิตก็คือ ความต้านทานของร่างกายและความต้านทานของพื้นดินที่เท้ายืนอยู่ ผลของการโรยหินกรวดบนพื้นสถานีไฟฟ้าย่อย และความลึกของการฝังระบบต่อลงดินที่มีต่อความต้านทานของเท้ากับดิน

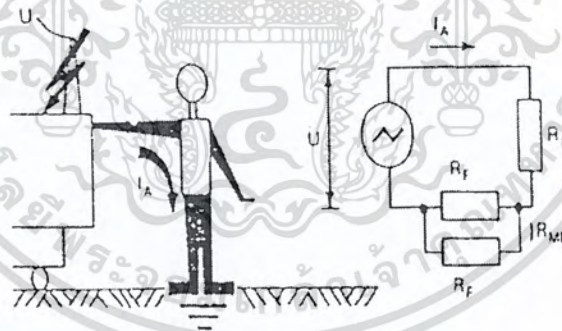
#### 4.2 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ

สภาวะการเกิดอุบัติเหตุหรือการช้อคภายในหรือบริเวณรอบ ๆ สถานีไฟฟ้าย่อยสามารถเขียนเป็นวงจรจำลองได้ 2 อย่าง คือ วงจรแสดงกระแสไหลระหว่างเท้าถึงเท้า และวงจรแสดงกระแสไหลระหว่างมือถึงเท้า



รูปที่ 4.3 แสดงภาพจำลองกระแสไหลระหว่างเท้าถึงเท้าเนื่องจากตกดาไฟฟ้าระหว่างก้าว

- เมื่อ
- $d_f = 1$  เมตร
  - $R_T = R_B + 2R_F - 2R_{MF}$
  - $I_A = \frac{U}{R_T}$
  - $R_B = 1,000$  โอห์ม
  - $I_A =$  The current of accidental circuit
  - $R_T =$  The total resistance of accidental circuit



$$R_A = R_B + \frac{1}{2}(R_F + R_{MF}) \tag{4.5}$$

รูปที่ 4.4 แสดงภาพจำลองกระแสไหลระหว่างมือถึงเท้าเนื่องจากตกดาไฟฟ้าสัมผัส  
ความต้านทานรวมของร่างกาย ของวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุสามารถเขียนได้ดังสมการ

ความต้านทานรวมเนื่องจากกระแสไหลระหว่างเท้า-เท้า

$$R_{TS} = R_B + 2(R_F - 2R_{MF}) \text{ โอห์ม} \tag{4.6}$$

ความต้านทานรวมเนื่องจากกระแสไหลระหว่างมือ-เท้า

$$R_{TP} = R_B + \frac{1}{2}(R_F + 2R_{MF}) \text{ โอห์ม} \tag{4.7}$$

เมื่อ  $R_B =$  ความต้านทานของร่างกาย

$R_F =$  ความต้านทานที่ไหลผ่านเท้าแต่ละข้างกับดินหรือผิวหน้าดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_{MF}$  = ความต้านทานร่วม (Mutual) ระหว่างเท้าทั้งสองข้าง (ปกติมีค่าน้อยมากจึงไม่พิจารณาผลนี้)

$R_T$  จะขึ้นอยู่กับ  $R_B$  และ  $R_F$  (footing resistance) โดยทั่วไปเท้าของมนุษย์จะมีลักษณะคล้ายกับแผ่นจานโลหะตัวนำ (Conducting metallic Disk) และจะมีความต้านทานเหนี่ยวนำระหว่างเท้าทั้งสอง (Mutual Resistance) ดังสมการ

$$R_F = \frac{\rho}{4b} \quad (4.8)$$

$$R_{MF} = \frac{\rho}{2\pi d_f} \quad (4.9)$$

เมื่อ  $\rho$  = ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

$R_F$  = ค่าความต้านทานที่เท้าแต่ละข้างกับดิน

$R_{MF}$  = ค่าความต้านทานเหนี่ยวนำระหว่างเท้าทั้งสอง

$b$  = รัศมีสมมุติของเท้า (เมตร)

$d_f$  = ระยะห่างระหว่างเท้า (เมตร)

ค่าความต้านทานของเท้าทั้งสองข้างเมื่อเป็นแบบอนุกรมและขนานคือ

$$R_{2FS} = 2(R_F + 2R_{MF}) \quad (4.10)$$

$$R_{2FP} = \frac{1}{2}(R_F + 2R_{MF}) \quad (4.11)$$

เมื่อ  $R_{2FS}$  = ความต้านทานได้เท้าทั้งสองเมื่อเป็นแบบอนุกรม

$R_{2FP}$  = ความต้านทานได้เท้าทั้งสองเมื่อเป็นแบบขนาน

จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) ซึ่งอาจจะคิดโดยประมาณว่ารัศมีทางแผ่นโลหะกลมที่สมมุติแทนเท้าของคนเราแต่ละข้างเท่ากับ 0.083 เมตร และไม่คิดค่าความต้านทานร่วม (Mutual resistance) เนื่องจากมีค่าน้อยดังนั้นค่าความต้านทานของพื้นดินได้เท้าทั้งสองข้างในแบบอนุกรมและแบบขนานสามารถเขียนในรูปของสภาพความต้านทานจำเพาะ  $\rho$  ได้ดังสมการ

$$R_{2FS} = 6\rho \quad (2.12)$$

$$R_{2FP} = 1.5\rho \quad (2.13)$$

ดังนั้นจึงทำให้ค่าของ  $R_{TS}$  และ  $R_{TP}$  ได้ดังสมการ

$$R_{TS} = R_B + 2R_F = R_B + 6\rho \quad (4.14)$$

$$R_{TP} = R_B + \frac{1}{2}R_F = R_B + 1.5\rho \quad (4.15)$$

### 4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

ข้อมูลเบื้องต้นจะต้องได้รับก่อนการออกแบบและวิเคราะห์ของระบบกราวด์กริด มีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) Symmetrical Ground Fault Current, The Maximum Symmetrical Ground Fault Current จากกระแส Fault หรือ การวิเคราะห์ short circuit analysis แบบ phase-to-phase-to-ground current ( $3I_0$ ) หรือถ้าไม่ทราบ zero sequence ค่าของ Three phase จะถูกนำมาใช้

2) Fault Duration ช่วงเวลาเกิดกระแสฟอลต์สูงสุดของระบบภายใต้การพิจารณาจากผลรวม Backup fault clearing time พิจารณาจากการตัดเบรกเกอร์บวกกับระยะเวลาสั้นๆ สำหรับ safety margin

3) สายอุปกรณ์ป้องกัน, จำนวนของ outgoing transmission line shield wires และ Underground distribution circuit neutral cables ที่เชื่อมอยู่กับระบบกราวด์กริด

4) Soil Resistivity คือ ลักษณะของดินที่สามารถคำนวณได้จากวิธี Wenner four pin method หรือการคำนวณโดยเทคนิคอื่นๆ

5) ค่าความต้านทานของหินกรวด (Crush Rock)

#### 4.4 การพิจารณาการออกแบบ

##### 4.4.1 Fence Location (ที่ตั้งรั้ว)

รั้วที่อยู่รอบสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นควรจะต้องอยู่ภายในระบบกราวด์ประมาณ 1 เมตร หรือกล่าวได้ว่าระบบกราวด์ควรจะยื่นออกมาจากรั้วด้านละประมาณ 1 เมตรเพื่อป้องกัน Touch Potential จากนอกรั้วถ้ารั้วนั้นทำมาจากวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า ระบบกราวด์ควรจะห่างจากรั้วประมาณ 1.5 เมตร

##### 4.4.2 Crushed Rock Layer หินกรวด

เพราะว่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์นั้นต่ำเกินไปประมาณ 100 โอห์ม ทำให้กระแสไหลผ่านร่างกายได้มาก การลดกระแสนี้ทำได้โดยการเพิ่มความต้านทานระหว่างเท้ากับพื้นดินให้สูงมากขึ้น ในทางปฏิบัติจะโรยหินกรวดหนาประมาณ 0.08 – 0.15 เมตร บนพื้นผิวดินเพื่อลดการระเหยความชื้นภายในดิน และนอกจากนี้จะทำให้ลดจำนวนตัวนำในระบบต่อลงดินให้น้อยลงได้ ความต้านทานจำเพาะของหินกรวดโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1,000-5,000 โอห์ม-เมตร ซึ่งโดยทั่วไปที่ความสูง 0.15 เมตร ความต้านทานจำเพาะของหินกรวดประมาณ 3,000 โอห์ม-เมตร

##### 4.4.3 Fault Current

ขนาดของกระแสผิดปกติที่เป็น zero sequence ที่สถานีไฟฟ้าย่อยหาได้จากการคำนวณการ short circuit ของระบบ

#### 4.4.4 Substation area and Geometry

พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นเป็นสิ่งจำเป็นในการคำนวณหาความต้านทานของระบบกริด ซึ่งในมาตรฐาน IEEE 80 นั้นจะเป็นพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมสำหรับในกรณีที่ไม่มีพื้นที่มาตรฐานก็สามารถโดยประมาณว่าสมมาตร

#### 4.4.5 Ground Rod

โดยทั่วไประบบการต่อลงดินจะประกอบด้วย Ground rod และ Ground Grid มากกว่าที่ประกอบด้วยระบบกราวด์กริดเพียงอย่างเดียว ซึ่ง Ground Rod จะสามารถ Discharge กระแสสู่พื้นโลกโดยที่กระแสที่ไหลผ่านนี้ แท่งตัวนำรีดจะเป็นตัวลด แรงดันสัมผัส และแรงดันช่วงก้าวลงมากกว่าวงจรสมมูลของระบบตัวนำกริดอย่างเดียว โดยการเพิ่มความยาว และปริมาณของกราวด์รีดนั้นเป็นวิธีที่ได้ผลของการปรับระบบการต่อลงดินให้มีค่าความต้านทานลดลง

#### 4.4.6 ตำแหน่งของกราวด์รีด

กราวด์รีดควรจะต้องอยู่ใกล้กับอุปกรณ์ที่สำคัญ เช่น หม้อแปลง, เซอร์คิตเบรกเกอร์, surge arrester และโครงสร้างของบัส ซึ่งกราวด์รีดควรวางอยู่โดยรอบของระบบกราวด์กริด, วางไว้ใกล้ระบบป้องกันฟ้าผ่า, ระบบ CCVTs, และวางไว้ใกล้กับ control switchgear นอกจากนี้กราวด์ Rod ไม่ควรวางใกล้กันมากกว่า 2 เท่า ของความยาว

#### 4.4.7 Grid and Stinger Conductor Sizes

แพ็คเกจอร์ที่จะใช้ในการพิจารณาในการเลือกขนาดของตัวนำกริดและ stinger (ตัวที่ต่อเชื่อมกับอุปกรณ์) ขึ้นอยู่กับชนิดของการเชื่อมต่อ ความทนต่อแรงทางกลของกระแสฟอล์ทที่เกิดขึ้นกับช่วงเวลาในการเกิดฟอล์ท โดยส่วนมากชนิดที่นิยมใช้สำหรับ Grid และ Stinger conductor คือ 4/0 AWG (13.41 mm dia) โดยที่ตัวนำชนิดนี้จะความทนต่อแรงทางกลในการติดตั้งซึ่งมีชนิดอื่นๆดังตารางที่ 1

ตารางที่ 4.1 Typical Conductor Sizes

| Copper Conductor Size (AWG or MCM) | Cross Sectional Area Circular MILS | Diameter |             |
|------------------------------------|------------------------------------|----------|-------------|
|                                    |                                    | Inches   | $10^{-3}$ m |
| 3                                  | 52,620                             | 0.260    | 6.60        |
| 2                                  | 66,360                             | 0.292    | 7.42        |
| 1                                  | 83,690                             | 0.332    | 8.43        |
| 1/0                                | 105,600                            | 0.373    | 9.47        |
| 2/0                                | 133,100                            | 0.419    | 10.64       |
| 3/0                                | 167,800                            | 0.470    | 11.94       |
| 4/0                                | 211,600                            | 0.528    | 13.41       |
| 250                                | 250,000                            | 0.575    | 14.61       |
| 300                                | 300,000                            | 0.630    | 16.00       |
| 350                                | 350,000                            | 0.681    | 17.30       |
| 400                                | 400,000                            | 0.728    | 18.49       |
| 450                                | 450,000                            | 0.772    | 19.61       |
| 500                                | 500,000                            | 0.813    | 20.65       |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดระยะห่างของกริดเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการออกแบบระบบบกราวนในการลดแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส แต่อย่างไรก็ตามระยะที่ใกล้กันมากนั้นจะส่งผลในเรื่องของราคาโดยตรง ดังนั้น จึงต้องมีการใช้  $S_f$  (correct split factor) และความต้านทานดิน ซึ่งจะเป็นตัวรับรองในการเลือกใช้ระยะของกริดตัวนำ ซึ่งผู้ออกแบบนั้นไม่ควรลดระยะกริดให้น้อยกว่า 2.5 เมตร เว้นแต่จะมีเทคนิคอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากมาตรฐาน IEEE 80 ได้กำหนด

#### 4.5 ขั้นตอนในการออกแบบระบบการต่อลงดินตามมาตรฐาน IEEE 80

ผู้ออกแบบควรจะต้องเตรียม Layout ของระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยก่อนเป็นอันดับแรก โดยการใช้ Foundation plan drawing เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระยะกริดกับอุปกรณ์ที่พิจารณา ซึ่งโดยลำดับควรจะเริ่มจากกริด Component (ตัวนำกริดและขนาดของตัวนำร้อย)

4.5.1 ขั้นตอนในการออกแบบระบบการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยตามมาตรฐาน IEEE 80 เป็นดังรูปที่ นี้



รูปที่ 4.5 แสดงขั้นตอนการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยตามมาตรฐาน IEEE 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอนที่ 1 สํารวจข้อมูลพื้นที่ ( Field Data ) (A, $\rho$ )

เป็นขั้นตอนแรกที่เราต้องรู้ข้อมูลเกี่ยวกับงานออกแบบระบบสายดินซึ่งประกอบไปด้วย

- ขนาดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย (A)

- ขนาดของ Fault ของกระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าที่หาได้จาก Short Circuit Current แบบ Three Phase Fault ( $3I_0$ ) โดยมีการพยากรณ์ว่าจะสามารถครอบคลุมในอนาคตด้วย แต่การออกแบบสถานีไฟฟ้าอุตสาหกรรม ข้อมูล ดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยการไฟฟ้าเพราะเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่และมีข้อมูลดังกล่าว

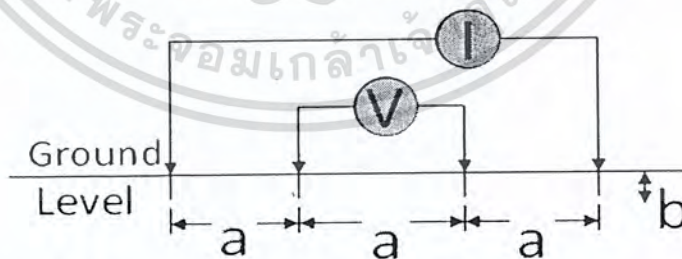
- ค่าระยะเวลาสูงสุดที่สามารถปลดกระแสลัดวงจร (Duration of Fault current : Clearing Time ( $t_c$ )) โดยทั่วไปจะกำหนดระหว่าง 0.25-1.0 sec

- ความต้านทานของผิวดิน  $\rho_s$  การใช้หินโรยหน้าจะเป็นการเพิ่มค่าความต้านทานของผิวดินซึ่งจะเป็นการลดกระแสไหลผ่านร่างกายได้ หินโรยจะใช้ค่าความต้านทาน ประมาณ 1,000-5,000 โอห์ม-เมตร

- ค่าความต้านทานของดินทางไฟฟ้า ( $\rho$ ) ซึ่งจะเป็นการตรวจวัดจากพื้นที่ที่ใช้ก่อสร้างจริง ด้วยวิธี 4-Point Method (Soil Resistivity Test)

การวัดความต้านทานของดิน (Soil Resistivity Test)

โดยกำหนดจุด (P1) ที่จะวัดให้ครอบคลุมพื้นที่สถานีไฟฟ้าในกรณีสถานีไฟฟ้าอุตสาหกรรมสามารถวัดที่จุดกลางสถานีเพียงจุดเดียวได้ แต่วัดออกไปเป็นหลายทิศทาง วิธีการวัดค่าความต้านทานแบบ 4-Point Method นี้เป็นวิธีที่ให้ค่าความแม่นยำมากที่สุดในทางปฏิบัติของการวัดค่าความต้านทานเฉลี่ยอิเล็กโตรด 4 แท่งจะถูกฝังในดินความลึก b และห่างกัน a กระแสทดสอบ I จะใส่ไปที่อิเล็กโตรดคู่บนและวัดค่าแรงดันที่อิเล็กโตรดคู่ใน ดังนั้นนำค่า V มาหารด้วย I จะได้ R แสดงตามรูปที่ 6 ดังนี้



รูปที่ 4.6 แสดงวิธีการต่อวงจรวัดความต้านทานของดิน

จากรูปที่ 4.6 ค่าที่วัดได้จะเป็นค่าความต้าน ( $R$ ) แต่ถ้าเรานำค่าต่างๆที่วัดได้มาคำนวณแล้วจะเห็นว่ามีความยุ่งยากในการคำนวณ ค่าระยะความยาว (a) และระยะความลึก (b) ของอิเล็กโตรด ที่หลากหลาย อาจจะทำให้มีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้สูงในทางปฏิบัติ จึงได้มีการ Simplify สูตร ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (4.16)$$

เมื่อกำหนดให้ระยะ  $b \leq a/20$

สมมุติว่าค่า  $b$  มีค่าน้อยมาก กำหนดให้เป็น 0

ดังนั้นจะได้สมการ  $\rho = 2\pi aR$  (4.17)

### ขั้นตอนที่ 2 หาขนาดของตัวนำ (Conductor size)

$$A_{mm^2} = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (4.18)$$

เมื่อ  $A$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ใช้ทำกริด ( $mm^2$ )

$I$  = กระแสลัดวงจรลงดิน (KA, r.m.s)

$T_m$  = อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย (องศาเซลเซียส)

$T_a$  = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (องศาเซลเซียส)

$T_r$  = อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับค่าคงที่ของระบบ (องศาเซลเซียส)

$\alpha_r$  = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ  $T_r$

$\alpha_0$  = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ  $^{\circ}C$

$\rho_r$  = ความต้านทานจำเพาะของความต้านทานที่อุณหภูมิ  $T_r$

TCAP = แฟกเตอร์ความจุทางความร้อน  $J/cm^3/^{\circ}C$

$t_c$  = เวลาที่กระแสไหลของกระแสลัดวงจร sec

ขั้นตอนที่ 3: หา touch voltage และ step voltage ที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 50 kg

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5 \times C_s \times \rho_s) \quad (4.19)$$

$$E_{step50} = \frac{0.116}{\sqrt{I_s}} (1000 + 6.0 \times C_s \times \rho_s) \quad (4.20)$$

$$C_s = 1 - a \left[ \frac{\rho_s}{2h_s + a} \right] \quad (4.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|       |               |   |  |
|-------|---------------|---|--|
| เมื่อ | $E_{touch50}$ | = | แรงดันสัมผัสที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์น้ำหนัก 50 kg   |
|       | $E_{step50}$  | = | แรงดันช่วงก้าวที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์น้ำหนัก 50 kg |
|       | $C_s$         | = | Reduction Factor   |
|       | $t_s$         | = | ระยะเวลาที่ clear fault                                    |

#### ขั้นตอนที่ 4: Initial Design (กำหนดค่าเริ่มต้น D,n,L,h )

การออกแบบการวางระบบกราวด์และการฝังระบบกราวด์หรือตซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากต่อความปลอดภัยและการประหยัดงบประมาณการลงทุนเราจึงควรกำหนดการวางระบบที่มีความเหมาะสมในเบื้องต้นเราจึงกำหนดเท่าที่จำเป็นและตรวจสอบในขั้นตอนต่อไป

กำหนดค่าเริ่มต้น

ความเหมาะสมในการออกแบบค่าเริ่มต้นตามมาตรฐาน

1.  $N < 25$
2.  $0.25 < h < 2.5$
3.  $D > 2.5$
4.  $d < 0.25h$
5. กว้าง : ยาวของ  $> 1:2.5$ 
  - ระยะห่างตัวนำที่ขนานกัน (D)
  - ความยาวรวมตัวนำ ( $L_c$ )
  - ความยาวของ Ground Rod ( $L_r$ )
  - จำนวนของ Ground Rod ( $N_r$ )
  - จำนวนตัวนำของแกน (X,Y)

#### ขั้นตอนที่ 5: กำหนดค่า Grid Resistance ( Rg )

ในการหาค่าความต้านทานระบบสายดิน (Rg) จะมีการกำหนดค่าความต้านทานดินโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะกำหนดในเงื่อนไขการออกแบบระบบสายดินสถานีไฟฟ้าแรงสูงไว้ที่ค่าไม่เกิน 1 โอห์ม ดังนั้นในขั้นตอนการหาค่า (Rg) จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความต้านทานดิน ซึ่งหากว่าค่าความต้านทานดินมีค่าสูงมาก ค่าความต้านทานระบบสายดินก็จะมีค่าสูงมากด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (4.22)$$

### ขั้นตอนที่ 6: คำนวณค่า Grid Current

ในการหาค่า Max.Grid Current ;  $I_g$  เราควรนำค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ Load Flow Diagram ที่หาค่าของขนาด Fault ที่มีกระแสสูงสุดที่จะเกิดภายในสถานีไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นการคำนวณได้จาก Short Circuit Current แบบ Three Phase Fault (3lo) โดยมีการพยากรณ์ว่าจะสามารถครอบคลุมในอนาคตได้ด้วย แต่การออกแบบสถานีไฟฟ้าอุตสาหกรรม ข้อมูลดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยการไฟฟ้าเพราะเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่และมีข้อมูลดังกล่าว หรือคำนวณจาก

$$I_G = I_f S_f 1000 \quad (4.23)$$

เมื่อ

$$I_G = \text{กระแสกริด}$$

$$I_f = \text{กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น (Ampere)}$$

$S_f = \text{ส.ป.ส การแผ่กระจายของกระแส} = (\text{total impedance})/(\text{grid resistance})$

### ขั้นตอนที่ 7: ตรวจสอบค่า GPR (Ground Potential Rise)

$$GPR = I_G * R_g \quad (4.24)$$

ถ้า  $GPR > E_{touch}$  ไปยัง Step ที่ 8

ถ้า  $GPR < E_{touch}$  ไปยัง Step ที่ 12

เมื่อ  $GPR = \text{Grid potential rise}$

$I_G = \text{Maximum grid current}$

$R_g = \text{ความต้านทานของระบบกราวด์ } (\Omega)$

### ขั้นตอนที่ 8: คำนวณหาค่า Mesh and Step Voltage

$$E_m = \frac{\rho \times K_m \times K_i \times I_G}{L_m} \quad (4.25)$$

$$E_s = \frac{\rho \times K_s \times K_i \times I_G}{L_s} \quad (4.26)$$

เมื่อ  $E_m = \text{Mesh voltage}$

$E_s = \text{Step voltage}$

$\rho = \text{ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน}$

$K_m = \text{Mesh voltage factor}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_s$  = Step voltage factor

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \quad (4.27)$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)_n^2} \quad (4.28)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (4.29)$$

$$n = n_a \times n_b \quad (4.30)$$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_p}; n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (4.31)$$

$$L_S = 0.75L_C + 0.85L_R \quad (4.32)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (4.33)$$

$$K_i = 0.656 + 0.172n \quad (4.34)$$

$$L_m = L_C + [1.55 + 1.22(\frac{L}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}})]L_r \quad (4.35)$$

### ขั้นตอนที่ 9: ตรวจสอบค่า Mesh Voltage ( $E_m$ )

ถ้า  $E_m > E_{touch50}$  ไปยัง Step ที่ 11

ถ้า  $E_m < E_{touch50}$  ไปยัง Step ที่ 10

### ขั้นตอนที่ 10: ตรวจสอบค่า Step Voltage ( $E_s$ )

ถ้า  $E_s > E_{step50}$  ไปยัง Step ที่ 11

ถ้า  $E_s < E_{step50}$  ไปยัง Step ที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนที่ 11: ตรวจสอบค่า Mesh Voltage ( $E_m$ ) และ Step Voltage ( $E_s$ )

ถ้า  $E_m > E_{touch50}$  มายัง Step ที่ 11

ถ้า  $E_s > E_{step50}$  มายัง Step ที่ 11

จะเห็นว่าขั้นตอนที่ 11 นั้น เป็นขั้นตอนที่จะต้องมีการออกแบบค่า  $D, n, L_c, L_T$  ใหม่อีกครั้ง เพื่อให้ระบบมีความปลอดภัย

### ขั้นตอนที่ 12: Detail Design



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### อุปกรณ์ในระบบสถานีไฟฟ้าย่อย

สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูงแบบใช้อากาศ (Air Insulated Substation: AIS) จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ เช่น อุปกรณ์ตัดตอนระบบ อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์แปลงแรงดัน ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องศึกษาและทำความเข้าใจอุปกรณ์ในแต่ละชนิด เพื่อจะได้เลือกใช้ได้อย่างเหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยรายละเอียดของอุปกรณ์หลักต่างๆ มีดังนี้

#### 5.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง (Power Circuit Breaker)

ในระบบไฟฟ้าแรงดันสูง การปลดวงจรไฟฟ้าออกจากระบบในขณะที่มีกระแสจำนวนมากไหลอยู่ จะมีเปลวอาร์คเกิดขึ้นระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสอง ความรุนแรงของอาร์คจะขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลในวงจร ถ้าใช้สวิตช์ธรรมดาปลดวงจรแล้วความร้อนที่เกิดจากอาร์คจะทำให้ขาสวิตช์ หรือหน้าสัมผัสไหม้เสียหายอีกทั้งอาจเป็นอันตรายแก่บุคคลที่ปลุกสวิตช์นั้นได้ ฉะนั้น ถ้าต้องการปลดวงจรในลักษณะเช่นนี้ต้องเลือกอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่เรียกว่า เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง (Power Circuit Breaker) มาใช้แทน ทั้งนี้เพราะเซอร์กิตเบรกเกอร์มีชิ้นส่วนประกอบขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อทำการดับอาร์คไปในเวลาสั้นที่สุด นอกจากการใช้เบรกเกอร์เพื่อปลดหรือสับในสภาพระบบไฟฟ้าปกติแล้ว ประโยชน์อันสำคัญยิ่งก็คือการทริปเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยกระแสฟอลต์จะมีค่าสูงเป็นหลายเท่าตัวของกระแสใช้งานปกติ อาร์คจะยิ่งรุนแรงมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันการที่เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงจะทริปได้นั้นจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์อื่นประกอบให้เบรกเกอร์ทำงานอย่างอัตโนมัติ อีกทั้งฟอลต์เมื่อผ่านพ้นไปแล้ว เบรกเกอร์จะถูกสั่งให้สับซ้ำ (Reclose) เข้าไปใหม่เช่นกันเพื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อไปเช่นเดิม สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงนั้นเป็นเบรกเกอร์ที่กำหนดระดับแรงดันตั้งแต่ 1000 V ขึ้นไป

การใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงเพื่อป้องกันระบบไฟฟ้าจะสำเร็จได้นั้น ต้องอาศัยอุปกรณ์ต่างๆ ประกอบและร่วมประสานงานกัน 4 อย่างคือ อุปกรณ์ตรวจจับ รีเลย์ป้องกัน กลไกการทำงาน และอินเตอร์ลักเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) อุปกรณ์ตรวจจับ ได้แก่หม้อแปลงกระแส ซึ่งทำหน้าที่คล้ายยามระวังเหตุ เมื่อมีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้นในระบบ แล้วส่งสัญญาณบอกเหตุมายังรีเลย์ป้องกัน

2) รีเลย์ป้องกันเป็นอุปกรณ์รับสัญญาณมาจากอุปกรณ์ตรวจจับ พร้อมกับส่งการไปยังกลไกการทำงาน เพื่อให้ทริปเบรกเกอร์ หรือสั่งเบรกเกอร์สับซ้ำ ตามแต่ชนิดของรีเลย์นั้นๆ เช่น รีเลย์กระแสเกิน รีเลย์ชนิดสับซ้ำ หรือรีเลย์อื่นๆ

3) ชุดกลไกทำงาน เป็นกลไกกำกับการทำงานของเบรกเกอร์ได้แก่ชุดลวดสั่งทริป (Tripping coil) และชุดลวดสั่งสับ (Closing coil) ชุดกลไกทำงานจะส่งแรงไปปลดหรือสับหน้าสัมผัสของเบรกเกอร์ตามคำสั่งของรีเลย์

4) ตัวตัดกระแส (Interrupter) ชิ้นส่วนนี้ได้แก่หน้าสัมผัสของเบรกเกอร์ จะถูกสั่งให้แยกจากกัน ทำให้เกิดอาร์ค และทำหน้าที่ควบคุมการดับอาร์ค (Arc extinguisher)

เมื่อไรก็ตามถ้าระบบไฟฟ้าเกิดผิดปกติ เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะถูกสั่งให้ทริปด้วยรีเลย์ ในขณะที่เดียวกันเซอร์กิตเบรกเกอร์อาจสั่งให้สับต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบไม่อัตโนมัติ (Manual operated) หรือสั่งเซอร์กิตเบรกเกอร์สับต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบอัตโนมัติด้วยรีเลย์สับซ้ำอัตโนมัติ (Auto recloser relay)

อุปกรณ์ร่วมประสานการทำงานกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ มีรูปแบบการทำงานคล้ายๆกับการปฏิบัติงานของหน่วยดับเพลิง กล่าวคือ เมื่อยามระวังเหตุบนหอคอย (เปรียบเหมือนอุปกรณ์ตรวจจับ) เห็นเพลิงไหม้ขึ้นที่ใด ก็แจ่งเหตุลงมายังผู้บังคับการ (เปรียบเหมือนรีเลย์) ผู้บังคับการก็จะสั่งรถดับเพลิง (เปรียบเหมือนชุดกลไกการทำงาน) ออกไปยังที่เกิดเหตุ เมื่อถึงที่เกิดเหตุแล้ว เจ้าหน้าที่ดับเพลิง (เปรียบเหมือนอินเตอร์รัพเตอร์) ก็จะเข้าไปตัดต้นเหตุไฟไหม้ (เปรียบเหมือนแยกหน้าสัมผัส) พร้อมกับฉีดน้ำเมื่อดับไฟ (เปรียบเหมือนการดับอาร์ค) ให้ดับโดยเร็วที่สุด

### ตัวตัดกระแส (Interrupter)

กระแสขณะอินเตอร์รัพท์ (Interrupting Current) หรือกระแสขณะตัดวงจร ในเมื่อที่ระบบไฟฟ้าเกิดสภาวะไหลเกินหรือลัดวงจร รีเลย์จะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทริป ในขณะที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังแยกออกจากกัน จะทำให้เกิดเปลวอาร์คกระโดดข้ามช่องว่างระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสองข้าง ความรุนแรงของอาร์คจะขึ้นอยู่กับกับกระแสฟลัดมากน้อยเพียงใด ในขณะที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์เริ่มแยกออกจากกัน ความต้านทาน

หน้าสัมผัสทั้งสองจะเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ( $I^2 R$ ) อุณหภูมิเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สูงขึ้นเป็นผลทำให้อิเล็กตรอนอิสระและไอออนถูกดึงหลุดออกจากหน้าสัมผัสทั้งสอง ทำให้เกิดไอออนไนซ์เซชันระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสอง กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านหน้าสัมผัสต่อไปได้ และจะเกิดประกายไฟระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสองเรียกว่าอาร์ค โดยอาร์คที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยไอออน อิเล็กตรอน และส่วนผสมของก๊าซ ทำให้มีความร้อนสูงประมาณ  $5000-8000\text{ }^{\circ}\text{K}$  เรียกว่า พลาสมา และจะมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ทำให้อาร์คยิ่งเดินได้สะดวก และเพิ่มความรุนแรงมากขึ้น เซอร์กิตเบรกเกอร์จึงต้องได้รับการออกแบบให้สามารถดับอาร์คได้รวดเร็วภายในเวลาไม่เกิน 8 ไซเคิลหรือ 0.16 วินาทีหลังจากการลัดวงจร แต่ถ้าเซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถดับอาร์คได้ในเวลาที่กำหนด การระเบิดเสียหายจะเกิดขึ้นทันที ฉะนั้นเซอร์กิตเบรกเกอร์จะต้องมีอุปกรณ์ตัวหนึ่งเรียกว่า อินเตอร์รัพเตอร์ (Interrupter) หรือตัวตัดการไหลของกระแสซึ่งมีหน้าที่คือ เมื่อหน้าสัมผัสแยกทั้งสองข้างออกจากกันก็จะขัดจังหวะการไหลของกระแส ซึ่งหมายถึงทำให้เปลวอาร์คนั้นดับลงนั่นเอง

การดับอาร์ค มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน และแตกต่างกันเล็กน้อยระหว่างกระแสตรงและกระแสสลับ การดับอาร์คไฟฟ้ากระแสสลับนั้นง่ายกว่ากระแสตรง เพราะกระแสสลับจะผ่านศูนย์สองครั้งในหนึ่งไซเคิล ส่วนกระแสตรงนั้นจะคงที่ตลอดเวลา คือไม่มีกระแสไหลลงสู่ศูนย์ ฉะนั้นการดับอาร์คสำหรับกระแสตรงนั้น จึงต้องพยายามลดกระแสให้ลดต่ำลงที่สุด โดยการเพิ่มความต้านทานไฟฟ้าให้สูงขึ้น โดยการทำให้อาร์คมีระยะความยาวมากขึ้น สำหรับการตัดกระแสอาร์คของไฟฟ้ากระแสสลับนั้น คือต้องป้องกันไม่ให้กระแสไหลได้อีกในขณะที่ผ่านศูนย์ไป และต้องทำให้อัตราการคืนสภาพของความคงทนของไดอิเล็กตริก (Dielectric strength) นั้นสูงกว่าแรงดันฟื้นตัวของระบบ (System recovery voltage) การดับอาร์คจึงจะสำเร็จได้ แต่ถ้ากระแสลดลงผ่านศูนย์แล้วอาร์คยังดับไม่สำเร็จ ก็จะทำให้แรงดันของอาร์คสูงขึ้นทันทีเรียกว่า แรงดันกลับคืน (Restriking voltage) อาร์คก็จะเกิดขึ้นซ้ำอีก ซึ่งปรากฏการณ์นี้ไม่มีผลดีต่อการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังนั้นจึงต้องพยายามจำกัดแรงดันฟื้นตัวต่างๆเอาไว้ การต่อลงดินของระบบสายส่ง การติดตั้งล่อฟ้า เพื่อให้ระดับแรงดันวาบไฟตามผิวต่ำกว่าระดับฉนวน (Insulation level) ของเบรกเกอร์ ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่จะจำกัดค่าแรงดันฟื้นตัวได้

## การแบ่งชนิดของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงตามพิกัดแรงดันไฟฟ้า

1) เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูงปานกลาง (Medium voltage circuit breaker) คือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้กับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับตั้งแต่ 1.5 - 34.5kV

2) เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง (High voltage circuit breaker) คือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้กับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับตั้งแต่ 34.5kV ขึ้นไป

อนึ่งเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้กับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับตั้งแต่ 1.5 kV ขึ้นไปคือเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูงปานกลางและเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง จะเรียกรวมๆว่า เพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง (High voltage power circuit breaker)

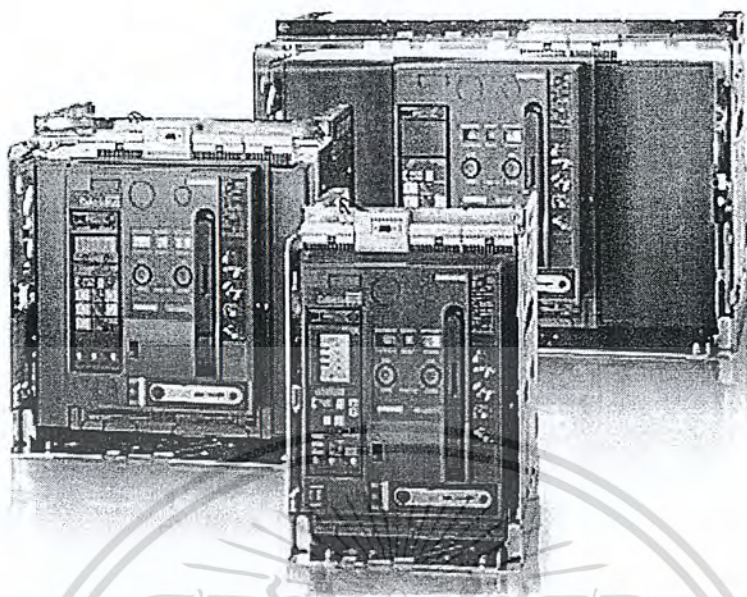
## ประเภทของเพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง

### 5.1.1 Air break circuit breaker

ตัวตัดกระแส(Interrupter) ใช้อากาศดับอาร์ค โดยหลักการทำงานคือเมื่อเกิดอาร์คขึ้นในขณะทำหน้าที่สัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แยกออกจากกัน อากาศรอบๆอาร์คที่มีวามร้อนจะลอยตัวขึ้นด้านบนจากนั้นอากาศเย็นรอบๆก็จะเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่และดับอาร์คไปในตัว ซึ่งความยาวของอาร์คนั้นขึ้นอยู่กับค่าแรงดันระหว่างหน้าสัมผัสในขณะที่เราทำการตัดกระแส

เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้อากาศเป็นตัวตัดกระแส(Interrupter) ควรเป็นแบบเปิด (Open type) เนื่องจากหากเกิดอาร์คแล้วอากาศร้อนจะได้สามารถลอยตัวขึ้นได้อย่างอิสระ แต่ถ้าหากเลือกใช้แบบในกล่องหุ้ม (Enclose type) การดับอาร์คจะไม่ได้ผล จะต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์บางอย่างเพิ่มเติมเช่น แผ่นแยกอาร์ค (Arc barrier) รางดับอาร์ค (Arc chute) และขั้วทางเดินอาร์ค (Arc runner) สำหรับวิธีการดับอาร์คด้วยอากาศธรรมชาตินั้นเหมาะกับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันและกระแสไม่สูงมากนัก ถ้าระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันและกระแสสูงๆ ขนาดของอาร์คก็จะใหญ่และรุนแรงมากขึ้น ซึ่งการดับก็จะยากมากขึ้น จึงต้องมีติดตั้งขดลวดเป่าดับอาร์ค (Blow-out coil) โดยขดลวดนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กตามแนวกระแส ซึ่งจะช่วยผลักล้าอาร์คขนาดใหญ่ให้แยกออกไปจากหน้าสัมผัส โดยพุ่งไปยังแผ่นอาร์คทางด้านบนแทน แผ่นแยกอาร์คก็จะแยกอาร์คออกเป็นลำเล็กๆ จนทำให้อาร์คดับในที่สุด เรียกเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบนี้ว่า Air magnetic circuit breaker ซึ่งมีพิกัดแรงดันใช้งานตั้งแต่ 12.4, 4.6 7.2, และ13.8kV และพิกัดกระแสใช้งานต่อเนื่อง 1200-3000A ในการติดตั้ง Air break circuit breaker จะติดตั้งอยู่ในตู้สวิตช์เกียร์ (Switch Gear) โดยการเลือกใช้พิจารณาตาม IEC Std ดังแสดงในภาคผนวก ก.ตาราง 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 Air break circuit breaker พิกัดกระแส 630 – 6,300 A ของบริษัท SIEMEN

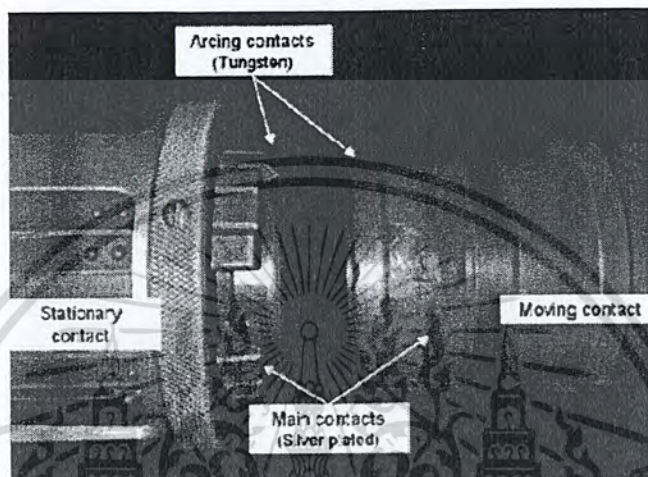
#### 5.1.2 Air blast circuit breaker

เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้จะใช้การอัดอากาศเข้าไปเพื่อดับอาร์ค หลักการทำงานคือในขณะที่เบรกเกอร์ทริป กลไกของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะเปิดลิ้นลมผ่านหน้าสัมผัสทั้งสอง และจะทำการเป่าอาร์คไปยังรางดับอาร์คแผ่นแยกอาร์ค ซึ่งอาร์คจะถูกทำให้เย็นและดับลงอย่างรวดเร็ว แล้วลมอัดนั้นก็จะถูกพ่นออกไปสู่ภายนอกบรรยากาศ แต่วิธีการนี้ซึ่งเป็นวิธีแบบเก่าจะมีข้อเสียก็คือ ลมอัดแรงสูงที่ปล่อยเข้าไปทันทีอย่างรวดเร็วนี้ ย่อมก่อให้เกิดแรงทางกลแก่ฉนวนและชิ้นส่วนภายใน ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ นอกจากนั้นการสั่นสะเทือนที่หน้าสัมผัสจะไปรบกวนความสามารถในขณะที่ทำการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งในปัจจุบันนี้เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้จะใช้ระบบอัดความดันที่อยู่ในอินเตอร์ลิปเตอร์อย่างถาวร

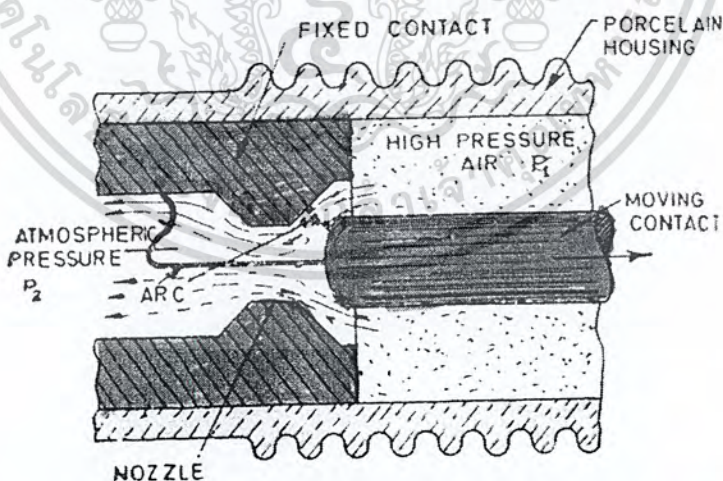
โครงสร้างของ Air blast circuit breaker อาจเป็นชนิดที่มีตัวอินเตอร์ลิปเตอร์หลายชุดบนเสาฉนวนเดี่ยว ซึ่งการจัดอินเตอร์ลิปเตอร์อาจมี 2, 4, 6 หรืออื่นๆ แต่โดยทั่วไปที่พบเห็นมักจะมี 2 อินเตอร์ลิปเตอร์บนเสาฉนวนเดี่ยวตัว "T" ส่วนการจัดแบบ 4 อินเตอร์ลิปเตอร์จะจัดเป็น 2 ชุดปลายต่อชนกันบนเสาฉนวนรองรับ "Y" หรืออาจจัดวางอินเตอร์ลิปเตอร์รูปแบบอื่นๆ โดยพิกัดแรงดันใช้งานของ Air blast circuit breaker ใช้กับขนาดแรงดันตั้งแต่ 121 – 362kV โดยการเลือกใช้พิจารณาตาม ANSI Std ดังแสดงในภาคผนวก ก.ตาราง 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของ Air blast circuit breaker คือไม่มีอันตรายจากการระเบิดหรือไฟไหม้จึงสามารถติดตั้งได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร มีน้ำหนักเบา การทำงานมีความรวดเร็วจึงเหมาะจะใช้กับการสับจ่ายอย่างรวดเร็ว และสามารถอินเตอร์รัพต์แรงดันที่สูงมากๆ ได้โดยการต่ออนุกรมตัวอินเตอร์รัพต์เตอร์ ส่วนข้อเสียของ Air blast circuit breaker คือ ความยุ่งยากในการบำรุงรักษาเครื่องอัดอากาศที่มีความยุ่งยาก ทำงานเสียงดัง และมีราคาแพงกว่า Oil circuit breaker

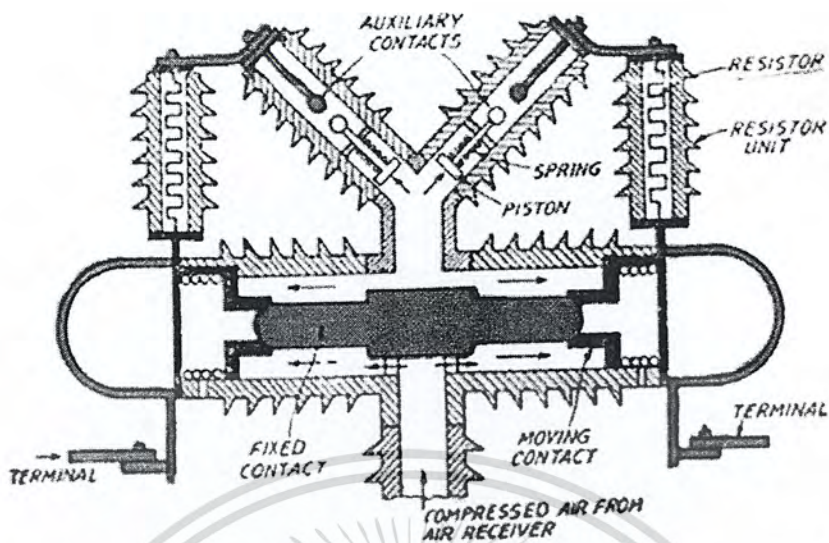


รูปที่ 5.2 หน้าสัมผัสอาร์ค (Arcing contact) ของ Air blast circuit breaker (ที่มา: [http://www.electricenergyonline.com/?page=show\\_article&mag=43&article=324](http://www.electricenergyonline.com/?page=show_article&mag=43&article=324))

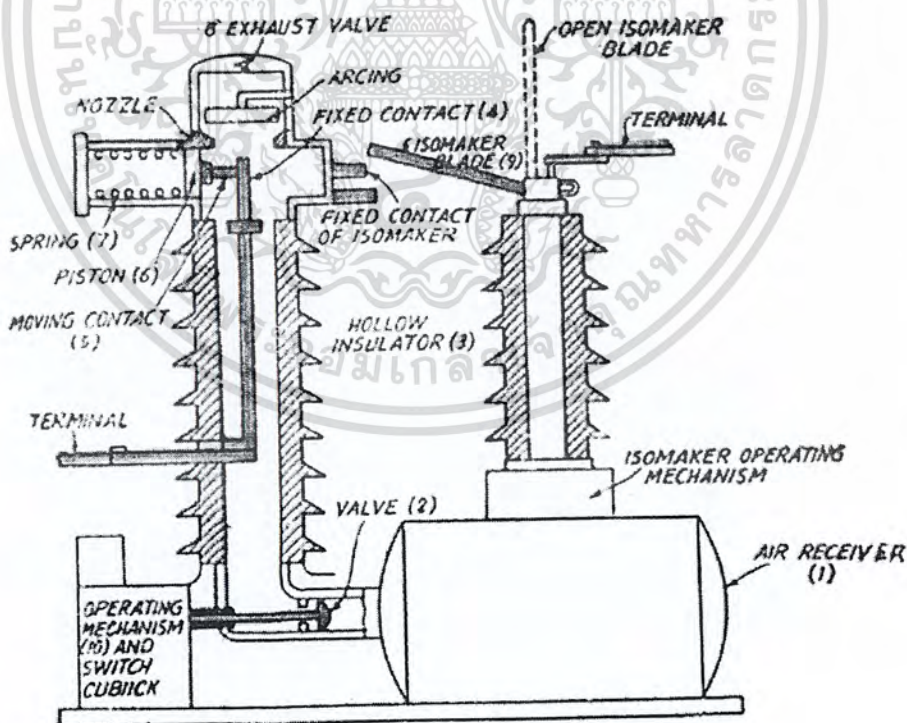


รูปที่ 5.3 กลไกการดับอาร์คของ Air blast Circuit breaker จากคำสั่งทริป ในขณะที่หน้าสัมผัสเคลื่อนที่กำลังจะเคลื่อนไปทางขวาเพื่อเปิดวงจรจะทำให้เกิดอาร์คขึ้น โดยอากาศอัดแรงดันสูงจะถูกอัดเข้ามาเพื่อดับอาร์คนั้น (ที่มา: [www.emtindia.net/equipment\\_tips/electrical\\_system/airblastcircuitbreaker.htm](http://www.emtindia.net/equipment_tips/electrical_system/airblastcircuitbreaker.htm))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

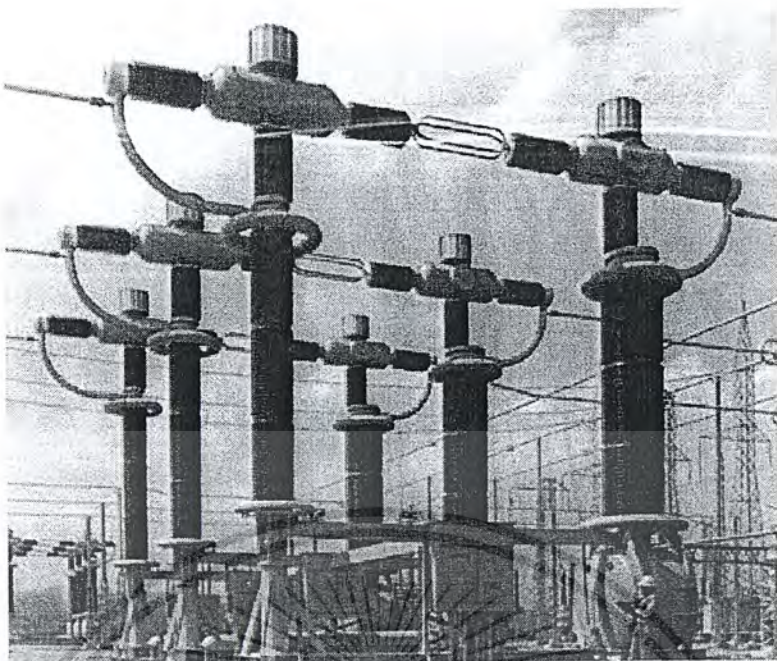


รูปที่ 5.4 แสดงโครงสร้างของ Air blast Circuit breaker รูปแบบ Interrupter ตัว T (ที่มา:www.emtindia.net/equipment\_tips/electrical\_system/airblastcircuitbreaker.htm)



รูปที่ 5.5 แสดงโครงสร้างของ Air blast Circuit breaker (ที่มา:www.emtindia.net/equipment\_tips/electrical\_system/airblastcircuitbreaker.htm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 Air blast Circuit breaker พิกัดแรงดัน 500kV  
(ที่มา:<http://accessscience.com/search.aspx?topic=EN G:ELEC:ECALENG&term=Circuit+breaker>)

### 5.1.3 Oil circuit breaker

เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้ดับอาร์คด้วยน้ำมัน โดยตัวอินเตอรัพเตอร์จะถูกจุ่มอยู่ในถังบรรจุน้ำมัน หลักการทำงานคือเมื่อน้ำสัมผัสเริ่มแยกออกจากกันและเกิดเปลวอาร์คขึ้น อาร์คจะเผาไหม้ในบริเวณรอบๆอาร์ค ทำให้น้ำมันระเหย แยกตัวเป็นคาร์บอนและก๊าซไฮโดรเจน ปริมาณหนึ่งที่มีความดันสูง ซึ่งพยายามจะกดพลังของอาร์คไว้ พร้อมๆกันนั้นก็ทำการลดจำนวนไอออน (Deionize) ในเส้นทางเดินของล่ออาร์ค และอาร์คจะอ่อนตัวลง เมื่อปลายน้ำสัมผัสเลื่อนมาจนถึงปากทางด้านในของห้องดับอาร์ค ก๊าซไฮโดรเจนในห้องดับอาร์คจะขยายตัวอย่างรวดเร็วจนทำให้น้ำมันมีความดันสูงขึ้น และเป็นการลดจำนวนไอออนลง ซึ่งทำให้อาร์คอ่อนกำลังลง และก็จะดับลงในขณะที่ปลายน้ำสัมผัสเลื่อนลงมาอยู่ในปากทางข้างนอกของห้องดับอาร์ค

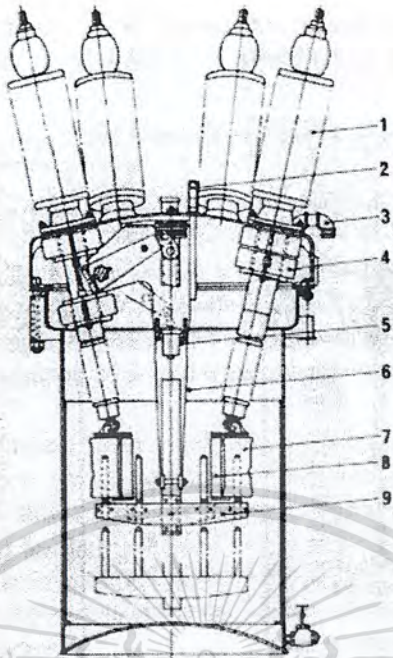
การกำหนดค่าพิกัดเวลาอินเตอรัพเตอร์ของ Oil circuit breaker อย่างต่ำสุดจะกำหนดไว้ที่ 25% ของกระแสอินเตอรัพเตอร์สูงสุดเป็นหลัก เนื่องจากยิ่งอาร์ครุนแรงมากเท่าไรก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นก็จะยิ่งมากเท่านั้น ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนในน้ำมันนี้เองจะเป็นตัวลดความเป็นฉนวนของน้ำมันลง กล่าวคือยิ่งกระแสอินเตอรัพเตอร์สูงเท่าไรก็ยิ่งเป็นการทำลายความเป็นฉนวนของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันมากขึ้นเท่านั้น โดยพิกัดแรงดันใช้งานของ Oil circuit breaker สามารถใช้กับแรงดันที่สูงถึง 420kV ได้

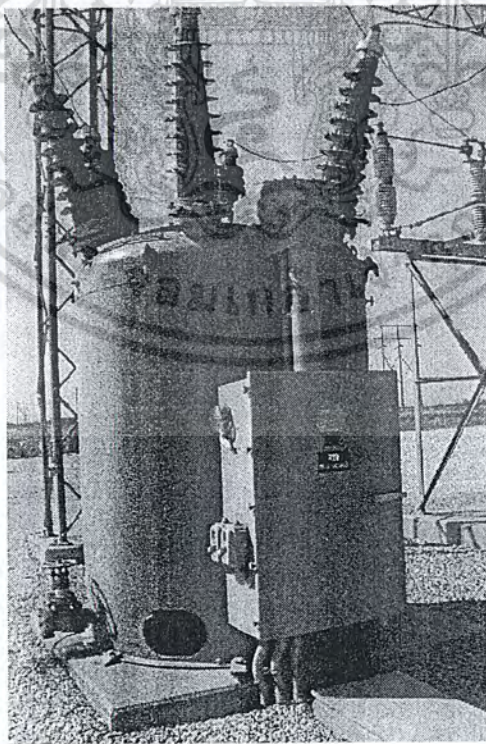
ข้อดีของ Oil circuit breaker คือ ไม่ต้องมีระบบระบายอากาศ และน้ำมันมีฉนวนที่ดีกว่าอากาศ ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในการดับอาร์ค ส่วนข้อเสียคือต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันใหม่เมื่อมีความเป็นฉนวนต่ำลงหรือสกปรก เซอร์กิตเบรกเกอร์มีน้ำหนักมาก และน้ำมันยังเป็นอันตรายต่อการเกิดอัคคีภัย โดยทั่วไป Oil circuit breaker จะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ Bulk oil circuit breaker และ Minimum oil circuit breaker

#### 5.1.3.1 Bulk oil circuit breaker

เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ น้ำมันมาก โดยตัวอินเตอร์รัพต์เตอร์จะถูกจุ่มอยู่ภายในถังเหล็กที่บรรจุไปด้วยน้ำมัน ซึ่งแบบนี้มีชื่อเรียกว่า แบบตัวถังไม่มีไฟ (Dead tank) จะมีขนาดแรงดันไม่เกิน 36kV หรืออาจสร้างให้สูงได้ถึง 132kV และมีพิกัดกำลังไฟฟ้าในขณะอินเตอร์รัพต์ 1000MVA โดยทั้งสามเฟสจะใช้ถังน้ำมันเหล็กขนาดใหญ่ใบเดียวกันซึ่งเรียกว่า เบรกเกอร์ถังเดี่ยว (Single tank) แต่ถ้าหากใช้กับแรงดันและกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ที่สูงกว่านี้ มักจะใช้แบบ 1 เฟสต่อ 1 ถัง นอกจากนี้ Bulk oil circuit breaker ยังมีแบบ ตัวถังมีไฟ (Live tank) ซึ่งจะแตกต่างจากแบบตัวถังไม่มีไฟ เพราะตัวถังแบบไม่มีไฟจะไม่มีกระแสไหลผ่านเนื่องจากมีน้ำมันเป็นฉนวนกัน



รูปที่ 5.7 โครงสร้างของ Dead tank Bulk-oil Circuit breaker ซึ่งประกอบด้วย  
 1.Bushing 2.Oil level indicator 3.vent 4.Current transformer 5.dashpot  
 7.arc control unit 8.parallel contact 9.resistor 10.plunger bar 11.impulse  
 cushion (ที่มา: [http://xnet.rrc.mb.ca/janaj/oil\\_breakers.htm](http://xnet.rrc.mb.ca/janaj/oil_breakers.htm))



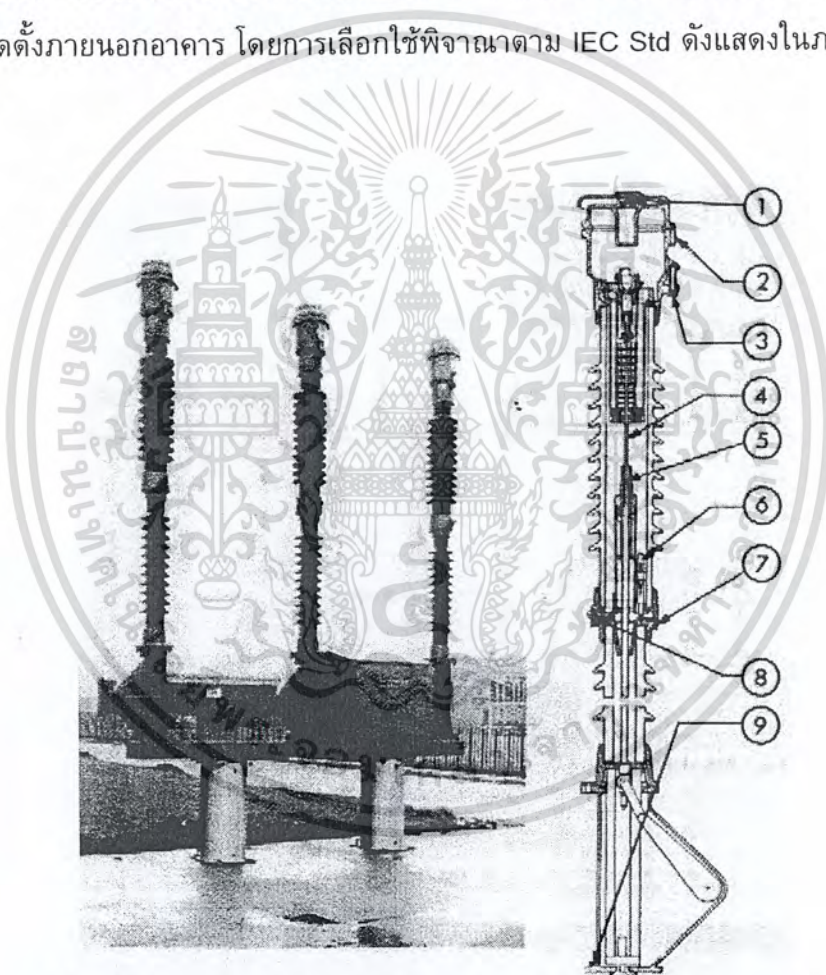
รูปที่ 5.8 Dead tank Bulk-oil Circuit breaker

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีทีอี จำกัด (มหาชน) ซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้งาน  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3.2 Minimum oil circuit breaker

เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ใช้น้ำมันน้อย และตัวถังมีไฟ (Live tank) โดยจะใช้น้ำมัน 1 ใน 10 เท่าของแบบ Bulk oil circuit breaker สำหรับการดับอาร์คนั้นจะอาศัยการพ่นน้ำมัน จาก ลูกสูบที่ทำงานด้วยสปริงที่อัดน้ำมันให้ฉีดออกมาอย่างรุนแรง เพื่อทำการตัดกระแสอาร์คอย่าง ฉับพลัน ฉะนั้นค่ากระแสขณะอินเตอร์รัพต์ไม่ว่าจะมากหรือน้อย ก็สามารถตัดกระแสอาร์คใน เวลาสั้นๆได้ โดยพิกัดแรงใช้งานสำหรับ Minimum oil circuit breaker ตามมาตรฐาน IEC อยู่ใน ช่วงระดับแรงดันตั้งแต่ 60 – 150kV มีพิกัดกระแสอินเตอร์รัพต์เตอร์ 2500 – 5000MVA โดย ขนาดแรงดัน 6 – 36kV จะเป็นแบบติดตั้งภายในอาคาร ส่วนชนิดแรงดันตั้งแต่ 34.5 kV ขึ้นไปจะ เป็นแบบติดตั้งภายนอกอาคาร โดยการเลือกใช้พิจารณาตาม IEC Std ดังแสดงในภาคผนวก ก.

ตาราง 14



รูปที่ 5.9 โครงสร้างของ Minimum Oil Circuit breaker ซึ่งประกอบด้วย 1.Vent valve 2.Terminal pad 3.Oil level indicator 4.Moving contact 5.Lower fixed contact 6.Separating piston 7.Terminal pad 8.Upper drain valve 9.Lower drain valve (ที่มา: [http://xnet.rrc.mb.ca/janaj/oil\\_breakers.htm](http://xnet.rrc.mb.ca/janaj/oil_breakers.htm))

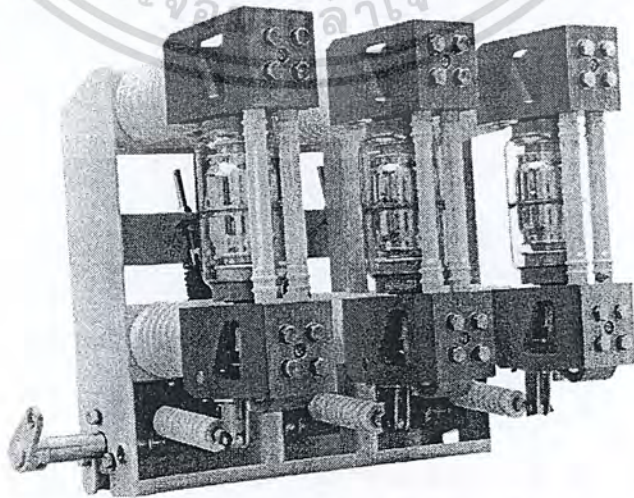
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.4 Vacuum circuit breaker

เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้เมื่อหน้าสัมผัสแยกออกจากกัน จะเกิดอาร์คระหว่างหน้าสัมผัส ทั้ง 2 ข้าง โดยอาร์คนั้นจะประกอบไปด้วยไอออน อิเล็กตรอนและพลาสมาซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ก๊าซมีอุณหภูมิสูงถึง  $10 - 15000^0 K$  และยังเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีอีกด้วยจึงต้องทำการดับอาร์คให้ได้ในเวลาที่กำหนด ซึ่งการดับอาร์คมีวิธีทำได้ดังนี้

- 1) ลดอุณหภูมิของพลาสมาลงอย่างรวดเร็ว ต้องทำให้ลดลงที่อัตราเร็ว 1 พันล้านองศา เคลวินในเวลา 1 วินาที
- 2) ลดความดัน คือ ในขณะที่ความดันต่ำ ความคงทนของไดอิเล็กตริกจะมีค่าสูง โมเลกุลของอากาศเหลือน้อยจึงทำให้อาร์คเกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นยิ่งความดันต่ำมาก ๆ การเกิดเบรกดาว์น ของตัวกลางที่หน้าสัมผัสก็จะเกิดได้ยากขึ้น ด้วยเหตุนี้ความดันของลำพลาสมาจะถูกลดให้ต่ำลง จนกระทั่งอิเล็กตรอนอิสระและไอออนที่เหลืออยู่ระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสองจะไม่เป็นสื่อไฟฟ้า

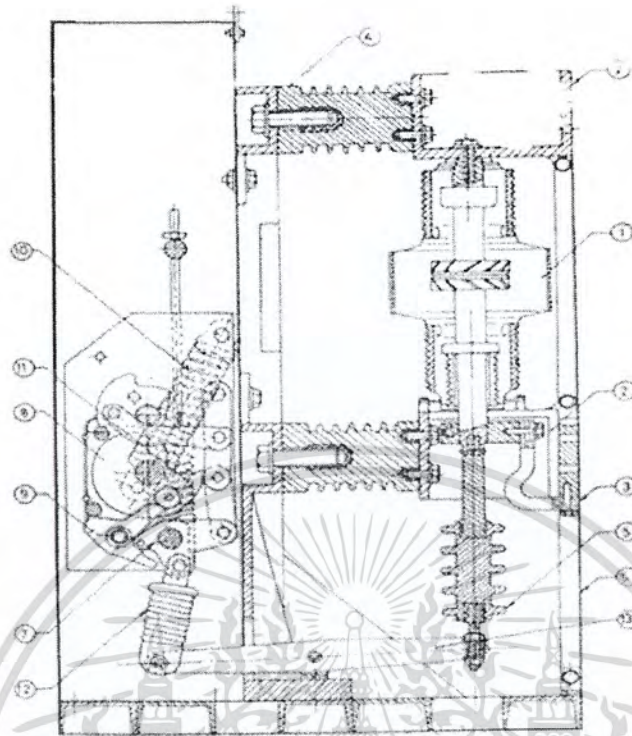
ข้อดีของ Vacuum circuit breaker คือ ค่าความคงทนของไดอิเล็กตริกของสุญญากาศสูงกว่าตัวกลางดับอาร์คอื่น ๆ โครงสร้างเล็กกะทัดรัด มีน้ำหนักเบา ระยะห่างระหว่างหน้าสัมผัสสามารถปรับให้แคบกว่าปกติได้ จึงทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้สามารถสับหรือปลดวงจรได้อย่างรวดเร็วกว่าอินเตอร์รัพเตอร์แบบอื่น ๆ และตัวอินเตอร์รัพเตอร์ไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษา เพราะหน้าสัมผัสบรรจุอยู่ในห้องสุญญากาศที่ปิดอย่างแน่นหนา จึงไม่มีสิ่งสกปรกเข้าไปได้ ส่วนข้อเสียนั้นคือ ต้องใช้โลหะชนิดพิเศษสำหรับนำมาทำเป็นหน้าสัมผัส และไม่สามารถสร้างให้มีแรงดันสูง ๆ ได้ โดยการเลือกใช้พิจารณาตาม IEC Std ดังแสดงในภาคผนวก ก. ตาราง 15



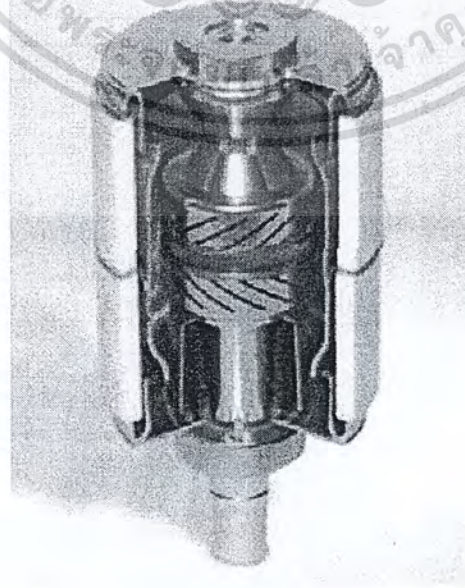
รูปที่ 5.10 Indoor Vacuum Circuit Breaker สำหรับพิกัดแรงดัน 12-40.5kV (ที่มา:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดย บริษัท อีทีอี จำกัด การคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย กรุณาแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

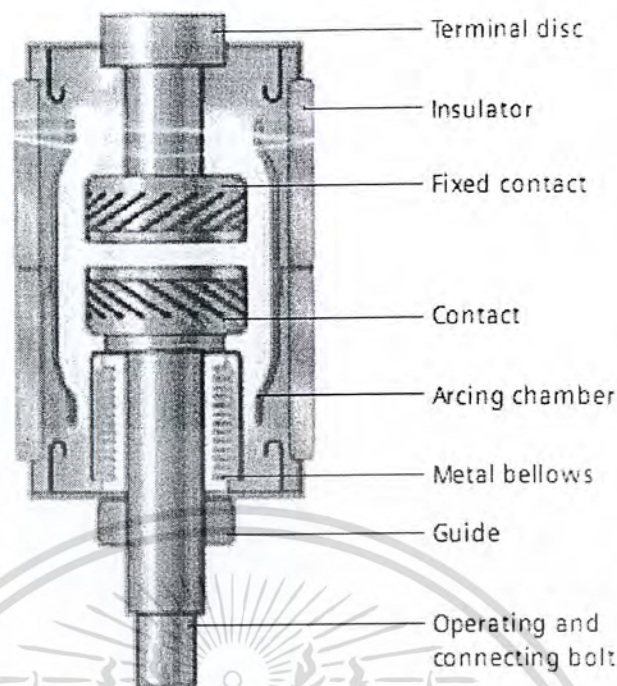
[http://www.productcategory.com/p/zn28\\_12\\_series\\_vacuum\\_circuit\\_breaker/9.html](http://www.productcategory.com/p/zn28_12_series_vacuum_circuit_breaker/9.html))



รูปที่ 5.11 แสดงโครงสร้างของ Vacuum Circuit breaker ซึ่งประกอบไปด้วย 1.Vacuum Interrupter 2.Terminal 3.Flexible connection 4.Support insulators 5.Operating rod 6.Tie bar 7.Common operating shifts 8.operating cam 9.Locking cam 10.Making spring 11.Breaking spring 12.Loading spring 13.Main link



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 5.12 Interrupter ของ Vacuum circuit breaker ของบริษัท SIEMEN  
 เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของบริษัทที่สงวนไว้เพื่อใช้เฉพาะในกรณีศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้  
 ใ้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางบริษัท หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 แสดงโครงสร้าง Interrupter ของ Vacuum circuit breaker ของบริษัท SIEMEN

### 5.1.5 Gas $SF_6$ circuit breaker

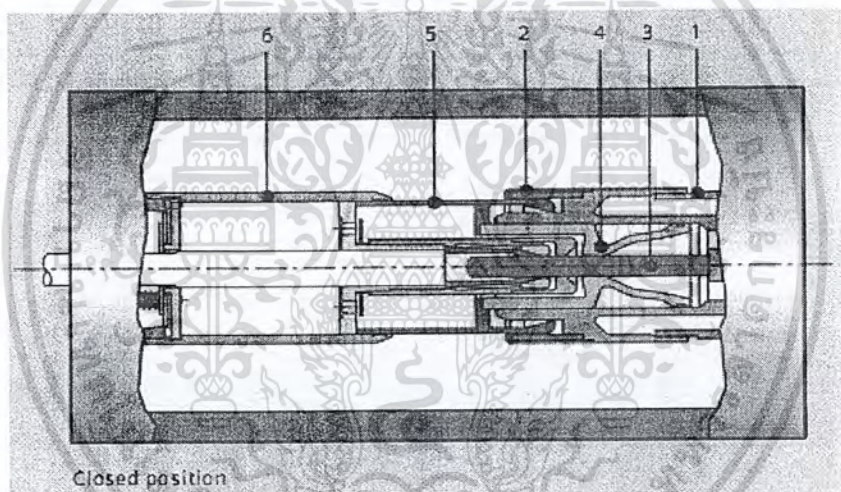
ก๊าซ  $SF_6$  เป็นก๊าซที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟและไม่ช่วยให้ไฟติด อีกทั้งแม้อยู่ในสภาวะที่ความร้อนสูงถึง  $500^{\circ}C$  ก็ยังสามารถคงสภาพเดิม โดยก๊าซ  $SF_6$  มีความหนาแน่นประมาณ 5 เท่าของอากาศ ซึ่งถือว่าเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักมาก จึงทำให้ค่าความคงทนของไดอิเล็กตริกของ  $SF_6$  สูงกว่าอากาศ ไนโตรเจนและ คาร์บอนไดออกไซด์ คุณสมบัติของก๊าซ  $SF_6$  จะแตกตัวที่อุณหภูมิ  $2000^{\circ}K$  มีสภาพการนำไฟฟ้าและสภาพนำความร้อนที่ดี จึงทำให้แรงดันคร่อมอาร์คต่ำ จึงทำให้พลังงานที่จะกลายเป็นความร้อนนั้นต่ำลง ถ้าอาร์คที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงๆ จะแตกเป็นลำเล็กๆ ล้อมรอบด้วยก๊าซอุณหภูมิต่ำๆ โดยปริมาณความร้อนที่มีจะถูกระบายออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้อาร์คกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนได้รวดเร็วภายหลังจากกระแสลดลงผ่านศูนย์ และอาร์คที่เกิดขึ้นก็ไม่สามารถเปลี่ยนสภาพของ  $SF_6$  ได้ ซึ่งจากคุณสมบัตินี้ทำให้ก๊าซ  $SF_6$  สามารถใช้งานได้นานและใช้งานภายใต้สภาวะที่กระแสลัดวงจรที่สูงๆ ได้ โดยที่ใช้ก๊าซ  $SF_6$  ในปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น สำหรับพิกัดแรงดันใช้งานของ Gas  $SF_6$  circuit breaker สามารถใช้กับแรงดันได้สูงถึง 800 kV โดยการเลือกใช้พิกัดตาม IEC Std ดังแสดงภาคผนวก ก.ตาราง 16 โดยทั่วไป Gas  $SF_6$  circuit breaker จะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ Single pressure และ

#### Two pressure

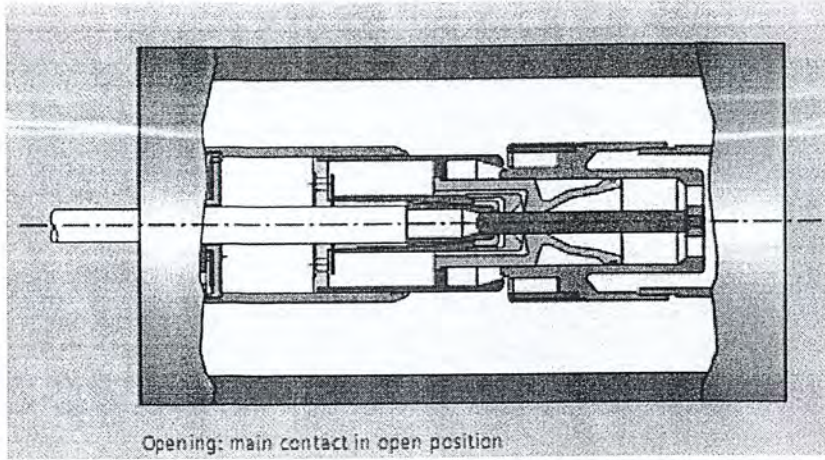
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5.1 Single pressure หรือเรียกว่ากระบอกสูบแบบเป่า (Puffer cylinder) หลักการทำงานคือ หากทำการจำกัดกระแสในภาวะทำงานปกติในสภาวะการทำงานปกติ Main contact (2) จะเปิดออกก่อน และกระแสจะเปลี่ยนทิศทางไปยัง หน้าสัมผัสที่ยังปิดอยู่ ระหว่างกำลังเปิด Arcing contact (3) และขณะที่ arc ถูกดึงอยู่ระหว่างหน้าสัมผัส ที่เวลาเดียวกัน หน้าสัมผัสทรงกระบอก (5) ย้ายไปยังฐาน (6) และอัดก๊าซ  $SF_6$  เข้าไปในนั้น โดยการอัดก๊าซนี้จะทำให้ก๊าซไหลวนจะทั่วทั้งหน้าสัมผัสทรงกระบอก (5) และหัวฉีด (4) เพื่อดับ arc ที่ arcing contact

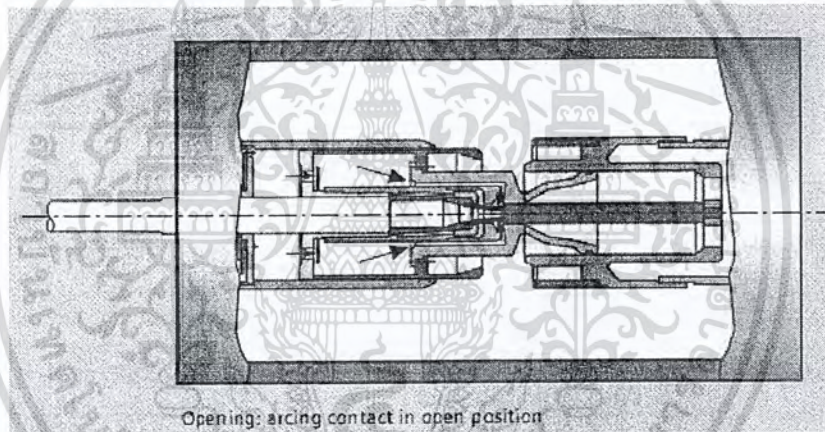
การจำกัดกระแสในภาวะเกิดความผิดปกติในการจำกัดกระแสสูงๆ ก๊าซ  $SF_6$  จะถูกทำให้ร้อนขึ้นอย่างมากที่ arcing contact เนื่องจากพลังงานที่มาจาก arc ซึ่งนำไปสู่การอัดก๊าซที่ต้องเพิ่มแรงอัดมากขึ้นในหน้าสัมผัสทรงกระบอก โดยในระหว่างการเปิดออกนี้จะถูกเพิ่มแรงดันมากขึ้นในการดับ arc ซึ่งในกรณีนี้พลังงานจาก arc จะถูกใช้ในการจำกัดกระแส fault



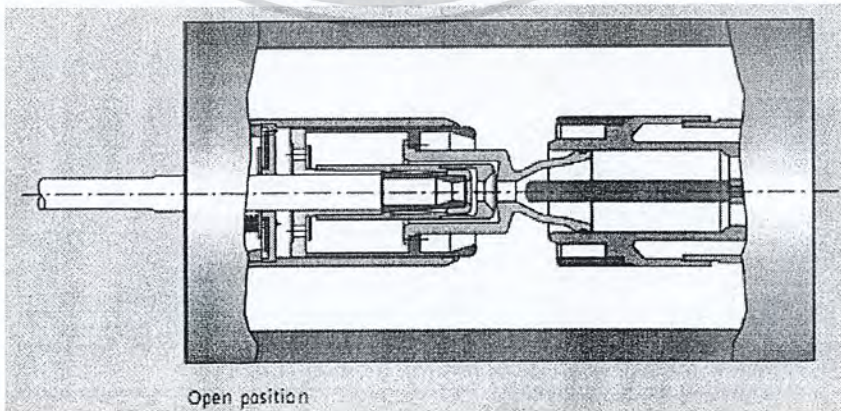
รูปที่ 5.14 แสดงโครงสร้างของ Gas  $SF_6$  circuit breaker แบบ Single pressure ประกอบด้วย 1.Interrupter Unit, 2.Post insulator 3.Pillar, 4. Control cabinet, 5.Operating mechanism cubicle, 6. Grading capacitor, 7.Closing Resistor (Optional) (ที่มา: บริษัท SIEMEN)



รูปที่ 15.15 หน้าสัมผัสกำลังจะแยกออกจากกัน เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้รับสัญญาณทริป

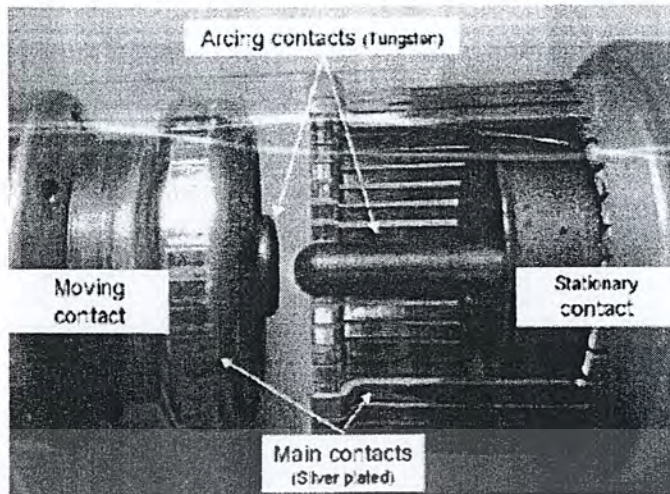


รูปที่ 5.16 กระบอกสูบแบบเป่าเคลื่อนที่ไปทางซ้าย ก๊าซ SF<sub>6</sub> จะถูกอัดเข้าไปในกระบอกสูบ

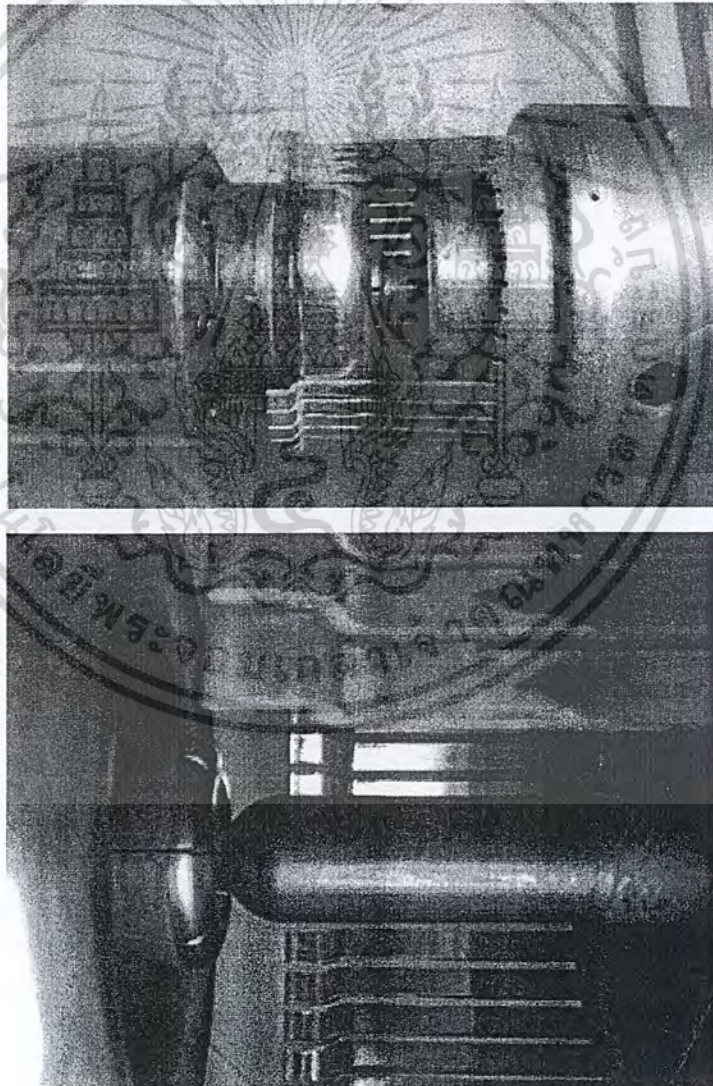


รูปที่ 5.17 ก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ถูกอัดจะถูกปล่อยออกทางขวามือผ่านหัวฉีดฉนวน

และอาร์คที่เกิดขึ้น ระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสองจะถูกดับโดยก๊าซ SF<sub>6</sub> ประโยชน์ด้านการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่พิมพ์ขึ้นใหม่เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้พิมพ์หรือเจ้าของลิขสิทธิ์ได้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

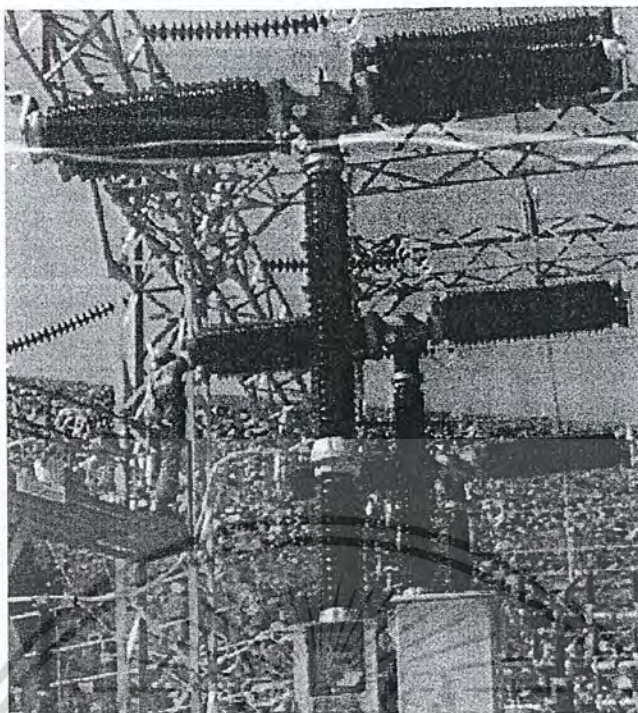


รูปที่ 5.18 แสดงโครงสร้างของหน้าสัมผัส Gas  $SF_6$  Circuit Breaker



รูปที่ 5.19 แสดงกลไกการทำงานของหน้าสัมผัส Gas  $SF_6$  Circuit Breaker

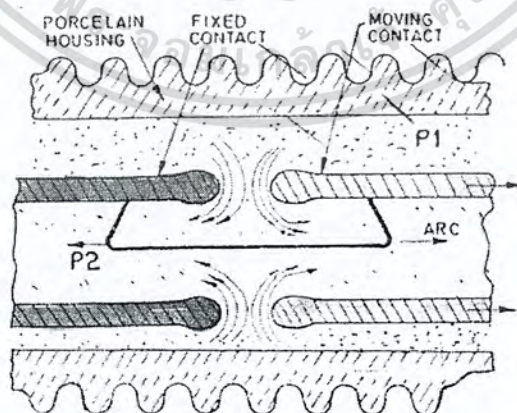
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 Gas  $SF_6$  Circuit Breaker รุ่น HPL ขนาดพิกัดแรงดัน 72.5 800kV ของบริษัท ABB

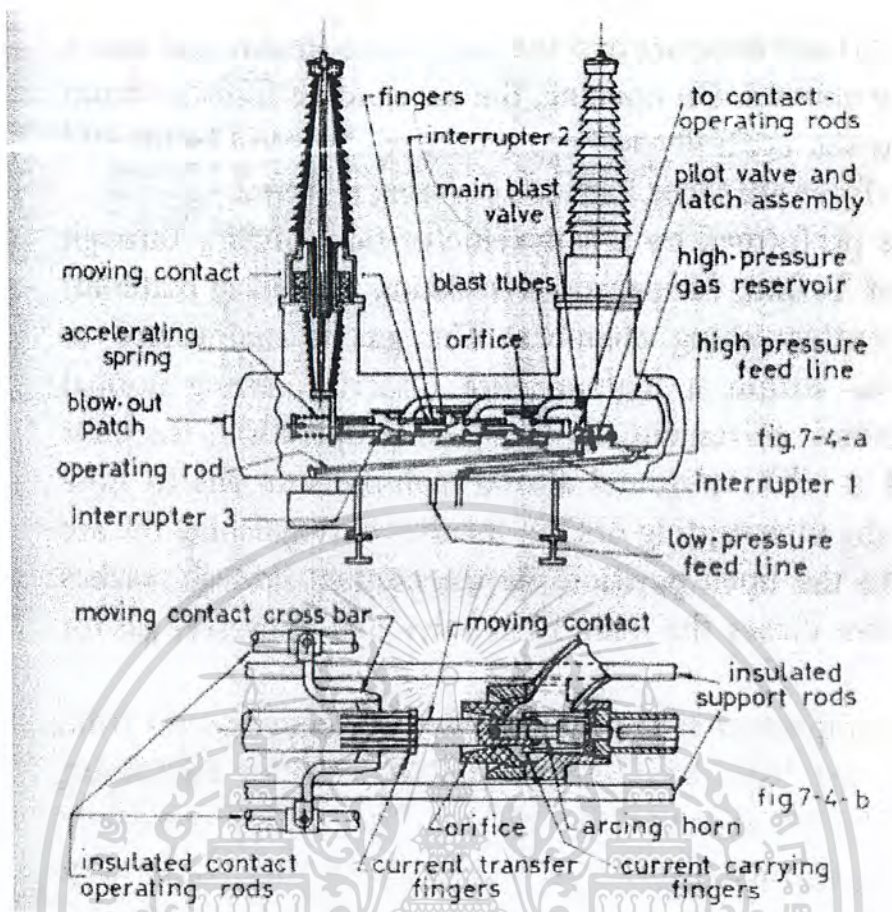
#### 5.1.5.2 Two pressure

หรือแบบความดันคู่ (Double pressure) มีหลักการทำงานคล้ายกับ Air blast circuit breaker เพียงแต่เปลี่ยนจากการใช้อากาศเป็นก๊าซ  $SF_6$  ในภาวะดับอาร์คแทน ทั้งนี้การใช้ก๊าซ  $SF_6$  ในการดับอาร์คจะมาจากถังความดันสูง จึงต้องทำการอุ่นก๊าซ  $SF_6$  ไว้เสมอเพื่อไม่ให้กลายเป็นของเหลว

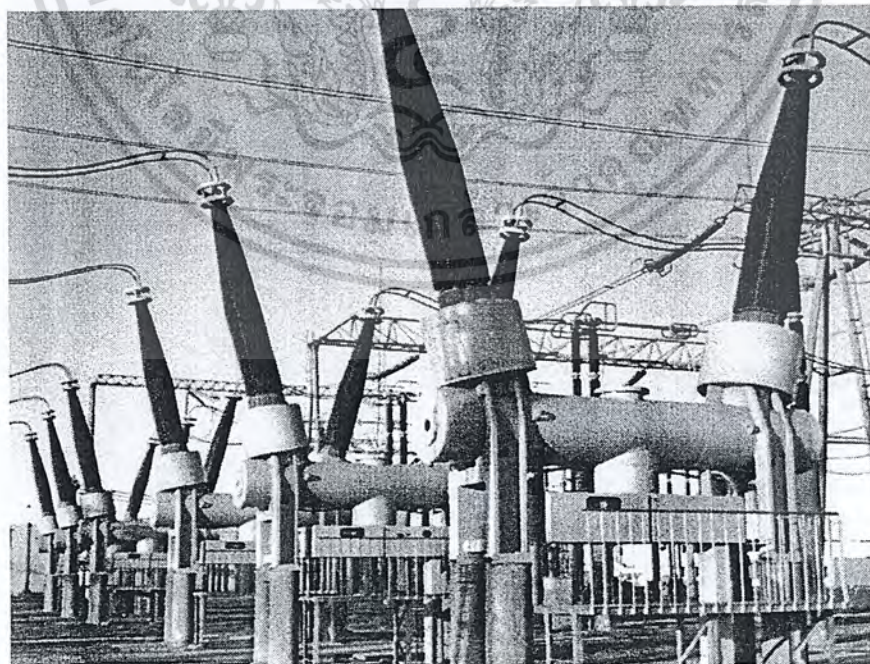


รูปที่ 5.21 การทำงานของ Interrupter ของ Gas  $SF_6$  circuit breaker ชนิด Two pressure (ที่มา: <http://emadrlc.blogspot.com/2007/11/mechanism-of-sf6-circuit-breaker.html>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 แสดงโครงสร้างของ Gas  $SF_6$  circuit breaker ชนิด Two pressure  
(ที่มา: [http://xnet.rrc.mb.ca/janaj/sf6\\_breakers.htm](http://xnet.rrc.mb.ca/janaj/sf6_breakers.htm))



รูปที่ 5.23 Gas  $SF_6$  circuit breaker ชนิด Two pressure

(ที่มา: [http://www.syxzl.com/pro\\_cont.asp?id=2672](http://www.syxzl.com/pro_cont.asp?id=2672))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของ Gas  $SF_6$  circuit breaker คือมีความสามารถในการอินเตอร์รัพต์สูง มีความปลอดภัยสูง เนื่องจาก  $SF_6$  ไม่เป็นพิษและไม่ติดไฟ จากคุณสมบัติของก๊าซ  $SF_6$  ที่เป็นก๊าซเฉื่อย จึงไม่ทำปฏิกิริยาเคมีใดๆ และแรงดันไฟฟ้าคร่อมอาร์คต่ำ ทำให้สภาพของอาร์คกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนได้เร็ว ส่วนข้อเสียนั้นคือ ต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซรั่ว ต้องมีอุปกรณ์ป้องกันการรั่วซึม เนื่องจากถ้าหากความดันของก๊าซลดลงจะทำให้ความเป็นฉนวนลดลงไปด้วย และถ้าก๊าซ  $SF_6$  เกิดความชื้น จะทำให้เกิดกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งเป็นสาเหตุให้ผิวโลหะเกิดการกัดกร่อนได้

## 5.2 รีเลย์ป้องกัน (Protective Relay)

### 5.2.1 รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay)

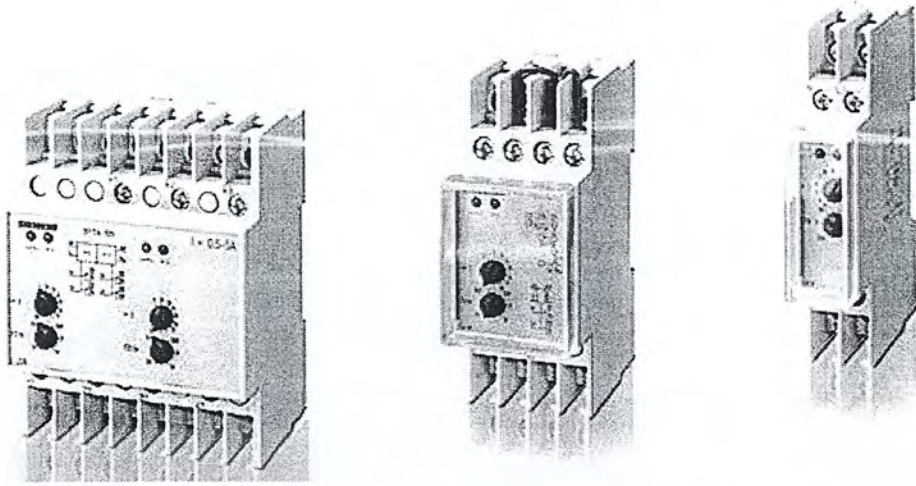
ทำงานเมื่อเกิดกระแสเกินค่าที่กำหนด ซึ่งจะทำให้การติดตั้งไว้กับอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน โดยสามารถแบ่งชนิดตามลักษณะการทำงานได้ดังนี้

5.2.1.1 รีเลย์กระแสเกินชนิดทำงานทันที (Instantaneous Overcurrent Relay) จะทำงานเมื่อกระแสที่เข้ารีเลย์เท่ากับศูนย์หรือสูงกว่ากระแสเริ่มทำงาน (pickup current)

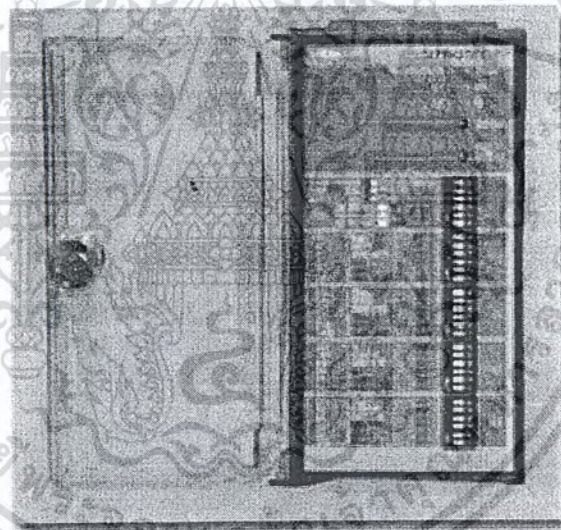
5.2.1.2 รีเลย์กระแสเกินแบบเวลาตายตัว (Definite time Overcurrent Relay) จะทำงานในช่วงเวลาที่ค่าหนึ่ง เมื่อกระแสที่เข้ารีเลย์เท่ากับหรือสูงกว่ากระแสเริ่มทำงาน และถึงแม้ว่าจะมีค่ากระแสเกินมากกว่าค่ากระแสเริ่มทำงานก็ตาม รีเลย์ก็ยังคงทำงานอยู่ในช่วงเวลาที่กำหนด

5.2.1.3 รีเลย์กระแสเกินแบบเวลาผกผัน (Inverse time Overcurrent relay) หลักการทำงานคือยิ่งกระแสที่เข้ามาสูงมากเพียงใดรีเลย์ก็จะทำงานไวเท่านั้น

5.2.1.4 รีเลย์กระแสเกินแบบเวลาผกผันตายตัวต่ำสุด (Inverse definite minimum time Overcurrent relay) เป็นรีเลย์ที่มีลักษณะการทำงานระหว่างเวลากับกระแสเป็นแบบผสมระหว่างเวลาผกผันกับเวลาตายตัว



รูปที่ 5.24 Over current Relay ของบริษัท SIEMEN

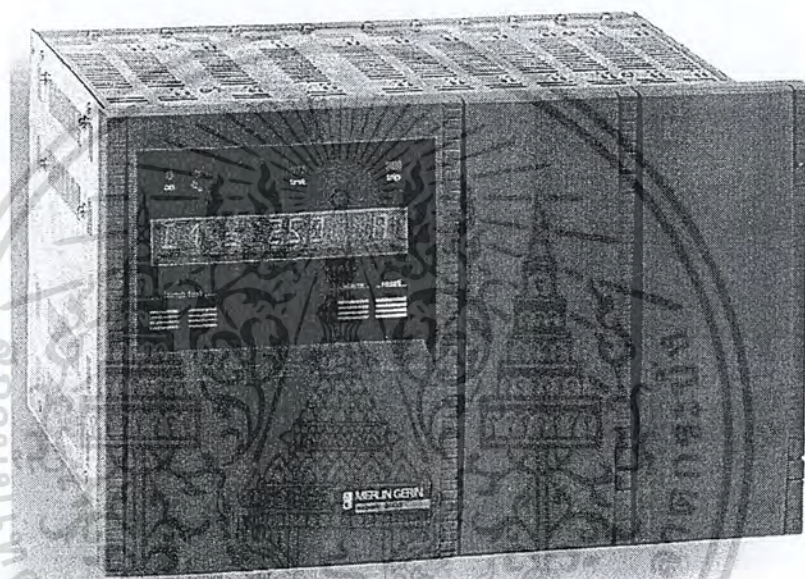


รูปที่ 5.25 Digital over-current time protection relays ของบริษัท SIEMEN  
(ซึ่งสามารถทำงานได้ทั้งโหมด definite-time และ inverse-time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 รีเลย์แบบผลต่าง (Differential Relay)

ส่วนใหญ่จะเป็นชนิดที่ทำงานด้วยผลต่างของกระแส โดยเมื่อเกิดฟอลต์ภายในขดลวดหม้อแปลง (จุดเกิดฟอลต์อยู่ระหว่าง CT สองตัว) ทำให้กระแสของ CT ทั้งสองไม่เท่ากัน จึงทำให้ผลต่างของกระแสสูงกว่าผลต่างในตอนเริ่มต้น รีเลย์ตัวนี้ก็จะสั่งทริปเบรกเกอร์ทันที ดังนั้นรีเลย์ชนิดนี้จึงถูกนำมาใช้ป้องกันหม้อแปลงจากฟอลต์ต่างๆ เช่น ขดลวดลัดวงจรระหว่างเฟสหรือลัดวงจรลงดิน หรือลัดวงจรระหว่างขดลวดแต่หากเกิดฟอลต์ที่อยู่นอกเขตการป้องกัน (เกิดนอกจุดที่มี CT) ทำให้ผลต่างที่วัดได้เป็นศูนย์ ซึ่งรีเลย์จะไม่ทำงาน

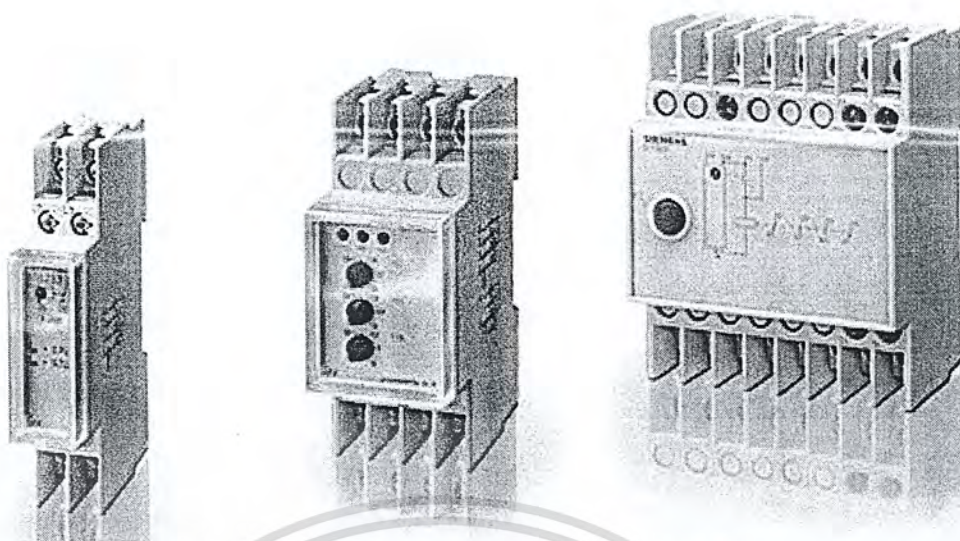


รูปที่ 5.26 Differential Relay ของบริษัท SCHNEIDER ELECTRIC

### 5.2.3 รีเลย์ตอบสนองแรงดัน (Voltage Relay) แบ่งเป็นสองชนิดคือ

5.2.3.1 รีเลย์แรงดันต่ำเกิน (Undervoltage relay) หลักการทำงานคือ ถ้าแรงดันของระบบตกลง Under voltage relay จะสั่งทริปเบรกเกอร์

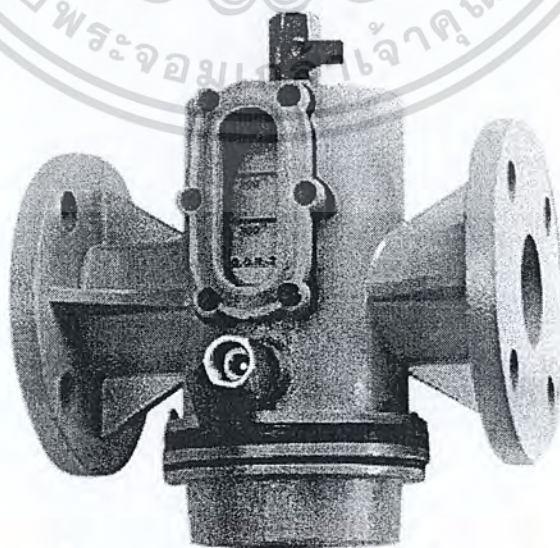
5.2.3.2 รีเลย์แรงดันเกิน (Overvoltage relay) หลักการทำงานคือ ถ้าแรงดันของระบบเพิ่มสูงขึ้นเกินพิกัด Overvoltage relay จะสั่งทริปเบรกเกอร์



รูปที่ 5.27 Voltage Relay สำหรับระดับแรงดันปานกลางของบริษัท SIEMEN (ทำงานได้ทั้งโหมด undervoltage, overvoltage และ under/ overvoltage)

#### 5.2.4 Buchholz Relay

ใช้สำหรับติดตั้งกับหม้อแปลงที่มีถึงน้ำมันเท่านั้น โดยมีหน้าที่วัดระดับก๊าซภายในถังเก็บน้ำมัน เนื่องจากหากพบว่ามีระดับน้ำมันในถังลดลงโดยมีสาเหตุมาจากการรั่วไหลหรือมาจากฟอลต์ (ชนิดที่ไม่รุนแรงซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ใต้ระดับน้ำมัน เช่น ฟอลต์ระหว่างรอบของขดลวด, ฉนวนระหว่างแกนเหล็กกับสลักยึดแกนเหล็กชำรุด, เกิดการลัดวงจรระหว่างแผ่นเหล็ก หรือ ขั้วต่อชำรุด เป็นต้น) แล้วจะมีผลทำให้ปริมาณก๊าซที่สะสมอยู่เหนือระดับน้ำมันมีปริมาณมากพอ (ราวๆ 200 – 300  $cm^3$ ) ที่จะทำให้ Buchholz Relay ทำงาน

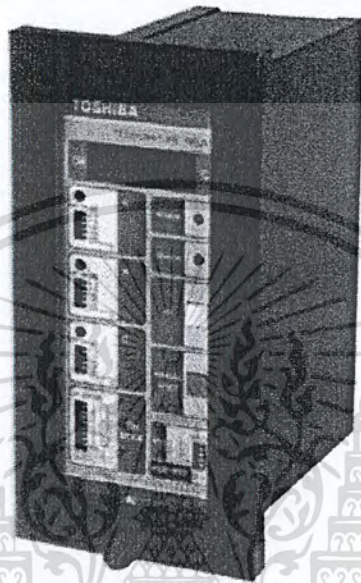


รูปที่ 5.28 Buchholz Relay ของบริษัท ASHISH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.5 Winding Temperature Relay

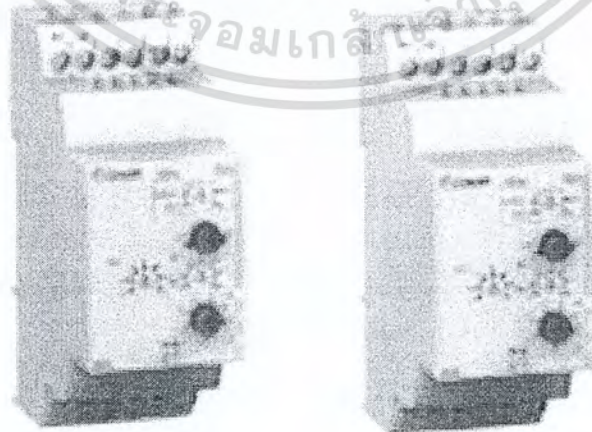
ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของขดลวดในตัวถังหม้อแปลงแต่ละเฟส และแกนเหล็กที่ฝัง Thermostat ไว้ โดยสัญญาณที่มาจาก Thermostat จะเข้าสู่มอดิวลาร์ที่ตู้ Control Panel ภายในอาคาร โดยแสดงค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ถ้าอุณหภูมิที่วัดได้สูงกว่าที่เราตั้งไว้ มอดิวลาร์ก็จะสั่งให้ระบบควบคุมต่างๆ ทำงาน



รูปที่ 5.29 Temperature control relay ของบริษัท Toshiba

### 5.2.6 Under Frequency Relay

ทำหน้าที่ตรวจสอบ ระดับความถี่ว่ามีค่าต่ำกว่าความถี่ปกติของระบบหรือไม่



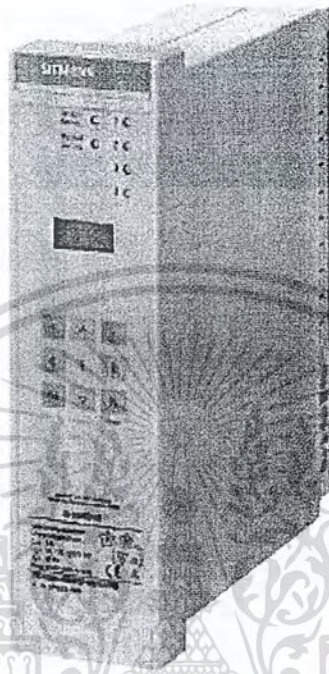
รูปที่ 5.30 Under Frequency Relay ของบริษัท Crouzet (ทำงานได้ทั้งโหมด

Under/Over frequency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.7 Circuit breaker Failure Relay

ทำหน้าที่ตรวจสอบสภาวะการทำงานของ circuit breaker ที่เปิดวงจรออกเนื่องจากการทริป หรือใช้ในการตรวจสอบฟอลต์ที่เกิดขึ้นว่าสามารถกำจัดออกไปได้แล้วหรือยัง



รูปที่ 5.31 Circuit breaker Failure Relay ของบริษัท SIEMEN

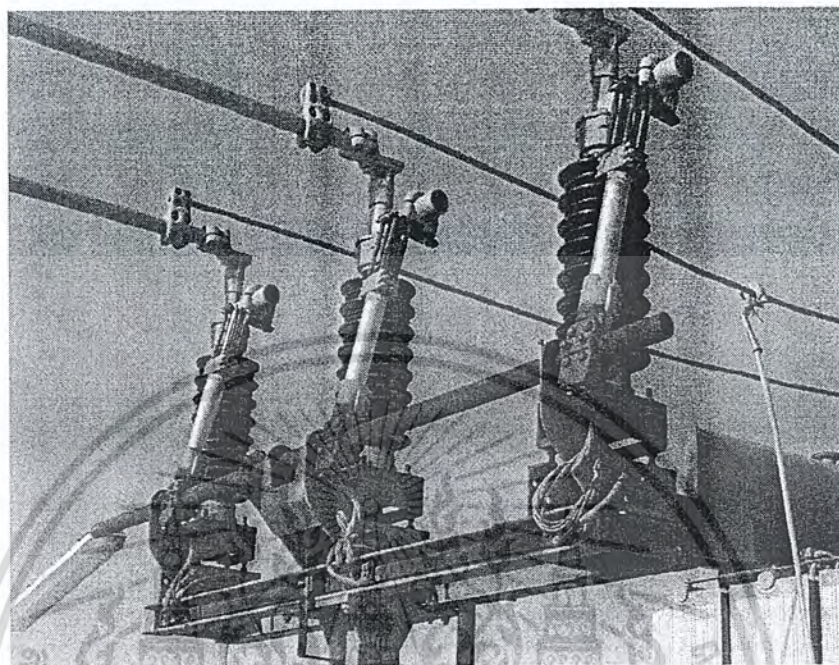
### 5.3 สวิตช์ตัดตอน (Disconnecting Switch)

สวิตช์ตัดตอน (Disconnecting switch) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการต่อหรือปลดวงจรในสภาวะที่ไม่มีกระแสเพื่อวัตถุประสงค์ในการบำรุงรักษาอุปกรณ์เช่น ต้องการปลด Power circuit breaker เมื่อเกิดความเสียหาย หรือเปิดวงจรออกเพื่อทำการบำรุงรักษาหม้อแปลง และยังใช้ Disconnecting Switch ในการปลด Shunt Reactor ออกจากระบบเมื่อไม่ต้องการใช้งาน หรือใช้ในการย้ายโอนวงจรจ่ายไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้า

Earthing switch หรือ Grounding switch เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อลัดวงจรไฟฟ้าทั้งสามเฟสแล้วต่อลงดิน เมื่อต้องการทำการบำรุงรักษา เพื่อเป็นการรักษาความปลอดภัยให้แก่ผู้ปฏิบัติงานจากไฟฟ้าช็อต โดย Earthing switch ถูกออกแบบมาเพื่อให้ลัดวงจรในขณะที่ไม่มีกระแสไหล หรือมีกระแสไหลอยู่เพียงเล็กน้อย (Charging Current) เนื่องมาจากประจุไฟฟ้าค้างในระบบ

เช่น ในสายส่งแรงดันสูงหรือบัสบาร์ที่มีความยาวมากๆ และ Earthing switch นี้ต้องยังสามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทนกระแสลัดวงจรแบบ Three-Phase to Ground fault ได้ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ



รูปที่ 5.32 Earthing Switch ของบริษัท HAPAM

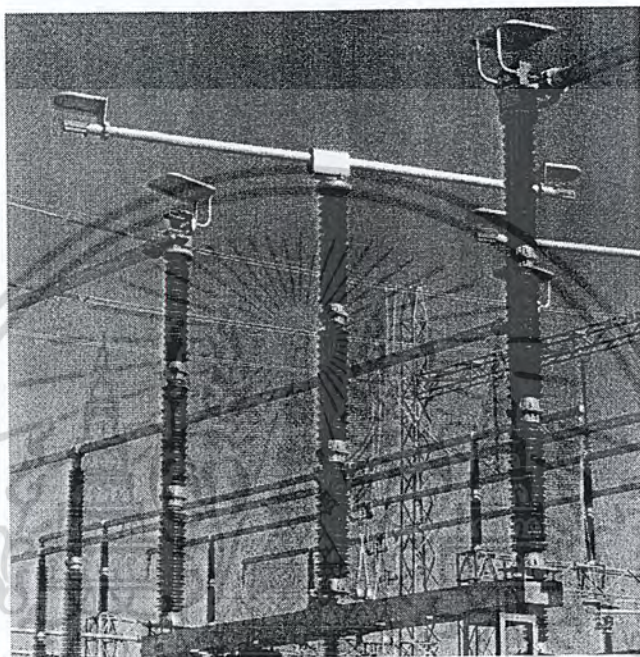
ในการปฏิบัติงาน ผู้ปฏิบัติงานควรสามารถมองเห็นการทำงานของ Disconnecting Switch ได้อย่างชัดเจน เพื่อความปลอดภัยในขณะที่ทำการบำรุงรักษาหรือควบคุมวงจร เนื่องการทำงานในสถานีไฟฟ้าแรงสูงจะต้องพิจารณาถึงเรื่องความปลอดภัยเป็นสำคัญ ดังนั้นก่อนที่จะเริ่มปฏิบัติงานจะต้องมั่นใจว่าวงจรที่เกี่ยวข้องนั้นจะต้องถูกปลดออกจากระบบไฟฟ้าแล้ว ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสถานะการทำงานของ Disconnecting Switch และจะต้องมีกลไกป้องกันการทำงานของ Disconnecting Switch โดยวิธีทางกลในตำแหน่งของการสับปลดวงจรด้วยเสมอ

สำหรับ Disconnecting Switch ที่ใช้งานในระบบ 115kV มีขนาดใหญ่ โดยในการใช้งานที่ระดับแรงดันสูงๆ จะต้องคำนึงถึงค่า Withstand ต่างๆ ให้สอดคล้องกับมาตรฐาน IEC 694 และ DIN VDE 0670 Part 1000 โดยจะทำการติดตั้ง Disconnecting Switch ไว้ที่บริเวณลานไถของสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

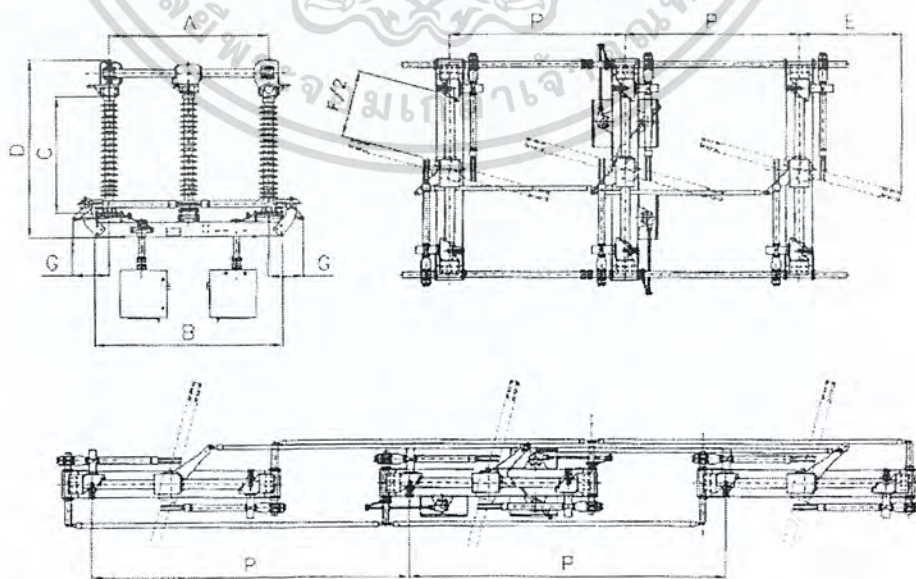
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.1 Horizontal Double side Break

มักใช้ที่ระดับพิกัดแรงไฟฟ้าต่ำๆ แบบนี้เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอื่น จะมีระยะห่างของการปลด-สับวงจร น้อยกว่า โดยหลักการทำงานคือ ลูกถ้วยที่อยู่บริเวณด้านนอกทั้งสองชุดจะอยู่ประจำตำแหน่งที่ไม่เคลื่อนไหวยบนฐานเหล็ก โดยลูกถ้วยที่อยู่ตรงกลางจะเป็นจุดหมุนที่สามารถหมุนได้ 60 องศา ในส่วนของ Earthing switch จะติดตั้งได้ทั้งสองด้าน

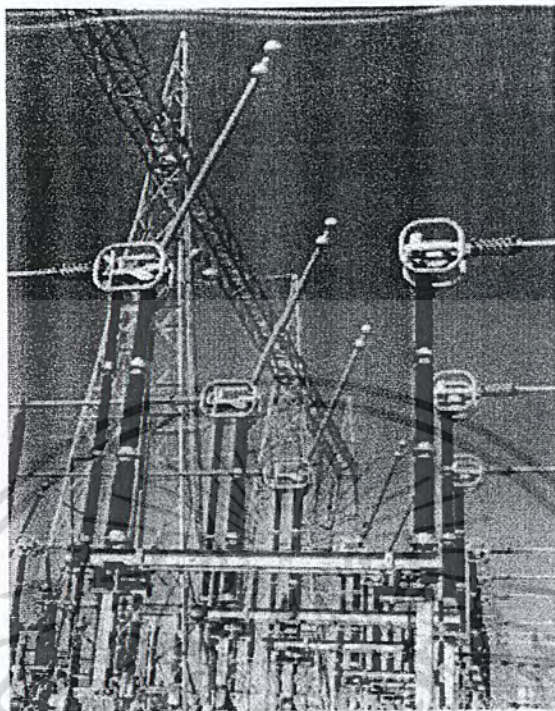


รูปที่ 5.33 Disconnecting Switch ชนิด Horizontal Double side Break ของบริษัท HAPAM

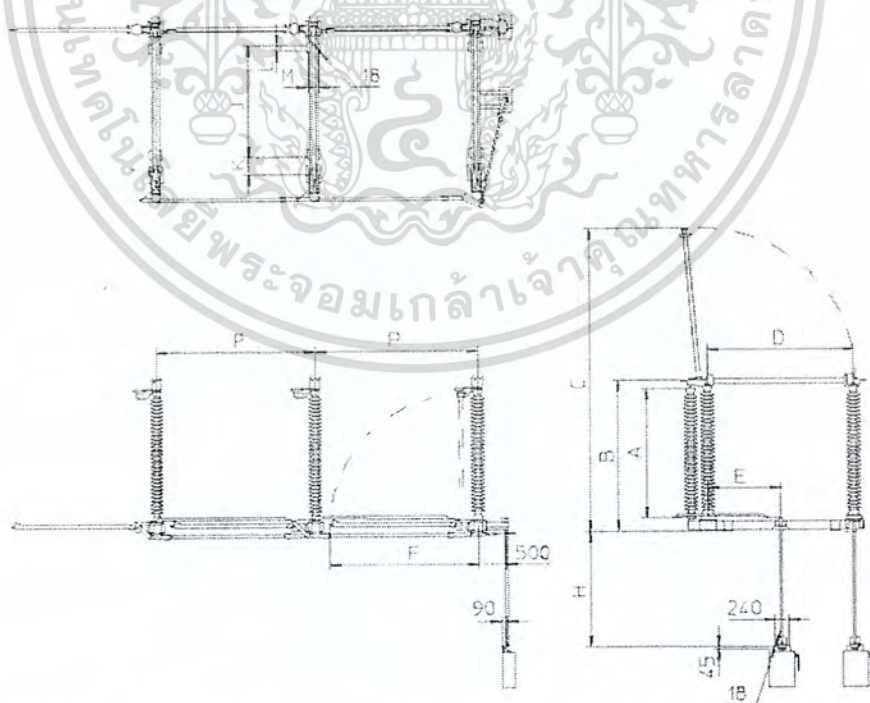


รูปที่ 5.34 แสดงโครงสร้างและกลไกการทำงานของ Horizontal Double side Break  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการงานคือมีใบมีด 2 ใบสับยกเปิด โดยทำมุม 60 องศา กับแนวราบ ใช้งาน  
สำหรับพิกัดแรงดัน 72.5 – 550kV



รูปที่ 5.35 Disconnecting Switch ชนิด Vertical Break ของบริษัท HAPAM

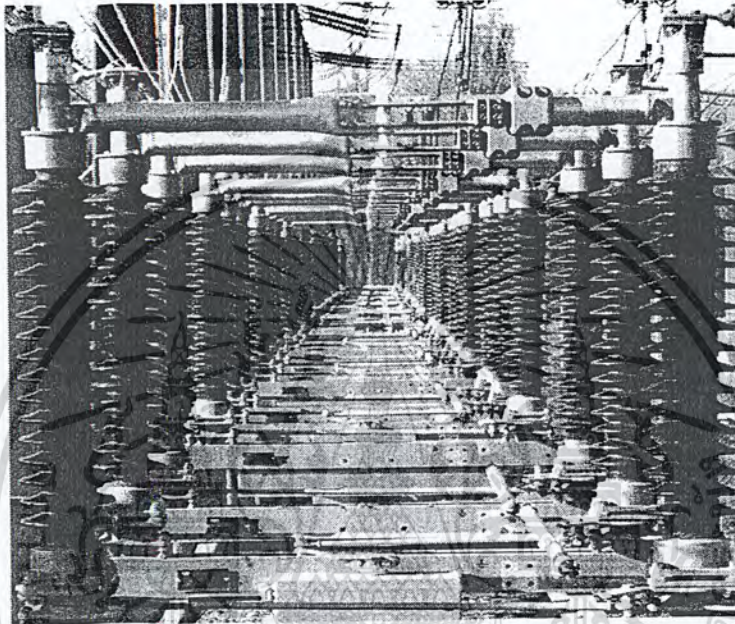


รูปที่ 5.36 โครงสร้างและกลไกการทำงานของ Disconnecting Switch ชนิด Vertical Break

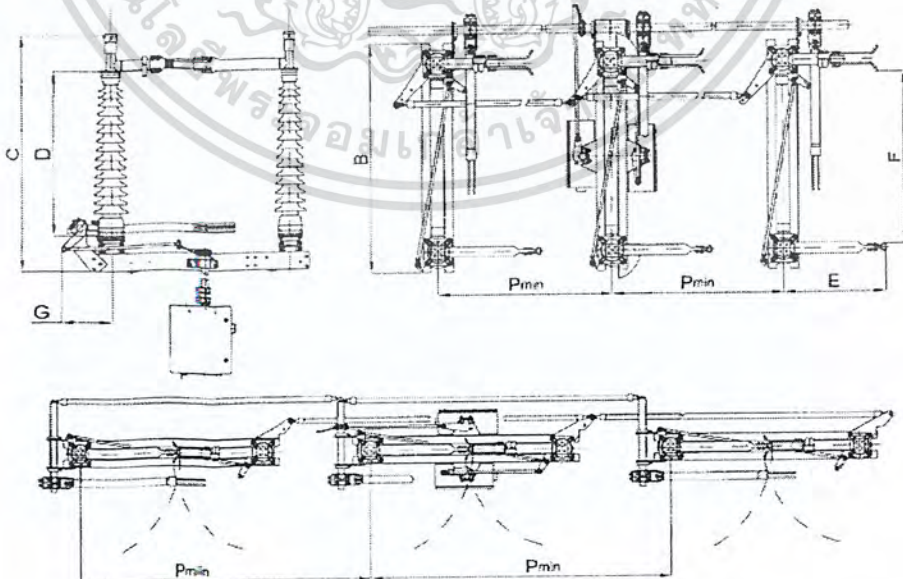
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.3 Two-column Rotary Disconnecter (Center Break)

ใช้กับระดับพิกัดแรงดัน 72.5 - 420kV ซึ่งนิยมติดตั้งในสถานีไฟฟ้าย่อยขนาดเล็ก หลักการทำงานคือ หน้าสัมผัสของ Disconnecter จะเชื่อมถึงกันด้วยเดือยสับ (Swivel arm) กำต่อซึ่งกันและกันบนลูกถ้วยของแต่ละฝั่ง โดยแกนของเดือยสับสามารถหมุนได้ถึง 90 องศา จากตำแหน่งที่ปลดวงจร ในขณะที่เดียวกันก็จะแยกออกจากกันได้ตามแนวระนาบ

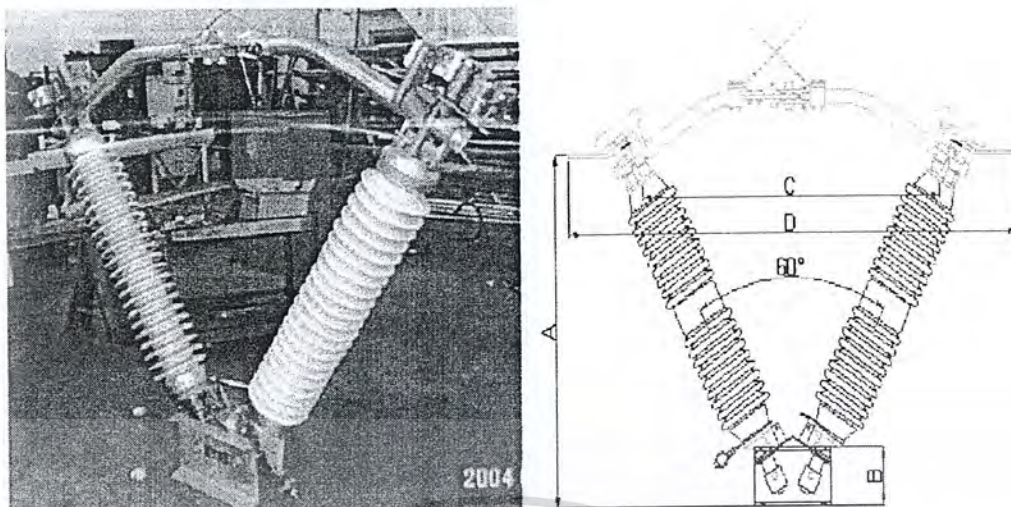


รูปที่ 5.37 Disconnecting Switch ชนิด Two-column Rotary Disconnecter ของบริษัท HAPAM



รูปที่ 5.38 แสดงโครงสร้างและกลไกการทำงานของ Disconnecting Switch ชนิด Two-column

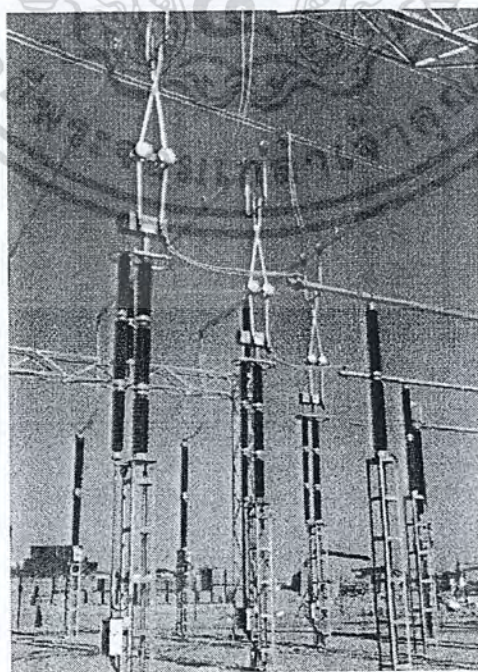
เอกสารนี้เป็น **Rotary Disconnecter** การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.39 Disconnecting Switch ชนิด VEE Center Break ขนาดพิกัดแรงดัน 69-230kV ของบริษัท Johnson Switch Company

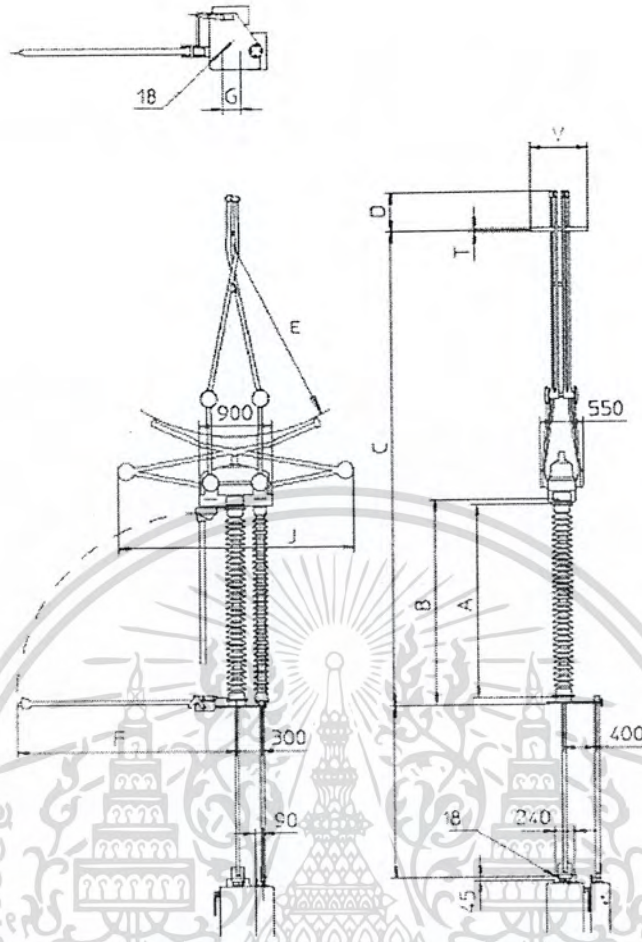
#### 5.3.4 Pantograph Type

ทำงานเปิด-ปิดวงจรจะใช้ตัวกลไกปรับระดับแขน (Pantograph) ปรับระดับขึ้นไปโดย Rotary Insulator ให้มีระดับสูงขึ้นจนไปแตะ Contact Finger ด้านบน ที่เชื่อมต่อกับตัวนำหรือ บัสบาร์ ข้อดีของ Disconnecting switch นี้คือใช้พื้นที่ในการทำงานน้อยมาก จึงเหมาะสำหรับนำไปใช้งานกับสถานีไฟฟ้าที่มีพื้นที่จำกัด แต่ข้อเสียก็คือมีราคาแพง



รูปที่ 5.40 Disconnecting Switch ชนิด Pantograph Type ของบริษัท HAPAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.41 แสดงโครงสร้างและกลไกการทำงานของ Disconnecting Switch ชนิด Pantograph

#### 5.4 Instrument Transformer (CT&PT)

ติดตั้งไว้เพื่อแปลงระดับแรงดันและกระแสที่มีขนาดสูงให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้อุปกรณ์ด้านการป้องกันและวัดค่าต่างๆ เช่น มิเตอร์ และรีเลย์ป้องกัน ให้สามารถทำการตรวจวัดได้ในระดับแรงดันพิกัดของตัวเอง

5.4.1 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current transformer) เป็นอุปกรณ์ที่มีไว้สำหรับแปลงระดับกระแสให้มีขนาดต่ำลง เพื่อให้เหมาะสมแก่การใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต่ออยู่ทางด้านทุติยภูมิโดยทั่วไปกระแสทางด้านทุติยภูมิจะมีขนาด 1, 2 และ 5A และมีหน้าที่แยกวงจรทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิออกจากกัน ในด้านการนำไปใช้งานจะแบ่งประเภทตาม Class ของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อหม้อแปลงกระแส สามารถต่อได้ 3 แบบ คือ

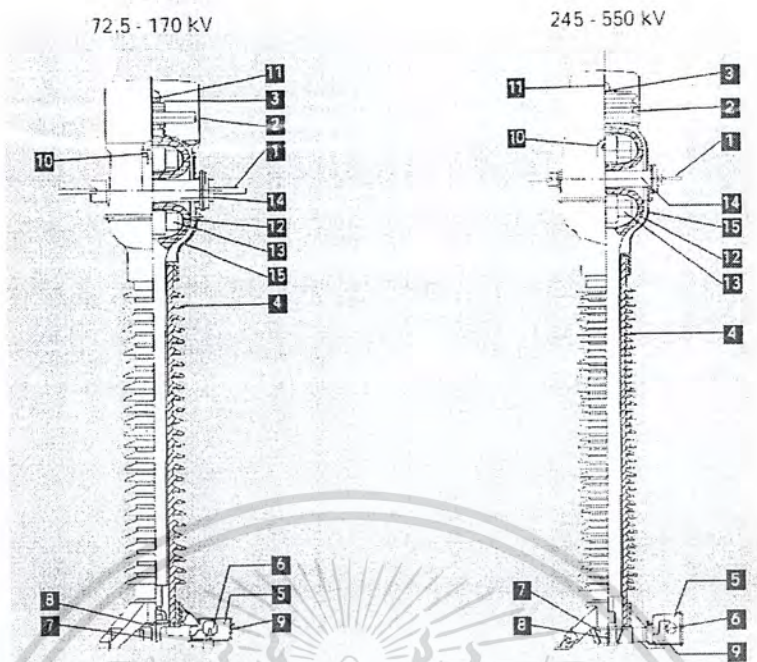
1) ต่อแบบวาย(Wye) การต่อแบบนี้ในแต่ละเฟสจะมี Over current Relay ต่ออยู่เพื่อทำการตรวจจับกระแสเกิน และการต่อแบบนี้ยังสามารถต่อกับ Ground fault Relay เพื่อทำการตรวจจับการลัดวงจรลงดิน

2) ต่อแบบวี (V or Open delta) การต่อแบบนี้จะใช้หม้อแปลง 2 ตัว ซึ่งการต่อแบบนี้จะทำการป้องกันเฟสต่อเฟสของทุกเฟสในระบบ 3 เฟส

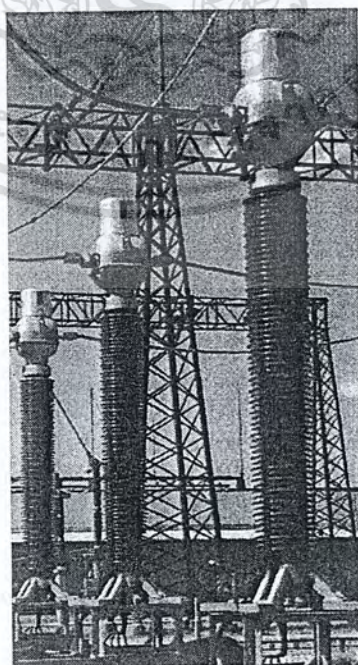
3) ต่อแบบเดลต้า (Delta) การต่อแบบนี้ใช้เพื่อป้องกันหม้อแปลงกำลังด้วย Differential Relay สำหรับหม้อแปลงกำลังที่ต่อขดลวดแบบเดลต้า-วาย

การพิจารณาเลือกจะใช้จะพิจารณา ดังนี้

- 1) พิกัดกระแสต่อเนื่องในด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
- 2) พิกัดแรงดันด้านปฐมภูมิ โดยหม้อแปลงกระแสสามารถทำงานได้ต่อเนื่องที่ระดับกระแสสูงกว่า 10% ของด้านแรงสูง
- 3) พิกัดกระแสความร้อนสูงสุด (Maximun thermal current rating) เป็นค่าความสามารถทนกระแสลัดวงจรสมมาตรใน 1 วินาที โดยที่อุณหภูมิของขดลวด CT ไม่สูงเกินไปจนก่อให้เกิดความเสียหาย
- 4) ความแม่นยำ (Accuracy) ซึ่งความสามารถของรีเลย์นั้นขึ้นอยู่กับความแม่นยำของหม้อแปลง
- 5) ค่าเบอร์เดน (Burden) เป็นค่าพิกัดโหลดหม้อแปลงสำหรับเครื่องวัดหรือรีเลย์ ที่ต่อกับด้านทุติยภูมิของ CT โดยมีหน่วยเป็น VA เช่น หากนำ CT มาต่อเข้ากับรีเลย์แล้วค่า เบอร์เดน จะเป็นค่าความต้านทานของรีเลย์รวมกับค่าความต้านทานของสายวงจรทั้งขาไปและขา กลับ

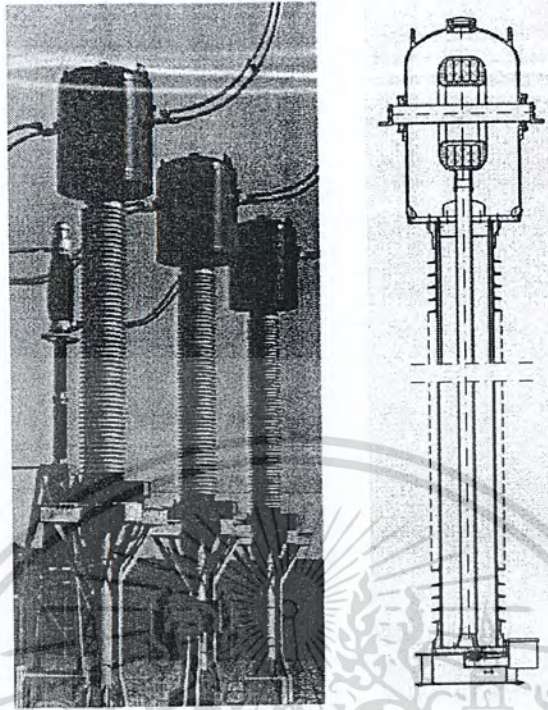


รูปที่ 5.42 แสดงโครงสร้างของ Oil-immersed Current transformer สำหรับแรงดันสูงของบริษัท Trench 1.Primary terminal 2.Metallic expansion bellows 3.Oil filling screw 4.Porcelain insulator 5.Secondary terminal box 6.Secondary terminals 7.Oil drain valve 8.Grounding terminal 9.Gland plate 10.Lifting lugs 11.Bellows indicator 12.High voltage insulation 13.Secondary winding and cores 14.Primary winding 15.Transformer head(aluminum)

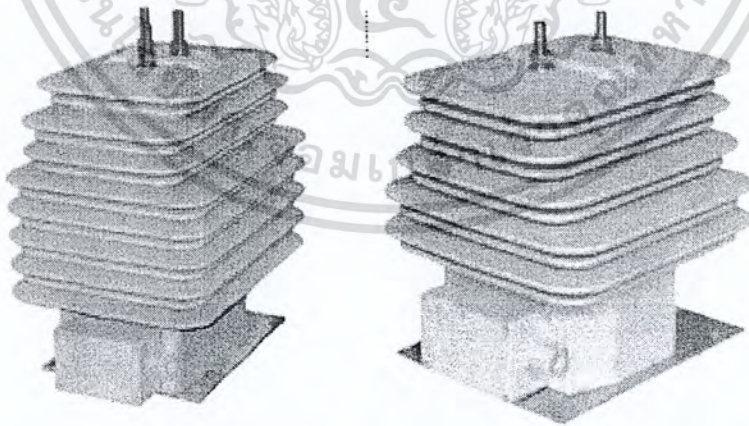


รูปที่ 5.43 Oil-immersed Current transformer ของบริษัท Trench

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.44 Gas-insulated Current transformer ของบริษัท Trench



รูปที่ 5.45 Outdoor Current Transformer ขนาดพิกัดแรงดัน 7.2-24kV ของบริษัท SIEMEN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

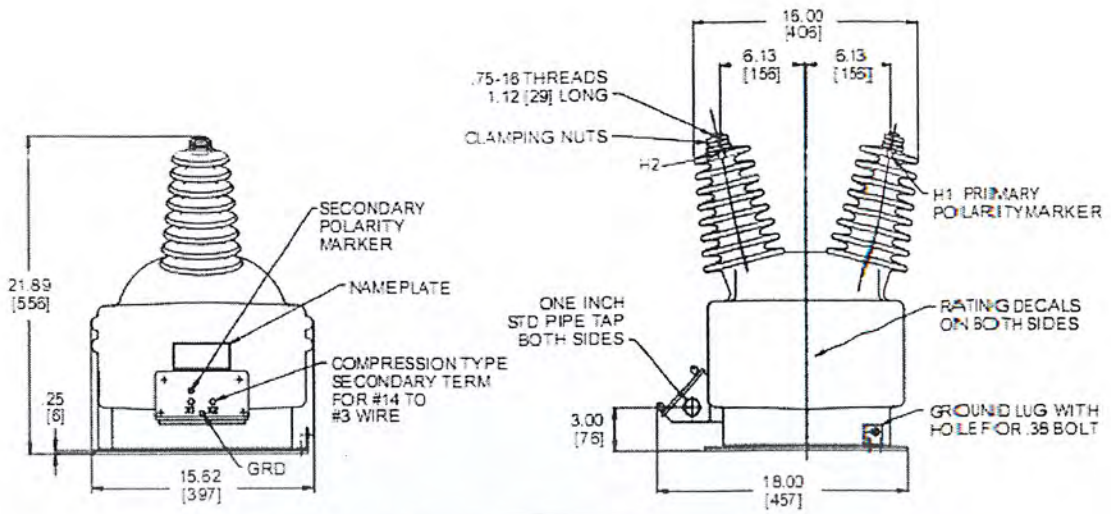
5.4.2 หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า (Potential transformer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ลดระดับแรงดันค่าสูง ๆ ลงมาเพื่อใช้กับงานวัดและอุปกรณ์ในระบบควบคุมและป้องกัน และยังทำหน้าที่แยกระบบไฟฟ้าแรงสูงกับแรงดันต่ำออกจากกัน โดยหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด แบบชดลวดเหนี่ยวนำ (Inductive Voltage Transformer) และแบบคาปาซิเตอร์ (Coupling Capacitor Voltage Transformer) หากต้องการวัดที่แรงดันสูงมากๆ ขนาด 765kV การใช้หม้อแปลงแรงดันแบบเหนี่ยวนำจะมีความยุ่งยากและเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย จึงได้มีการคิดค้นหม้อแปลงวัดแรงดันแบบคาปาซิเตอร์ โดยอาศัยหลักการแบ่งแรงดันด้วยโวลเทจดีไวเดอร์ก่อน แล้วจึงค่อยป้อนแรงดันนั้นไปยังหม้อแปลงแรงดันที่มีขอลวดรีแอคเตอร์ที่ปรับค่าได้อยู่

สำหรับด้านโครงสร้าง จะมี 2 แบบคือ Close Iron Core and Layer Winding ซึ่งใช้สำหรับระดับแรงดันที่น้อยกว่า 123kV และแบบ Bar Type Core and Coil Winding ซึ่งใช้สำหรับแรงดันที่สูงกว่า 123kV

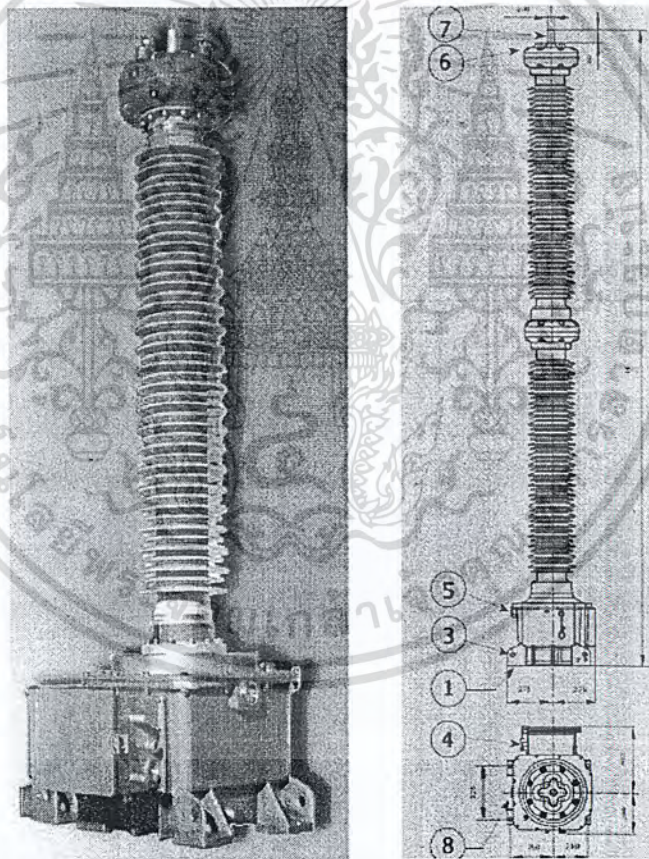


รูปที่ 5.46 หม้อแปลงแรงดัน 25kV ของ ABB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

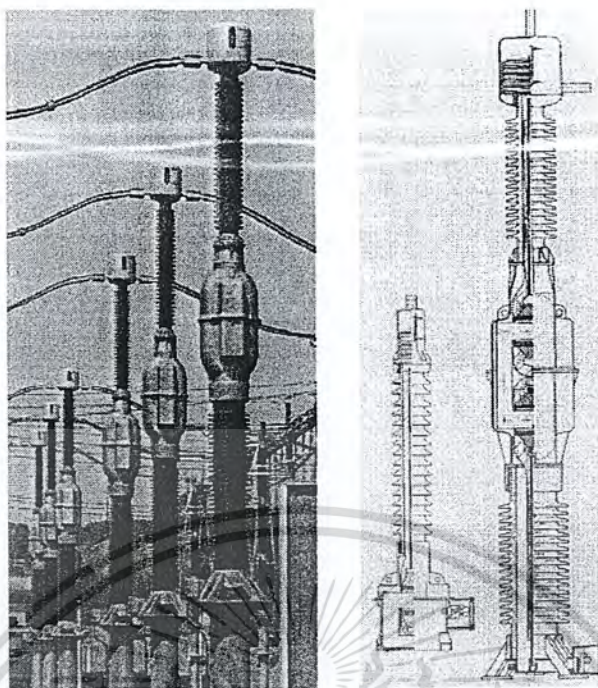


รูปที่ 5.47 แสดงโครงสร้างของหม้อแปลงแรงดัน 25kV ของ ABB



รูปที่ 5.48 Capacitor Voltage transformer ขนาด 72.5-800kV ของบริษัท Trench ซึ่งประกอบด้วย 1. Fixing holes (28DIA) 2. Earth terminal for 10-15mm dia cable 3. Lifting holes 4. Secondary terminal box 5. Oil level guage of electromagnetic unit 6. Threaded holes for line trap fixing 7. High-voltage terminal 8. Oil draining plug of electromagnetic unit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.49 Inductive Voltage Transformer บริษัท Trench

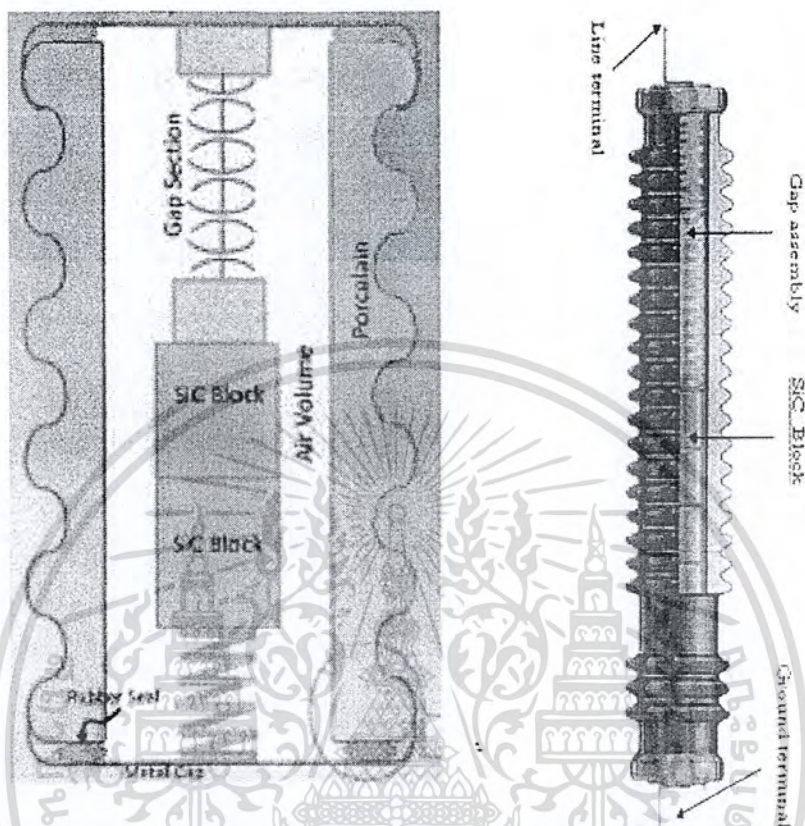
## 5.5 กั๊บดั๊กฟ้าผ่า (Surge Arrester)

กั๊บดั๊กเสี๊รจหรือกั๊บดั๊กฟ้าผ่า (Lightning arrester) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินเสี๊รจฟ้าผ่า และแรงดันเกินเสี๊รจสวิตชิ่ง ใช้ป้องกันอุปกรณ์สำคัญและราคาแพง ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้า Reactor หรืออุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อย กั๊บดั๊กเสี๊รจจะต่อคร่อมอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันคือ ต่ออยู่ระหว่างเฟสกับดิน กั๊บดั๊กเสี๊รจจะแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือชนิดที่ประกอบด้วยความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น  $R_{non}$  (nonlinear resistors) มี 2 ชนิดคือ SiC และ ZnO และอีกชนิดคือแบบที่กั๊บดั๊กฟ้าผ่าที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยคู่ขั้วเบี๊ยงอาร์กหรืออาร์กชิ่งฮอร์นต่ออนุกรมกับชิ่งค้ออกไซด์

กั๊บดั๊กเสี๊รจชนิด SiC (เรียกว่าแบบมีแก๊ป) จะมี Spark gap ต่ออนุกรมกับความต้านทาน  $R_{non}$  โดยสปาร์กแก๊ปเป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันพิกักด์ของกั๊บดั๊กเสี๊รจ ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันมิให้กระแสไหลผ่านลงดินในขณะที่ใช้แรงดันปกติ อันเป็นเงื่อนไขของคุณสมบัติพื้นฐานที่ต้องการของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินเสี๊รจ เมื่อได้รับแรงดันเกินเสี๊รจ สปาร์กแก๊ปจะเกิดเบรกดาวนโดยที่สดุ แรงดันที่กั๊บดั๊กเสี๊รจเกิดเบรกดาวน เรียกว่า แรงดันสปาร์กผ่าน (Sparkover voltage)  $U_s$  เมื่อเกิดสปาร์กผ่านแล้ว แรงดันที่คร่อมกั๊บดั๊กเสี๊รจจะลดลงจะเป็นแรงดันที่เหลือคร่อมความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของกั๊บดั๊กเสี๊รจ เรียกว่า แรงดันที่เหลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

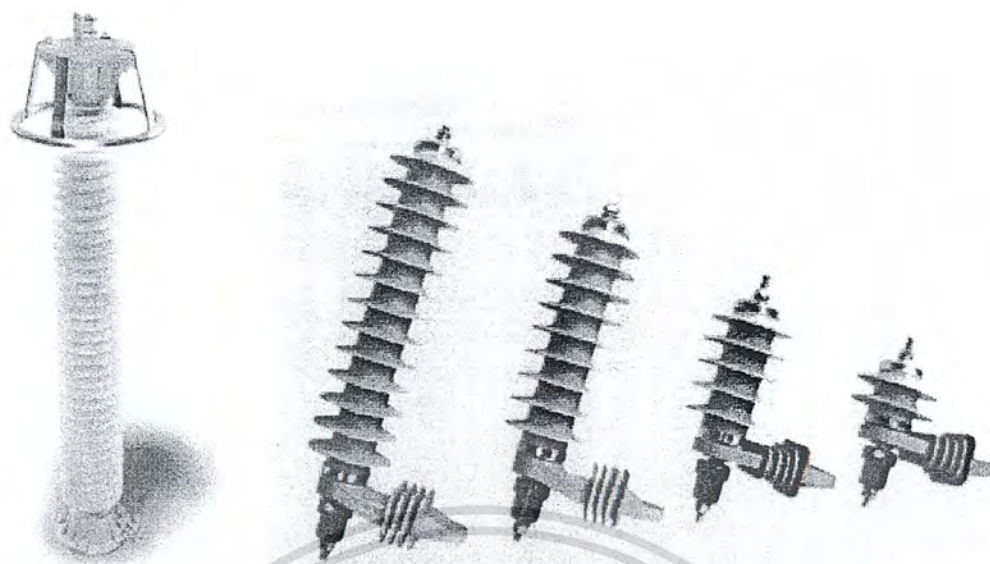
(Residual voltage) ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนอยู่ได้ของการฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบ



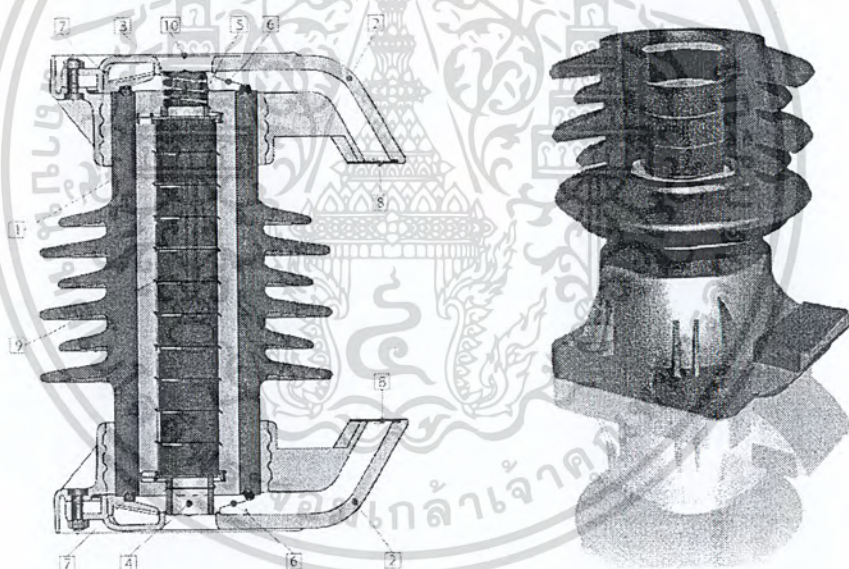
รูปที่ 5.50 แสดงโครงสร้างของกับดักฟ้าผ่าแบบ SiC

กับดักเสิร์จชนิดออกไซด์โลหะ Metal Oxide (เรียกว่าแบบไม่มีแกป) จะใช้บอกความความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น  $R_{non}$  ทำด้วย ZnO (Zinc Oxide) มีลักษณะเป็นแท่งมีลักษณะเป็นแท่งกลมทรงกระบอกวางซ้อนกัน บรรจุในกระบอกฉนวน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่ง ZnO เป็นตัวกำหนดขนาด กระแส หรือพลังงานเสิร์จที่ยอมให้ผ่าน ส่วนความสูง  $h$  เป็นตัวกำหนด แรงดันโครงติดตั้งของกับดักชนิด MO นี้มักทำจากพอลิเมอร์ และมีข้อได้เปรียบกว่าชนิด SiO คือสามารถกำจัดกระแสตาม (follow current) ที่เกิดขึ้นหลักจากกระแสอิมพัลส์ (Impulse current) ได้ดีกว่าอีกทั้งยังมีน้ำหนักเบาและทนทานต่อสภาวะแวดล้อมดีกว่ากับดักเสิร์จ ประกอบด้วยความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น  $R_{non}$  เมื่อมีกระแสเสิร์จไหลผ่านเพิ่มขึ้น ความต้านทานกลับลดลง ฉะนั้นแรงดัน ตกคร่อมกับดักเสิร์จจะเพิ่มไม่เป็นเชิงเส้นกับกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

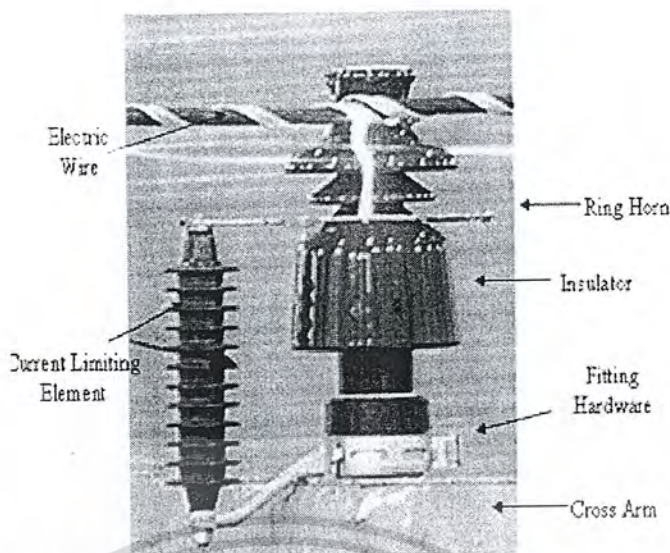


รูปที่ 5.51 Metal Oxide Surge arrester



รูปที่ 5.52 แสดงโครงสร้างภายในกับดักฟ้าผ่าชนิด ZnO ของบริษัท ABB  
ซึ่งประกอบไปด้วย 1.Porcelain insulator 2.Venting duct 3.Spring  
4.Desiccant bag 5.Copper sheet 6.Sealing cover 7.Sealing ring  
8.Indication plates 9.ZnO blocks 10.Flange cover

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.53 กับดักฟ้าผ่าชนิดที่มี Arcing Horn ต่ออนุกรมกับ ZnO (ที่มา: โครงการงานอุตสาหกรรมสำหรับปริญญาตรี 2549 ของ สจล.)

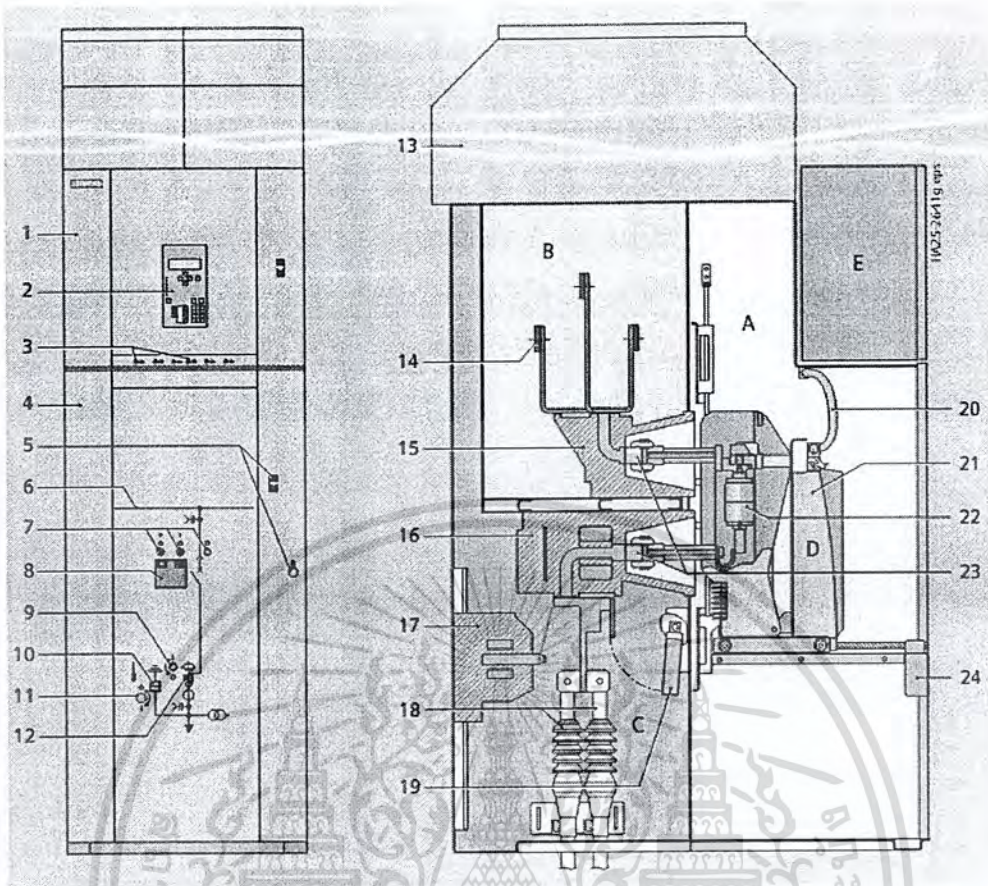
## 5.6 ตู้ควบคุมระบบจำหน่ายแรงสูง (Medium voltage Switchgear)

เป็นอุปกรณ์ควบคุมระบบจำหน่ายแรงสูงที่ระดับแรงดัน 12-36kV มีหน้าที่หลักคือ รับกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงกำลัง เข้ามายังเบรกเกอร์หลัก จากนั้นจึงแยกเป็นเบรกเกอร์ย่อยๆหลายวงจรเพื่อทำการจ่ายไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าต่อไป โดยอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในตู้ประกอบไปด้วย ระบบควบคุม อุปกรณ์ตัดตอนระบบ อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า ฉนวนและตัวนำ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกติดตั้งอยู่ในตู้ไฟฟ้า (Cubicle) โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

### 5.6.1 Metal-enclosed Air-insulated Switchgear

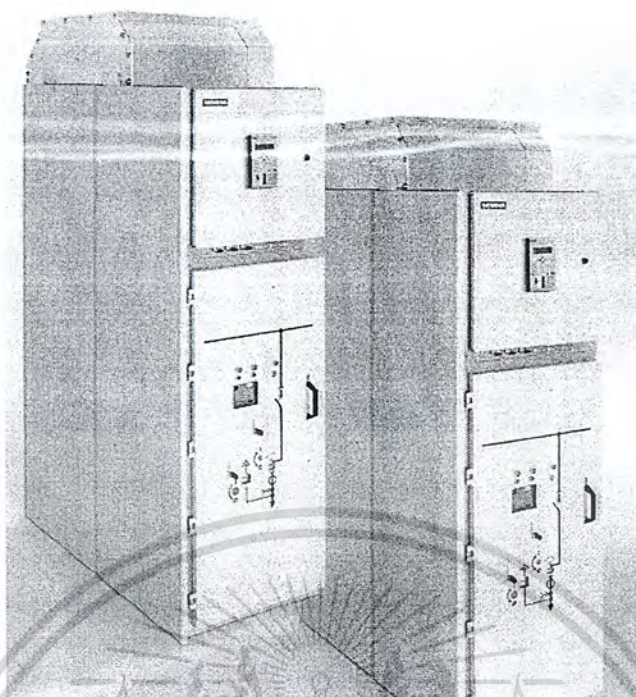
ใช้อากาศที่อยู่โดยรอบของอุปกรณ์ Switch และตัวนำกระแสมาเป็นฉนวนกั้นระหว่างเฟส โดยการออกแบบของตู้จะมีการออกแบบเป็น Metal enclosed ให้มีการแบ่งส่วนออกเป็นแต่ละส่วน เช่น Bus bar Compartment, Main Switching device Compartment, Cable Compartment และ Low voltage Compartment และสามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิดคือ Metal-enclosed switchgear และ Metal-clad switchgear ซึ่งที่ผนังในแต่ละ Compartment และ Metal-enclosed จะมี ระดับของการป้องกัน (Degree of Protection; IP xx) โดยสามารถเลือกระดับการป้องกันจากมาตรฐาน IEC Std. 62271-200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.54 แสดงโครงสร้างของ Air-insulated Switchgear Type NXAIR M ของบริษัท SIEMEN ซึ่งประกอบไปด้วย 1.Door of low-voltage compartment 2.Protection device 3.Option: Capacitive voltage detecting system for feeder and busbar 4.High-voltage door 5.Locking device / knob for high-voltage door 6. Mimic diagram 7. "CLOSE-OPEN" actuating openings for the circuit-breaker, opening for spring charging 8.Inspection window to recognize the"CLOSED-OPEN" indicator of the circuitbreaker,"closing spring charged" indicator, operations counter 9.Actuating opening for racking the switching device 10.Mechanical position indicator for feeder earthing switch 11.Actuating opening for feeder earthing switch, manual or optionally motor operation 12.Mechanical position indicator for withdrawable part 13.Pressure relief duct 14.Busbars 15.Bushing-type insulator 16.Bushing-type current transformer 17.Voltage transformer 18.Cable connection for max. 4 cables per phase 19.Make-proof earthing switch 20.Low-voltage connection, plug-in type 21.Operating and interlocking unit for circuit-breaker 22.Vacuum interrupters 23.Contact system 24.Operating and interlocking unit for racking the circuit-breaker and for earthing, manual or optionally motor operation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



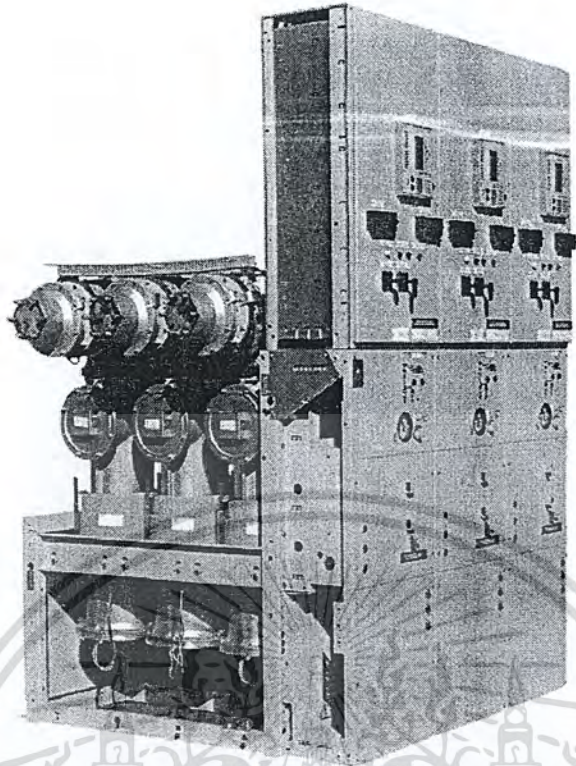
รูปที่ 5.55 Air-insulated Switchgear Type NXIAR ของบริษัท SIEMEN

#### 5.6.2 Metal-enclosed Gas-insulated Switchgear

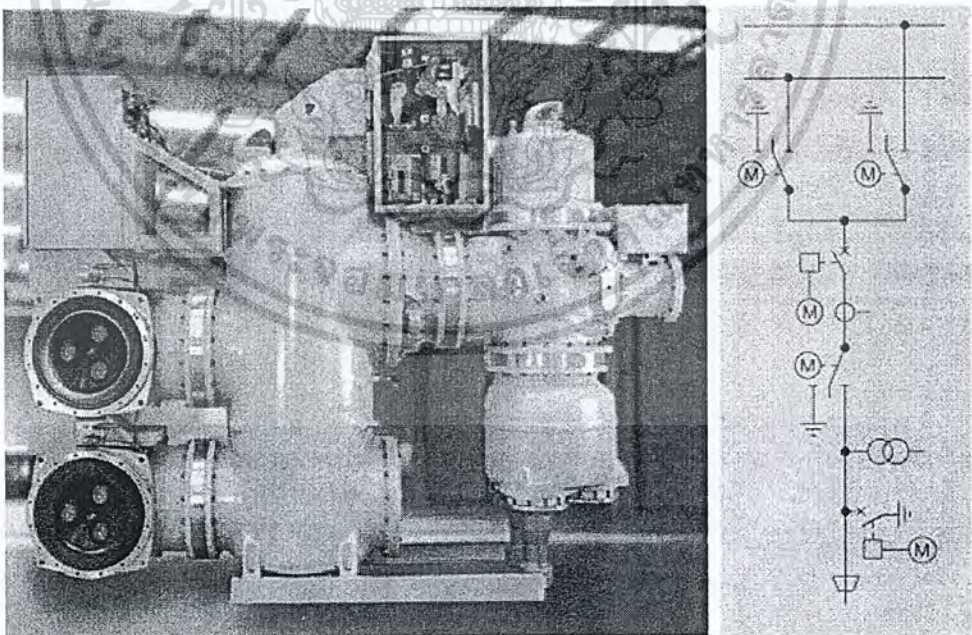
ใช้ก๊าซ  $SF_6$  มาเป็นฉนวนกันระหว่างเฟสทั้ง 3 เฟส แทนที่จะใช้อากาศมาเป็นฉนวน ออกแบบมาเพื่อแก้ข้อด้อยของแบบ AIS คือ

- 1) Space โดย GIS มีขนาดเล็กกว่า จะมีจุดเด่นที่เมื่อค่าที่ดินหรือพื้นที่มีราคาสูง AIS กินพื้นที่ติดตั้งมากกว่า
- 2) เพิ่ม Reliability ของระบบ โดย Switchgear แบบ AIS ต้องคอยมาดูแลรักษาระบบ เช่นเรื่องฝุ่น ความชื้น เป็นต้น แต่ GIS ไม่ต้องมากังวลเรื่องนี้ โดยเฉพาะที่มีฝุ่นมากๆ อยู่ใกล้ ชายทะเล หรือ Hazardous Area เช่นลูกติดไฟง่าย โดยปกติถ้าจะใช้ AIS ในที่ที่ได้กล่าวมานี้ ต้องออกแบบห้อง Switchgear ให้เหมาะสม โดยปกติมักจะมีมาตรฐานกำหนดในการออกแบบ ห้อง Switchgear อยู่แล้ว
- 3) เมื่อส่วนของ Switch และส่วนตัวนำที่อยู่ใน Gas  $SF_6$  ทำให้ระบบโดยรวม (รวมทั้ง Switchgear) มีอายุการใช้งานนานขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

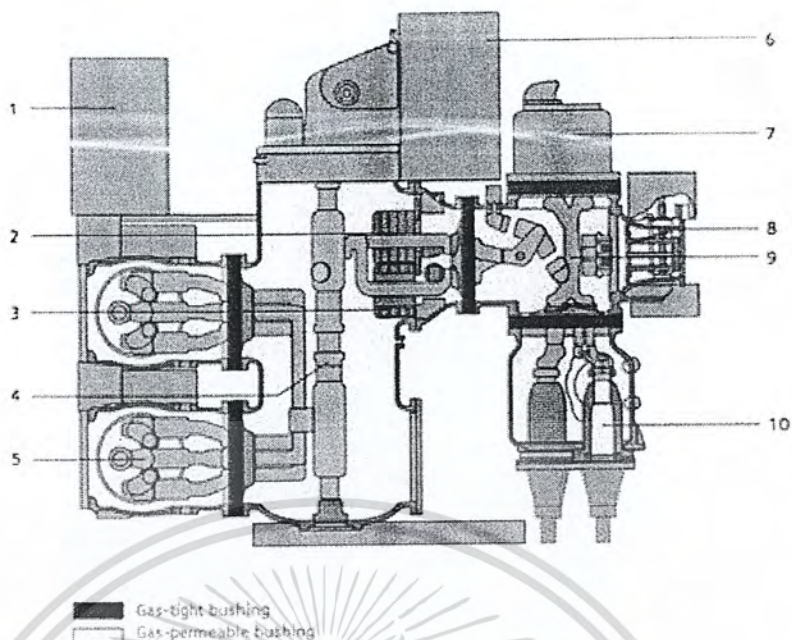


รูปที่ 5.56 Gas-insulated Switchgear Types 8DA10 and 8DB10 ของบริษัท SIEMEN



รูปที่ 5.57 Gas-insulated Switchgear และวงจรรภายในของบริษัท SIEMEN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



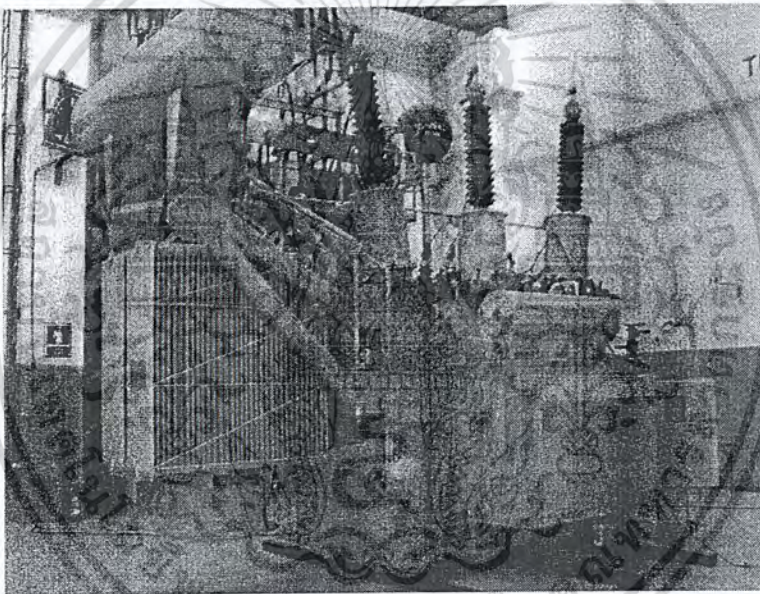
รูปที่ 5.58 แสดงโครงสร้างภายในของ Gas-insulated Switchgear ของบริษัท SIEMEN ซึ่งประกอบไปด้วย 1.Integrated local control cubicle 2.Current transformer 3.Busbar 2 with disconnector and earthing switch 4.Interrupter unit of the circuit breaker 5. Busbar 1 with disconnector and earthing 6.Spring-stored energy mechanism with circuit breaker control unit 7.Voltage transformer 8.High-speed earthing switch 9.Outgoing feeder module with disconnector and earthing switch 10.Cable swaling end

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.7 หม้อแปลงกำลังไฟฟ้า (Power Transformer)

หม้อแปลงกำลังทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันและส่งผ่านพลังงานจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง ซึ่งขนาดของหม้อแปลงกำลังจะอยู่ในช่วง 5kVA – 650MVA โดยหม้อแปลงขนาดใหญ่ มากๆ นั้น (ขนาด 250MVA – 650MVA) ไว้สำหรับติดตั้งในโรงไฟฟ้า และหม้อแปลงกำลังที่มีขนาดเล็ก (VA น้อยๆ) ไว้สำหรับติดตั้งในวงจรแรงดันต่ำ

ขนาดของหม้อแปลงกำลังจะขึ้นอยู่กับปริมาณโหลด kVA ในการผลิตหม้อแปลงกำลังจะมีการสร้างออกมาหลายขนาดตั้งแต่ขนาด kVA น้อยๆ ไปจนถึงขนาดหลายร้อย MVA ก็เนื่องจากไว้รองรับระดับแรงดันใช้งานที่มีความแตกต่างกันไปของผู้บริโภคที่มีตั้งแต่ระดับแรงดันต่ำไปจนถึงแรงดันสูงพิเศษ (Ultra-high Voltage)



รูปที่ 5.59 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของบริษัท ABB

### 5.7.1 Transformer Impedance

Impedance ของหม้อแปลงมีผลต่อความสม่ำเสมอของแรงดัน ประสิทธิภาพ และขนาดของกระแสลัดวงจร ซึ่งทั้งความสม่ำเสมอของแรงดันและประสิทธิภาพจะสูงเมื่อ Impedance ของหม้อแปลงมีค่าต่ำ แต่กระแสลัดวงจรก็จะสูงขึ้นซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อหม้อแปลง และอุปกรณ์ที่ใช้ก็จะต้องทนกระแสลัดวงจรที่สูงขึ้นนี้ให้ได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น

โดยตามมาตรฐานอนุญาตให้ผลิตหม้อแปลงที่มี Impedance ได้  $\pm 7.5\%$  สำหรับหม้อแปลงแบบ 2-Winding และ  $\pm 10\%$  สำหรับหม้อแปลงแบบ Multiwinding และ Autotransformer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.7.2 การแบ่ง Class ของ Power Transformer

ตารางที่ 5.1 การแบ่ง Class ของ Power transformer

| Class | อธิบาย   |
|-------|--|
| A     | เป็นหม้อแปลงประเภท Dry type (ใช้ resin เป็นฉนวน) โดยหม้อแปลงแบบนี้ฉนวนที่ใช้หุ้มแกนเหล็กและขดลวด จะต้องไม่มีส่วนที่เป็นของเหลว โดยค่าความร้อนที่สูญเสียจะสามารถระบายความร้อนออกสู่บรรยากาศได้ตามพื้นที่ผิว ซึ่งขนาดของหม้อแปลงประเภทนี้ใช้ได้ถึงขนาด 5MVA แต่ใช้กับระดับพิกัดแรงดันสูงสุดไม่เกิน 36 kV |
| O     | เป็นหม้อแปลงประเภทน้ำมัน (Oil immersed Type) โดยแกนเหล็กและขดลวดของหม้อแปลงอาจจะแช่อยู่ในน้ำมันภายในถัง หรืออาจจะใช้เป็นฉนวนเหลวตัวอื่นได้ แต่จะต้องเป็นของเหลวที่มีจุดติดไฟไม่เกิน 300° C   |
| L     | โครงสร้างหม้อแปลงเหมือน class O แต่ของเหลวที่นำมาใช้นั้นจะต้องมีจุดติดไฟที่สูงกว่า 300° C  |

### 5.7.3 Vector Group

เป็นตัวบอกรหัสผลต่างของมุมระหว่างแรงดันของขดลวดด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ และการเรียงลำดับเฟส ซึ่งกลุ่มเวกเตอร์มีความสำคัญอย่างมากเมื่อต้องการต่อขานหม้อแปลง โดยกลุ่มเวกเตอร์จะบ่งบอกด้วยตัวเลขที่มีค่าคงที่ระหว่าง 0-11 โดยตัวเลขนี้จะบอกให้ทราบว่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่ด้านแรงดันต่ำต่างกับมุมด้านแรงดันสูง เท่ากับผลคูณของตัวเลขกับมุม 30 องศา เช่น สัญลักษณ์บอกไว้ว่า YNd 5 หมายถึง หม้อแปลงที่ด้านแรงดันสูงต่อแบบ Star มีนิวทรอล และด้านแรงดันต่ำต่อแบบ Delta และ 5 บอกรหัสของด้านแรงดันต่ำต่างกับด้านแรงดันสูงอยู่  $5 \times 30^\circ$  เท่ากับ  $150^\circ$  โดยกลุ่มเวกเตอร์ยังมีชนิดอื่นๆ แบ่งได้ดังนี้

ตารางที่ 5.2 ชนิดของ Vector Group

| Vector Group | อธิบาย  |
|--------------|---|
| Yyn 0        | ใช้สำหรับหม้อแปลงในระบบจำหน่าย โดยค่ากระแสที่ไหลลงนิวทรอลจะมีค่า 10-25% ของกระแสที่ไหลในเฟส หม้อแปลงชนิดนี้สามารถจ่ายโหลดได้เต็มพิกัดไม่เกิน 1.5 ชั่วโมง  |
| YNyn 0       | ใช้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่ ที่สามารถ Tie ได้ โดยกระแสที่ไหลลงนิวทรอลสามารถไหลได้ 100% ของกระแสในแต่ละเฟส หม้อแปลงชนิดนี้เวลาใช้งานต้องต่อขดลวดชดเชยเข้าไปด้วย |

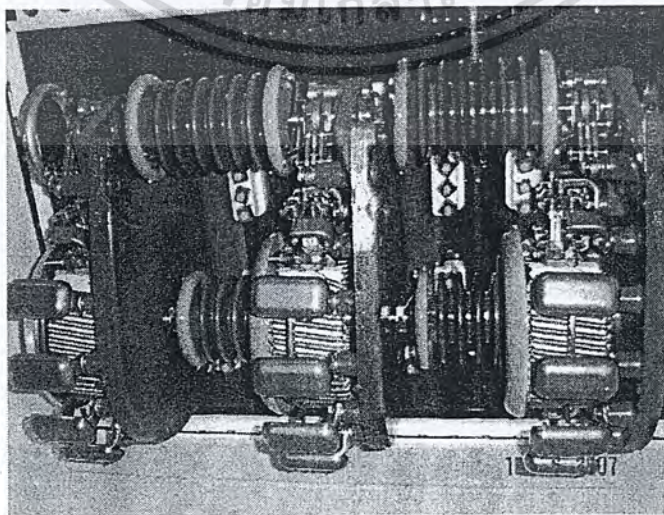
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|       |  |
|-------|--|
| Yzn 5 | ใช้สำหรับหม้อแปลงในระบบจำหน่าย ที่มีขนาดสูงสุดไม่เกิน 250 kVA ค่ากระแสที่ไหลลงนิวทรอลจะมีขนาดเท่ากับกระแสที่ไหลในเฟส   |
| YNd 5 | ใช้สำหรับหม้อแปลงในสถานีไฟฟ้าและหม้อแปลงขนาดใหญ่ โดยค่ากระแสที่ไหลลงนิวทรอลจะมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลในเฟส  |
| Dyn 5 | เป็นหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่าย มีขนาดเกิน 315kVAขึ้นไป โดยค่ากระแสที่ไหลลงนิวทรอลจะมีขนาดเท่ากับกระแสที่ไหลในเฟส  |
| li 0  | เป็นหม้อแปลงเฟสเดียว ที่มีกำลังขั้วเทียบเท่าหม้อแปลง 3 เฟส แต่ต้องต่อกันสามชุด หม้อแปลงชนิดนี้จะใช้ที่ระดับแรงดันสูงและกำลังสูง นอกจากนี้หม้อแปลงชนิดนี้ยังมักใช้เป็นระบบการวัดอีกด้วย |

### 5.7.4 อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ภายในหม้อแปลงกำลัง

5.7.4.1 On Load Tap Changer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ปรับระดับแรงดันให้เหมาะสม เนื่องจากการเปลี่ยนของโหลด โดยการเปลี่ยนระดับแรงดันในช่วงสั้นๆ นั้นจะถูกควบคุมโดย On load tap changer อย่างอัตโนมัติ ซึ่งมันเป็นสิ่งที่มีประโยชน์มากในงานทางด้านอุตสาหกรรมที่มีการเปลี่ยนระดับแรงดันที่หลากหลายเช่น ในกระบวนการทำงานของเตาเผา

ในการปรับ Tab สามารถทำการ Tab ได้ 2 วิธี คือแบบ Manual และ Auto ซึ่งสามารถเลือกการใช้งานได้จาก Motor drive control panel ที่ติดตั้งอยู่ด้านข้างของหม้อแปลง โดยในการปรับแบบ Manual จะใช้ก้านโยก (Hand crack) ที่ติดไว้ข้าง Control Panel เสียบเข้าไปที่สลักเพื่อเป็นตัวหมุน ในส่วนของการปรับแบบ Auto จะทำการ tap โดยใช้มอเตอร์กระแสสลับ 3 เฟส เป็นตัวขับเคลื่อน ให้ tap ของหม้อแปลงไปอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ 5.60 On load tap changer ของบริษัท ABB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7.4.2 ระบบระบายความร้อน เป็นสิ่งสำคัญเพื่อที่จะระบายความร้อนที่ถูกสร้างขึ้นภายในหม้อแปลงกำลัง เนื่องจากจากความสูญเสีย โดยตาราง 5.3 แสดงการระบายความร้อนแต่ละชนิด

ตารางที่ 5.3 ชนิดของระบบระบายความร้อน

| สัญลักษณ์ | ชื่อเต็ม                | อธิบาย  |
|-----------|-------------------------|---|
| O.N.A.N   | Oil Natural Air Natural | ใช้สำหรับหม้อแปลงกำลังตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาด 30 MVA ระบายความร้อนด้วยน้ำมันไหลเวียน   |
| O.N.A.F   | Oil Natural Air Forced  | ใช้สำหรับหม้อแปลงกำลังตั้งแต่ขนาด 30MVA -60MVA ระบายความร้อนด้วยน้ำมันไหลวนและใช้พัดลมช่วยเมื่อจ่ายโหลดมากๆ   |
| O.F.A.F   | Oil Forced Air Forced   | ใช้สำหรับหม้อแปลงกำลังตั้งแต่ขนาดตั้งแต่ 60MVA ขึ้นไป ระบายความร้อนโดยน้ำมันจะไหลวนรอบๆ Cooler ที่มีผิวน้ำมันโดยจะเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนกันระหว่างน้ำมันไปยังอากาศ |
| O.F.W.F   | Oil Forced Water Forced | เป็นการระบายความร้อนจากน้ำมันไปยังน้ำ โดยทั้งน้ำมันและน้ำหล่อเย็นจะไหลวนไปรอบๆ Heat exchanger   |
| A.N.      | Air Natural             | ใช้สำหรับหม้อแปลงกำลังขนาดเล็ก 1.5MVA ระบายความร้อนโดยใช้อากาศรอบข้างเป็นตัวระบายความร้อน   |

5.7.4.3 ถังเก็บน้ำมันสำรอง (Oil Conservator) ทำหน้าที่เก็บน้ำมันสำรองโดยติดตั้งอยู่ด้านบนของหม้อแปลง มีปริมาณน้ำมัน 10%ของน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุอยู่ในตัวถังและ On load tap changer รวมกัน ส่วนประกอบภายในของถังเก็บน้ำมันสำรองสำหรับการติดตั้ง Flexible Separator ซึ่งจะมีผลดีกว่าการใช้ตัวถังเก็บน้ำมันเพียงอย่างเดียว โดย Flexible Separator จะเป็นตัวป้องกันระหว่างน้ำมันกับอากาศ และน้ำมันกับความชื้นหรือไอน้ำ อีกทั้งยังช่วยป้องกันการสร้างฟองอากาศของน้ำมันอีกด้วย

5.7.4.4 Air Breather/Dryer ทำหน้าที่ป้องกันความชื้นจากอากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมของน้ำมันหรือทำให้อายุการใช้งานสั้นลง โดยภายในหลอดแก้วจะบรรจุสารประเภท Silicagel ซึ่งเป็นสารสีฟ้าหรือสีเทา โดยจะกลายเป็นสีชมพูเมื่อมีความชื้นสูงขึ้น เมื่อ Silicagelหมดอายุก็ทำการเปลี่ยนโดยการเติมเข้าไปใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7.4.5 Radiators เป็นโครงสร้างที่เป็นทางผ่านของน้ำมันหม้อแปลงที่ไหลวนภายใน เพื่อใช้ในการระบายความร้อน โดยมีรูปร่างเป็นคลีบเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการระบายความร้อน

5.7.4.6 พัดลม (Fan) ใช้ในระบบ Cooling ของหม้อแปลง ตามคำสั่งจากอุปกรณ์ควบคุม ในการเลือกควรเลือกให้เหมาะสมกับการทำงานแบบจ่ายโหลดเกินพิกัด และควรเลือกให้เหมาะสมกับตำแหน่งของการใช้งานด้วยว่าเป็นการใช้งานแบบภายในอาคารหรือภายนอกอาคาร

5.7.4.7 Bushing ทำหน้าที่เป็นจุดต่อด้านตัวนำปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลัง การเลือกใช้จะต้องพิจารณาขนาดของ Lugs ให้มีขนาดเพียงพอต่อการนำกระแสทั้งด้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำ และ Clearance ของ Bushing จะกำหนดไว้ในมาตรฐาน DIN VDE 0101

5.7.4.8 Instrument Transformer CT และ PT ติดตั้งบนหม้อแปลงบริเวณฐานของ Bushing (เป็นชนิด Window Typed เป็นรูปวงกลมรอบ Bushing) นี้จะทำหน้าที่เพื่อวัดค่ากระแสและแรงดันที่ผ่านเข้าหม้อแปลง แล้วส่งสัญญาณไปที่ตู้ควบคุมภายในอาคารอีกที โดยทั้ง CT และ PT นี้จะหน้าที่เพียงอย่างเดียวคือ Metering ไม่ได้นำมา Protection โดยการทำงานจะส่งสัญญาณให้รีเลย์ต่างๆ ในระบบป้องกัน

5.7.4.9 กั๊บบดักฟ้าผ่า (Surge Arrester) ทำหน้าที่ลด Peak ของแรงดันเสิร์จชนิดต่างๆ ที่วิ่งเข้ามาที่หม้อแปลงกำลัง เพื่อนำเสิร์จให้ลงดิน เป็นการป้องกันหม้อแปลง สำหรับขนาดของ กั๊บบดักฟ้าผ่าที่ใช้สำหรับหม้อแปลงในระบบ 115/24kV จะเลือกใช้ขนาด 132kV และมีการติดตั้ง Surge counter ไว้เพื่อเก็บข้อมูลจำนวนครั้งที่เกิดแรงดันเสิร์จเข้าวิ่งเข้ามาในระบบ

5.7.4.10 Control Panels/Cabinets เป็นตู้ที่ติดตั้งอยู่ภายในอาคารควบคุม (Control Building) ซึ่งมีหน้าที่เพื่อตั้งค่าต่างๆ เช่น ระบบ Coolant, Temp Control เป็นต้น และทำหน้าที่สั่งงานอุปกรณ์ต่างๆ เช่น การสั่งทำงานของการ tap หม้อแปลง และหน้าที่ตรวจสอบสถานะของ อุปกรณ์ต่างๆ ของหม้อแปลงไม่ว่าจะเป็นสัญญาณการเกิด Alarm ที่มาจากอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลง หรือการอ่านค่าที่วัดได้จาก CT และ PT ของหม้อแปลง

### 5.7.5 ความสูญเสีย (losses)

ความสูญเสียในหม้อแปลงมี สองชนิด คือ

5.7.5.1 No-load loss เกิดขึ้นขณะป้อนไฟ (energize) เข้าขดลวดหม้อแปลงขดหนึ่ง และขดที่เหลือไม่ต่อกับ load หรือ open ไว้ กระแสที่ไหลในขดลวดขณะนั้นเรียกว่า no-load current รูปร่างของกระแสจะเพี้ยนรูป ไม่เป็น sinusoidal wave เพราะประกอบด้วยกระแส harmonic และ จะเพี้ยนรูปมากขึ้นในขณะที่ยังเพิ่มสูงขึ้น เป็นเพราะแกนเหล็ก (steel core) มีคุณลักษณะเป็น non-linear กระแส no-load และ loss มีความสัมพันธ์กับ flux density, frequency, ปริมาณเหล็ก / ชนิดของเหล็ก (grade) / ความหนาของเหล็กที่ใช้ทำแกน ตลอดจน การออกแบบและเทคนิคการประกอบแกนเหล็ก การวัด no-load loss ต้องคำนึงถึง เครื่องมือวัด เพราะ กระแสที่วัดมี harmonic ผสมอยู่ และกระแสมี power factor ต่ำมาก

5.7.5.2 load loss ความสูญเสียนี้เกิดขึ้นในขณะที่ยังหม้อแปลงจ่าย load ความสูญเสียเกิด จากความต้านทานของลวดตัวนำ  $I^2R$ , eddy current loss ในขดลวด และ stray loss ใน ส่วนประกอบที่เป็นเหล็ก เช่น tank, core clamp load loss ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่คือ  $I^2R$  และส่วนที่ เหลือเป็น loss ที่เกิดจาก leakage flux ขดลวด มีลักษณะที่เกิดจากการพันลวดตัวนำแต่ละ turn ทับกันแน่น และแต่ละขดมีลักษณะเกี่ยวกันหรือสัมพันธ์กันด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic coupling) ในขณะ no-load ส่วนใหญ่ของ magnetic flux จะไหลวนอยู่ในแกนเหล็ก เมื่อจ่าย load จะเกิด ampere-turn ของขดลวดแต่ละขด ทำให้เกิด leakage flux ไหลอยู่ในช่องว่าง ระหว่างขดลวด มีผลทำให้ flux ทั้งหมดไม่ได้คล้องขดลวดทั้งหมดเท่ากัน leakage flux ที่ เกิดขึ้นจะมีผลทำให้

- เกิดแรงระหว่างขดลวดที่มี short circuit ไหลผ่าน
- เกิด eddy current loss ในลวดตัวนำของขดลวด
- เกิด stray loss ในส่วนที่เป็นเหล็ก
- ต้องใช้ reactive power และทำให้เกิด reactive voltage drop

### 5.7.6 guarantee และ tolerance

ผู้ผลิตหม้อแปลงต้อง guarantee ค่า impedance และ losses ที่ตำแหน่ง normal tap และถ้าจำเป็นต้องขานหม้อแปลงจำเป็นต้อง guarantee ค่า ที่ตำแหน่งอื่นด้วย impedance และ losses อาจแตกต่างจากค่าที่ออกแบบได้เนื่องจากวัสดุที่ใช้และการผลิตค่าที่ต่างไปจากค่า กำหนดที่ยอมรับได้ เรียกว่าค่า tolerance

- no-load และ load losses = 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ impedance at normal tap position =  $\pm 7.5-10\%$  นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.7.7 ความแข็งแรงทางกลของขดลวดขณะเกิดลัดวงจร (short circuit withstand)

ในขณะที่เกิดลัดวงจรในระบบ หม้อแปลงจะมีกระแสลัดวงจรไหลผ่านมีค่าสูงกว่ากระแสปกติมากหลายเท่า ผลที่เกิดขึ้นกับขดลวดคือ เกิดความร้อน และแรงทางกลสูง ผู้ผลิตหม้อแปลงจึงต้องออกแบบ และผลิตให้สามารถทนสภาพนั้นได้ ผู้ซื้อต้องระบุค่า fault level ให้เหมาะสมด้วย เราสามารถลดโอกาสที่จะเกิดลัดวงจรและความเสียหายได้หลายวิธี เช่น

- ใช้ insulation tape พันที่ bus
- ใช้ neutral หรือ series reactor เพื่อลดกระแสลัดวงจร และไม่ให้ fault รุนแรง
- แยก bus ออกเป็นสองส่วนเพื่อลด fault level
- ลดจำนวนครั้งของ auto-reclosing
- ถ้าไม่ใช้ tertiary winding ควร insulate ตรงส่วน terminal หรือถ้าไม่จำเป็นต้องใช้จ่าย load ก็ไม่ต้องต่อออกมาภายนอก

### 5.7.8 ความดังของเสียง (sound level)

เสียงที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลงทำให้เกิดความรำคาญ ในขณะที่ no-load จะเกิดเสียง ' ฮัม ' จากแกนเหล็กซึ่งเกิดจากแผ่นเหล็กที่ใช้ทำแกนสันเป็นผลจาก magnetic force เสียงนี้จะเดินทางผ่านน้ำมันไปยังผนัง และต่อไปยังภายนอก เสียงเกิดขึ้นด้วยหลายปัจจัย เช่น magnetostriction ส่วนหนึ่งมาจากการสั่นของแกนเหล็ก เนื่องจาก alternating magnetic flux ที่ไหลในแผ่นเหล็กจะทำให้พื้นที่หน้าตัดแผ่นเหล็กยืดออกเล็กน้อยและหดกลับตลอดเวลาที่ถูก magnetize ความถี่ที่เกิดขึ้นจะมีระดับเป็น 2 เท่าของความถี่ของ flux ฉะนั้นในระบบ 50 Hz ความถี่ของการสั่นที่เกิดขึ้น คือ 100, 200 Hz โดยความรุนแรงของ mechanical vibration ขึ้นอยู่กับการรัดแกนว่าแน่นเพียงใด ขนาดและเกรดของแผ่นเหล็ก และรวมถึงส่วนที่เป็น structure และยังสามารถเกิดจากการสั่นของ tank wall หรือการ damping

จากปัญหาทั่วไปพบว่ามาจากส่วนแรกเป็นส่วนใหญ่คือ magnetostriction ตามวัตถุประสงค์ของมาตรฐาน ให้คำจำกัดความของ เสียงฮัมของหม้อแปลง คือ เสียงที่วัดได้จากเครื่องวัด sound level meter ซึ่งประกอบด้วย microphone, attenuator, amplifier, และ indicating meter เครื่องมือวัดจะวัดค่า sound pressure ระบุค่าเป็น logarithm scale ที่ปรับหน่วยเป็น dB

### 5.7.9 การใช้หม้อแปลงให้คุ้มค่า

ในการลงทุนมีความจำเป็นต้องพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์ เช่น การพิจารณาว่าจะซื้อหม้อแปลงขนาดเท่าไรจึงจะเหมาะสมกับ load ในกรณีหม้อแปลงเกิดเสียหายควรซื้อทดแทนหรือซ่อม หรือเวลาใดควรเปลี่ยนพิกัด (capacity) ของหม้อแปลงให้เหมาะสมกับ load ที่กำลังเพิ่มขึ้นเป็นต้น ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นมักจะพิจารณาจาก

- เงินก้อนที่ลงทุน ในที่นี้คือราคาหม้อแปลง
- ค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องจ่ายเนื่องจาก transformer losses ซึ่งตลอดอายุการใช้งานอาจมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าราคาหม้อแปลง ค่าใช้จ่ายในการ operating และ maintenance มักจะไม่ได้นำมาพิจารณาในช่วงแรกเพราะน้อยกว่าค่าใช้จ่ายที่กล่าวมา

### 5.7.10 ค่าใช้จ่ายเนื่องจากพลังงานสูญเสีย

พลังงานที่สูญเสียในหม้อแปลงแบ่งเป็นสองชนิด

1. No-load loss เกิดจากแกนเหล็ก ความสูญเสียชนิดนี้อาจกำหนดให้มีค่าคงที่ในขณะที่หม้อแปลงถูก energized
2. Load loss ความสูญเสียชนิดนี้จะเปลี่ยนแปลงตาม กระแสยกกำลังสอง(1) การคิดเรื่องราคา ค่า losses อาจคิดได้สองแบบคือคิดว่ามีค่าใช้จ่ายเท่าไรในการผลิตและส่งไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟให้ losses ที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งาน หรือคิดว่าต้องเสียเงินซื้อกระแสไฟฟ้าเท่าไรในส่วนของ losses ที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งานราคา ค่า losses ของผู้ผลิต จะไม่อยู่บนพื้นฐานเดียวและเท่ากับราคา ค่า losses ของผู้ซื้อไฟเนื่องจากต้นทุน unit price ไม่เท่ากัน no-load loss ซึ่งให้มีค่าคงที่ตลอดเวลาที่ energize หม้อแปลง จึงไม่ยุ่งยากในการหาค่าตลอดการใช้งาน ซึ่งอาจให้ค่ากระแสไฟฟ้าแปรตาม inflation rate ในแต่ละปี และคำนวณกลับเป็นค่าปัจจุบัน (present worth) ด้วยอัตราดอกเบี้ยต่อปี load losses ที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งานจะซับซ้อนกว่า เพราะในแต่ละวัน load ไม่คงที่และเพิ่มขึ้นเป็นระยะ ๆ ตลอดการใช้งาน ถ้าเป็นส่วนของผู้ซื้อจะมีเรื่องราคา ค่าไฟในแต่ละช่วงเวลาและหรือมี demand charge เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งต้องคำนวณแต่ละเวลาให้เหมาะสม ส่วนผู้ผลิตถ้าเฉลี่ยราคาผลิตเท่ากับตลอดวันอาจใช้วิธี average เพื่อหา load factor หรือ losses factor นอกจากนั้นต้องพิจารณาการเพิ่มของ load ในแต่ละปีด้วย เช่นเดียวกันต้องทำเป็นค่าปัจจุบันและรวมกับส่วนที่เกิดจาก no-load loss เป็นค่าใช้จ่ายรวมที่ต้องลงทุนในเรื่อง losses ตลอดการใช้งาน

### 5.7.11 การตัดสินใจลงทุนซ่อมหรือเปลี่ยนใหม่ (repair or replace)

ในเวลาที่หม้อแปลงเสียหายจำเป็นต้องตัดสินใจเรื่องการลงทุนว่าสมควรซ่อมหรือเปลี่ยนหม้อแปลงใหม่ จึงต้องใช้ข้อมูลพิจารณา คือ ค่าใช้จ่ายเรื่อง losses ของทั้งลูกเก่าและใหม่ ราคา ค่าซ่อมลูกเก่าและราคาหม้อแปลงใหม่ รวมค่าใช้จ่ายของแต่ละลูกแล้วนำมาเปรียบเทียบ

เอกสารที่นี้ เรื่องช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณอาจเป็นปัญหายุ่งยากเพราะลูกเก่าที่ซ่อมเสร็จจะมีอายุที่ไม่เท่ากัน เรื่องนี้ถ้าผู้ขายหม้อแปลงไม่ยอมเปิดเผยข้อมูลให้ทราบก็ยากที่จะเปรียบเทียบ การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลือสั้นกว่าลูกใหม่ ในการพิจารณาเปลี่ยนหม้อแปลงก่อนหมดอายุก็มีความยุ่งยากเรื่อง  
ช่วงเวลาเช่นเดียวกัน

### 5.7.12 การติดตั้งหม้อแปลง

1. ควรมีการตรวจสอบทั่วไป (visual inspection) ภายนอกเมื่อหม้อแปลงมาถึงท่าเรือ arrival check ด้วยการ inspection ก่อนที่จะยกขึ้นท่า (unloading) อ่านค่าความดัน ในโตรเจนที่บรรจุมา ต้องยังคงแสดงค่าเป็นบวก วัดความชื้นภายในหม้อแปลงด้วย dew point meter ตรวจสอบความเสียหายภายนอกเช่น มีรอยกระแทกเกิดขึ้นหรือไม่ และดูข้อมูล shock recorder ที่บันทึก เปลี่ยน battery ในเครื่อง shock recorder
2. ตรวจสอบด้วยวิธีเดียวกันหลังจากขนมาถึงสถานที่ติดตั้ง และหลังนำขึ้นวางบนแท่น
3. ตรวจสอบ part ต่างๆ ที่จะใช้ติดตั้ง เช่น bushing, radiator และ accessories
4. ตรวจสอบสภาพฉนวน condenser type bushing ด้วยวิธี dielectric loss measurement (tan delta) แล้วเทียบกับผลทดสอบของผู้ผลิต (ถ้ามี)
5. ตรวจสอบสภาพภายในหลังจากเปิด cover plate เพื่อติดตั้ง bushing และควรตรวจสอบให้มากที่สุด ต้องระวังว่าภายในบรรจุด้วย dry air ไม่ใช่ ก๊าซไนโตรเจน เวลาที่ตรวจสอบควรสั้นที่สุดเพื่อป้องกันความชื้นซึมเข้าผิวของฉนวนลึกลงไป
6. ประกอบ bushing, radiator, conservator, cooling fan, control cubicle, และ accessories
7. บางกรณีต้องมีการปลดอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพื่อการขนส่ง เช่น lock อุปกรณ์ชุด OLTC ซึ่งต้องศึกษาคู่มือของ OLTC
8. กรณีที่มี hot line oil filter ของ OLTC ต้องเปิดตรวจสอบและต้องติดตั้ง filter และ สารที่ใช้ดูดความชื้นในน้ำมัน
9. ตรวจสอบสภาพฉนวนของ core ในกรณีที่มีการออกแบบให้สามารถปลดสายที่ต่อลง ตัวถังได้จากภายนอก, ของขดลวดทั้งหมดเทียบกับ ground ด้วย insulation resistance meter (megger ohm meter) แล้วเทียบกับผลทดสอบของผู้ผลิต (ถ้ามี)
10. วัด voltage ratio ทุก tap
11. วัดค่า exciting current ด้วย low voltage แล้วเทียบกับ ผลทดสอบของผู้ผลิต (ถ้ามี)
12. วัดค่า winding resistance
13. วัดค่า dielectric loss ทั้งตัวก่อนเติมน้ำมัน
14. ทำการปั๊มอากาศออกจากถัง (vacuum) เพื่อเติมน้ำมันเข้าภายใต้สภาวะสุญญากาศและทดสอบหารอยรั่ว ให้ระวังห้อง OLTC ซึ่งอาจต้องทำการต่อท่อระหว่าง main tankและห้องของ OLTC ให้ถึงกัน เพื่อป้องกันห้อง OLTC เสียหายเนื่องจากแรงดันในถังต่ำกว่า และรวมถึงถุงยาง (rubber bag) ที่อยู่ภายใน conservator tank
15. ควรต่อท่อ vacuum จาก pump เข้าที่ valve บนใต้ cover plate (ไม่ควรต่อเข้าที่ valve ของ conservator tank) จะไม่เกิด condense เป็นหยดน้ำตกอยู่ภายใน conservator tank (สำหรับ

หม้อแปลงเก่าจะเกิดน้ำกลั่นตัวตกค้างอยู่ภายในมาก) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. รักษาระดับ vacuum pressure ไว้ก่อนเติมน้ำมันด้วยเวลาที่ผู้ผลิตแนะนำ
17. ทำการ purify น้ำมัน วัดค่า dielectric strength ต้องมีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับผู้ผลิตกำหนด โดยคำนึงถึงอุณหภูมิของน้ำมันและมาตรฐานการทดสอบ
18. หลังจากได้เวลา จึงเติมน้ำมันเข้า tank
19. ตรวจสอบหารอยรั่ว โดยใช้ dry air หรือ ก๊าซไนโตรเจนใส่เข้าที่ conservator ด้วยความดันไม่เกิน 0.3 bar เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.
20. เมื่อน้ำมันเย็นแล้วให้วัดค่า dielectric ของน้ำมันอีกครั้ง
21. วัด insulation resistance ของขดลวด
22. วัดค่า dielectric loss ของขดลวดกับถัง และขดลวดกับขดลวด และของน้ำมัน
23. ตรวจสอบการเดินสาย (wiring) ของชุด ควบคุม ระบบป้องกัน และระบบเตือนภัย
24. ตรวจสอบการทำงานของ OLTC, cooling, ระบบป้องกัน ระบบเตือนภัย
25. ตรวจสอบตัว breather, silica-gel
26. การทำงานของ OLTC และ cooling fan
27. เก็บตัวอย่างน้ำมันเพื่อทำ dissolved gas analysis เพื่อเป็น reference
28. no-load energize เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 6 ชั่วโมง
29. ตรวจสอบอุณหภูมิ เสียง การสั่น รอยรั่ว ระดับน้ำมัน
30. พร้อมจ่าย load ได้

### 5.7.13 การบำรุงรักษาหม้อแปลง

ถ้าพิจารณาพื้นฐานของการออกแบบแล้ว ไม่จำเป็นต้องปลดหม้อแปลงออกจากระบบเพื่อทำการบำรุงรักษาบ่อยนัก อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องปลดเพื่อตรวจสอบและบำรุงรักษาบางอย่างควรหลีกเลี่ยงการเปิดหม้อแปลงเพื่อตรวจสอบสภาพภายใน ยกเว้นมีข้อมูลแสดงว่าเกิดความเสียหายขึ้นภายใน และได้พิจารณาอย่างรอบคอบแล้วว่า มีความจำเป็นต้องปลดเพื่อตรวจสอบสภาพ

### 5.7.14 การตรวจสอบประจำวัน

การตรวจสอบสภาพทั่วไปส่วนใหญ่เป็น visual inspection สภาพหม้อแปลงต่างๆ ไป

1. ตรวจรอยรั่วซึมของน้ำมัน มองหาคราบน้ำมัน
2. สภาพภายนอก bushing สีของถัง ภายในตู้ OLTC driving mechanism
3. breather และ silica-gel ของ main tank และของ OLTC
4. เสียงดังจากการทำงานที่ผิดปกติ
5. มาตรวัดต่างๆ เช่น volt-meter amp-meter, temperature indicator, oil level gauge, tap-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

position indicator การตรวจสอบจะเป็น visual check เปรียบเทียบกันเองเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างช่วงเวลา

### 5.7.15 การตรวจสอบเป็นระยะ เช่น ทุก 6 เดือน/ 1ปี

การตรวจสอบสภาพภายในด้วย dissolved gas analysis : DGA เป็นการตรวจสอบเพื่อให้ทราบถึงสภาพภายในหม้อแปลงขณะใช้งานโดยที่ไม่จำเป็นต้องปลดหม้อแปลงออกจากระบบ ความถี่ในการตรวจสอบขึ้นอยู่กับ ความสำคัญของหม้อแปลง และ capacity เช่น ทุก ๆ 6 เดือน ทุกหนึ่งปี หรือในกรณีที่ตรวจพบว่ากำลังเริ่มเกิดความเสียหายขึ้นในหม้อแปลงอาจต้องทุก 7 วันหรือทุกวัน หลังเก็บน้ำมันที่ bottom valve ได้แล้ว ต้องรีบส่งให้ห้องปฏิบัติการตรวจวัดโดยเร็ว ผลการตรวจวัดหาก๊าซ จะทราบถึงถึงปัญหาที่เกิดขึ้น ดังนี้

1. มี hydrogen gas สูง และ มี hydrocarbon gas ต่ำ แสดงถึงเกิด partial discharge
2. มี hydrogen gas สูง และ มี hydrocarbon gas สูง ยกเว้น acetylene gas แสดงว่าเกิด overheat ที่บริเวณจุดต่อ ถ้าจุดที่เกิดมีฉนวนกระดาษอยู่ด้วยก็จะพบ carbon dioxide gas สูงด้วย สัดส่วนของปริมาณ hydrocarbon gas ต่าง ๆ ที่นำมาจับคู่เปรียบเทียบกัน จะทำให้ทราบถึงอุณหภูมิที่จุดนั้นได้
3. มีก๊าซ เช่นเดียวกับกรณีที่เกิด overheat และพบ acetylene ด้วยแสดงว่าเกิด arc
4. ก๊าซ carbon dioxide และ carbon monoxide เกิดขึ้นจากการใช้งานปกติ ฉนวนประเภท cellulose เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นที่ลวดตัวนำขณะจ่าย load ความแม่นยำของเครื่องมือ วิธีการเก็บตัวอย่าง วิธีการวิเคราะห์ เป็นเรื่องสำคัญการวิเคราะห์จะใช้ พิจารณาจาก key gas, ratio method, ปริมาณก๊าซ, rate of increase, และเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซจากการวิเคราะห์ครั้งก่อน น้ำมันจะเสื่อมสภาพในขณะที่ใช้งานเนื่องจากขบวนการ oxidation หากมีความชื้น และอากาศผสมอยู่ในน้ำมันมากจะเกิดอย่างรวดเร็ว มีกรด และ sludge เกิดขึ้นสามารถสังเกตได้จาก น้ำมันเปลี่ยนสีจากสีใสเป็นสีเหลือง และน้ำตาลเข้มมากขึ้นเรื่อยๆ

### 5.7.16 การ Overhaul OLTC และ อุปกรณ์เครื่องกรองน้ำมัน

ควรทำตามวิธีบำรุงรักษา และระยะเวลาที่ผู้ผลิตกำหนด พร้อมจดบันทึกรายละเอียดสภาพ contact เพื่อวางแผนการทำงานในครั้งต่อไป เช่นทุก 50,000 ครั้ง หรือทุก 5 ปี อาจรวมถึงการทาสี tank ใหม่บางส่วน และเปลี่ยนพวก ประเก็นของ cover และของขอบประตู control cabinet

### 5.7.17 การตรวจวัดหาปริมาณน้ำในน้ำมัน

น้ำเป็นตัวที่ทำอันตรายต่อฉนวนประเภท cellulose คือ กระดาษ และ press board ทำให้ค่าความเป็นฉนวนลดลง และเร่งการเสื่อมสภาพ (ageing) ให้เร็วขึ้น ปกติน้ำจะเกิดจากการใช้งานด้วยขบวนการ oxidation ของฉนวน cellulose จึงจำเป็นต้องตรวจสอบว่าความชื้นยังอยู่ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับต่ำ มีวิธีการตรวจสอบหลายวิธีแม้ว่าการตรวจวัดน้ำยังแสดงผลว่ามีน้ำอยู่ในระดับต่ำ แต่วิธีวัดจากน้ำมันใช้บอกเฉพาะปริมาณน้ำที่ละลายอยู่เท่านั้นจึงไม่สามารถบอกว่ามีน้ำรั่วเข้าเฉพาะตำแหน่งเป็น free water ปริมาณน้ำที่ละลายอาจแสดงค่าไม่สูงมาก แต่จนวนอาจจะขึ้นมาก ซึ่งต้อง dry out มีเครื่องมือใช้ตรวจวัดหาปริมาณน้ำในปัจจุบันหลายอย่างดังนี้

1. Dew point measurement เป็นการบอกความชื้นที่ผิวของจนวน ในกรณีที่หม้อแปลงเป็นชนิด nitrogen filled ในขณะที่เกิดสภาพสมดุล (equilibrium) คือ ความดันของความชื้นที่เป็น partial pressure ในก๊าซ จะเท่ากับ partial pressure ของความชื้นที่

ผิวของจนวน และของความชื้นในน้ำมัน จึงสามารถวัด dew point ของก๊าซเพื่อเทียบหาความชื้นในกระดาษ และในน้ำมันได้ การวัดด้วยวิธีนี้สามารถบอกแนวโน้มว่า มีน้ำสูงเกินกำหนดจนถึงระดับที่เป็นอันตรายกับหม้อแปลงหรือไม่

2. Oil test เช่นเดียวกัน ถ้าเป็นหม้อแปลงชนิด oil filled ในสภาพ equilibrium ความดันของความชื้นที่เป็น partial pressure ในน้ำมัน จะเท่ากับ partial pressure ของความชื้นที่ผิวของจนวน การวัดหาความชื้นในน้ำมันด้วยวิธี Karl Frischer สามารถนำมาหาค่าความชื้นในจนวนได้เช่นเดียวกันมีข้อแนะนำว่าการเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบควรเก็บขณะที่หม้อแปลงมีอุณหภูมิร้อน เพราะน้ำในจนวนจะออกมาละลายในน้ำมันมากกว่าในขณะที่หม้อแปลงเย็น

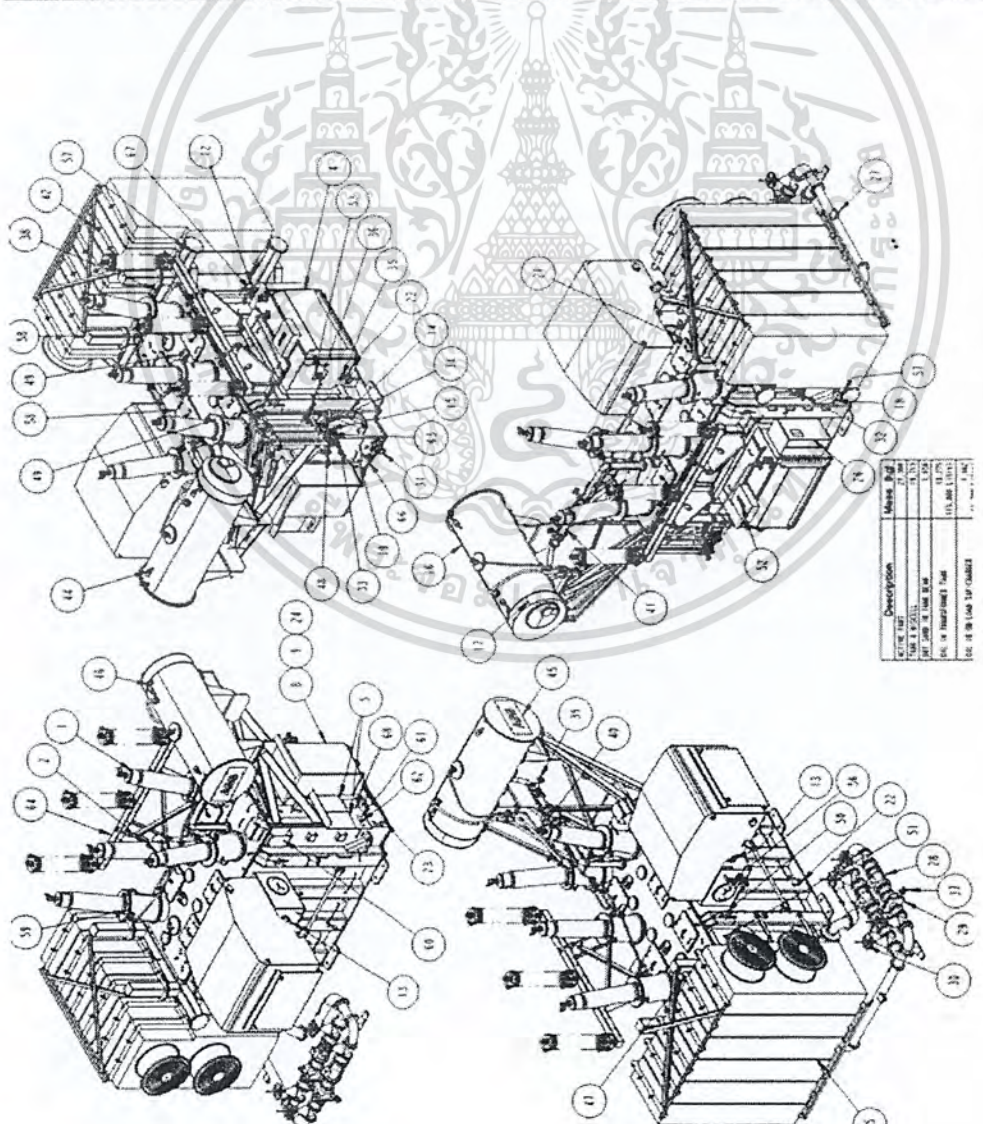
3. Insulation resistance วิธีนี้ใช้เพื่อเป็นการเปรียบเทียบค่า ก่อน และหลัง dry out หรือ บอกแนวโน้มว่ามีปัญหาเรื่องความชื้น การวัดค่าหาที่ที่หนึ่งเทียบกับนาที่ที่สิบ (PI: polarization index) ยังคงใช้ได้ในการตรวจสอบหม้อแปลงที่กำลังใช้อยู่ แต่ต้องระวังขดลวดชุดที่มี OLTC ต่ออยู่ เพราะค่าที่ได้มีผลจากคุณภาพของ OLTC ด้วย

4. Dielectric loss tangent ค่า  $\tan \delta$  ของจนวนที่ดี/แห้งที่อุณหภูมิช่วง 20 - 90°C จะมีค่าไม่ค่อนข้างคงที่ แต่จนวนที่ชื้น ค่า  $\tan \delta$  ที่อุณหภูมิช่วง 20°C จะใกล้เคียงกับจนวนดี แต่ที่ 90°C จะเปลี่ยนแปลงไปมาก การวัดวิธีนี้ก็เป็นบอกถึงแนวโน้มวิธีต่างๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของอุปกรณ์ อุณหภูมิจนวน ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการตรวจสอบและเครื่องมือบางวิธีสามารถทำได้โดยไม่ต้องปลดหม้อแปลง คือวัดด้วย Karl Frischer ซึ่งสะดวก ความถี่ในการวัดควรมีระยะเวลา 6-12 เดือน ขึ้นกับ capacity และความสำคัญของหม้อแปลง

### 5.7.18 การตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำมัน

น้ำมันจะเริ่มเสื่อมสภาพหลังจากเริ่มใช้หม้อแปลงเช่นเดียวกัน นอกจากการวัด dielectric strength แล้ว ควรตรวจสอบ สี ซึ่งจะบ่งบอกถึงระดับของการเสื่อมสภาพได้ ฉะนั้นขณะที่เก็บตัวอย่างน้ำมันทุกครั้งควรพิจารณา สีที่เปลี่ยนไปด้วยเพื่อตัดสินใจทดสอบอย่างอื่นเพิ่มเติม เช่น acid, oxidation inhibitor, interfacial tension, เป็นต้น

| No. | Part Name  | Quantity | Part No. | Part Name  | Quantity | Part No. | Part Name   | Quantity | Part No. |
|-----|--|----------|----------|--|----------|----------|---|----------|----------|
| 1   | TOP COVER  | 1        | 101      | TOP COVER  | 1        | 101      | TOP COVER   | 1        | 101      |
| 2   | TOP COVER GASKET   | 1        | 102      | TOP COVER GASKET   | 1        | 102      | TOP COVER GASKET  | 1        | 102      |
| 3   | TOP COVER BOLT   | 4        | 103      | TOP COVER BOLT   | 4        | 103      | TOP COVER BOLT  | 4        | 103      |
| 4   | TOP COVER NUT  | 4        | 104      | TOP COVER NUT  | 4        | 104      | TOP COVER NUT   | 4        | 104      |
| 5   | TOP COVER WASHER   | 4        | 105      | TOP COVER WASHER   | 4        | 105      | TOP COVER WASHER  | 4        | 105      |
| 6   | TOP COVER LOCKWASHER   | 4        | 106      | TOP COVER LOCKWASHER   | 4        | 106      | TOP COVER LOCKWASHER  | 4        | 106      |
| 7   | TOP COVER LOCKWASHER WASHER  | 4        | 107      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER  | 4        | 107      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER   | 4        | 107      |
| 8   | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER   | 4        | 108      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER   | 4        | 108      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER  | 4        | 108      |
| 9   | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER  | 4        | 109      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER  | 4        | 109      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER   | 4        | 109      |
| 10  | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER   | 4        | 110      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER   | 4        | 110      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER                                    | 4        | 110      |
| 11  | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER  | 4        | 111      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER                                    | 4        | 111      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER                             | 4        | 111      |
| 12  | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER   | 4        | 112      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER                             | 4        | 112      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER                      | 4        | 112      |
| 13  | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER  | 4        | 113      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER                      | 4        | 113      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER               | 4        | 113      |
| 14  | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER   | 4        | 114      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER               | 4        | 114      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER        | 4        | 114      |
| 15  | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER                                    | 4        | 115      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER        | 4        | 115      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER | 4        | 115      |
| 16  | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER                             | 4        | 116      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER | 4        | 116      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER | 4        | 116      |
| 17  | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER                      | 4        | 117      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER | 4        | 117      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER | 4        | 117      |
| 18  | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER               | 4        | 118      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER | 4        | 118      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER | 4        | 118      |
| 19  | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER        | 4        | 119      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER | 4        | 119      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER | 4        | 119      |
| 20  | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER | 4        | 120      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER | 4        | 120      | TOP COVER LOCKWASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER WASHER | 4        | 120      |



รูปที่ 5.61 ส่วนประกอบของ Power transformer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### ทฤษฎีฟ้าผ่าและการป้องกันฟ้าผ่า

จากการที่เราได้ทำการคำนวณระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งผลที่ได้จะได้เป็นขนาดสายตัวนำ การวางระบบสายดินโดยมีระยะห่างระหว่างสายตัวนำในแนวตั้งและแนวนอน ระยะฝังลึกของสายตัวนำ แต่การออกแบบระบบสายดินนั้นไม่ได้ครอบคลุมการป้องกันที่อาจเกิดจากภัยธรรมชาติ นั่นคือ การเกิดฟ้าผ่าลงบนอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงซึ่งมีผลทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์และระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติอย่างหนึ่งซึ่งสร้างความเสียหายให้แก่ชีวิตและทรัพย์สินได้เป็นอันมาก ดังนั้นมนุษย์จึงได้พยายามคิดค้นวิธีป้องกันฟ้าผ่าขึ้นมา การป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่าที่คิดขึ้นมาตั้งแต่ยุคแรกจนถึงปัจจุบันซึ่งใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยมากขึ้น

การป้องกันฟ้าผ่าในปัจจุบันยังใช้วิธีใช้ตัวนำล่อฟ้าในการป้องกันพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบก็มีค่าคงที่และตัวแปรไม่กี่ตัว

ในประเทศไทยการศึกษาปัญหาเกี่ยวกับการป้องกันฟ้าผ่ามีน้อยมาก ข้อมูลต่าง ๆ ก่อนข้างที่จะหายาก ซึ่งถ้ามีการศึกษาวิจัยอย่างมีหลักเกณฑ์แล้ว เราสามารถจะออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าให้ถูกต้องเหมาะสมตามหลักวิศวกรรมศาสตร์และเศรษฐศาสตร์ได้และช่วยลดความเสียหายจากการถูกฟ้าผ่าได้

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าคือการดีสชาร์จทางไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆ การศึกษาถึงกระบวนการเกิดฟ้าผ่ามีนักวิจัยหลายคนได้ศึกษาและอธิบายถึงกระบวนการในการเกิดฟ้าผ่าไว้ ซึ่งทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับกันในการอธิบายถึงการเกิดประจุจากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลก คือ ทฤษฎีของ Simpson ที่ได้อธิบายถึงการเกิดประจุในก้อนเมฆ

#### 6.1 ทฤษฎีฟ้าผ่า

6.1.1 ปรากฏการณ์และกลไกการเกิดฟ้าผ่า การก่อรูปของก้อนเมฆก้อนเมฆมีการสะสมประจุเนื่องจากลมและอากาศที่แปรปรวน ความแปรปรวนมีอยู่ 2 ประเภท คือ Heat Storm เกิดขึ้นในวันที่อากาศร้อน และ Frontal Storm เกิดขึ้นจากกลุ่มก้อนเมฆในอากาศที่เย็นกว่า โดยทั่วไปแล้วประจุที่สะสมในก้อนเมฆเกิดจากการเสียดสีระหว่างกระแสลมพายุกับละอองน้ำ และก้อนเมฆในบรรยากาศ การเสียดสีทำให้ละอองน้ำมีประจุเป็นลบและบรรยากาศเป็นประจุบวก กระแสลมพัดพาขึ้นสู่เบื้องบนของก้อนเมฆทำให้ส่วนบนของก้อนเมฆมีประจุบวกอยู่มาก ส่วนละอองน้ำที่มีประจุลบเมื่อถูกพัดพาขึ้นไปกระทบกับอากาศเย็นที่อยู่ข้างบนก็จะกลายเป็นเกล็ดน้ำแข็งตกลงมารวมกันด้านล่าง ทำให้ด้านล่างของก้อนเมฆมีประจุเป็นลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.2 การแบ่งประจุ เมื่อมีประจุสะสมในก้อนเมฆทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างกลุ่มประจุบวกและกลุ่มประจุลบ หรืออาจทำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำกับพื้นโลก ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นเมื่อค่าประจุสะสมมากขึ้น ซึ่งเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงถึงจุดวิกฤตแล้วจะเกิดการเบรกดาวน

6.1.3 การดิสชาร์จประจุ การดิสชาร์จเริ่มจากการที่ชั้นนำฟ้าผ่าเคลื่อนที่ลงมาใกล้พื้นดิน หรือวัตถุที่มีระยะห่างค่าหนึ่งซึ่งระยะนี้เรียกว่าระยะเฉื่อย ในรูปการแตกตัวของประจุที่เป็นลักษณะของโคโรนาชั้นนำฟ้าผ่าจะชักนำให้เกิดการแตกตัวของประจุในชั้นถัดๆ ไปโดยทอดยาวเป็นแบบซิกแซ็กไปสู่จุดที่มีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงที่ยอดของวัตถุ เมื่อชั้นนำฟ้าผ่าวิ่งลงมายังพื้นโลกจะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่พื้นโลกมีค่าสูงซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดสตรีมเมอร์กับพื้นโลกหรือวัตถุที่อยู่บนพื้นโลกซึ่งสตรีมเมอร์นี้จะมีประจุขั้วตรงข้ามกับลำประจุเมื่อนำฟ้าผ่าวิ่งมาบรรจบกับสตรีมเมอร์จะเกิดการเชื่อมถึงกันระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกด้วยลำประจุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงที่เป็นเมตรถึงหลายสิบเมตรโดยมีแกนกลางเป็นพลาสมาไอออนในเซชัน ประจุในก้อนเมฆจะถ่ายเทสู่พื้นโลกตามแนวของชั้นนำฟ้าผ่าซึ่งเกิดเป็นลำฟ้าผ่าลงมายังโลกและมีกระแสฟ้าผ่าค่ามหาศาล

## 6.2 ลักษณะฟ้าผ่าขึ้นและฟ้าผ่าลง

6.2.1 ฟ้าผ่าลงจะมีลักษณะเป็นแขนงแตกจากลำฟ้าผ่ากระจายลงสู่พื้นโลกมีลักษณะคล้ายรากต้นไม้ทั้งนี้เนื่องจากชั้นนำฟ้าผ่ากรุยทางลงมาหลายๆทางแล้วแต่ว่าทางใดจะขยายทางได้ง่ายกว่า กระบวนการเป็นไปในระยะเวลาอันสั้นและรวดเร็ว

6.2.2 ฟ้าผ่าขึ้นจะเริ่มต้นจากพื้นโลกไปสู่ก้อนเมฆโดยชั้นนำฟ้าผ่าจะเริ่มก่อตัวจากวัตถุหรือสิ่งก่อสร้างสูงๆในพื้นที่ราบจะเริ่มจากยอดโครงสร้างที่สูงและมีกระบวนการเป็นจังหวะของชั้นนำฟ้าผ่าขึ้นไปสู่ก้อนเมฆ

## 6.3 พารามิเตอร์ของการเกิดฟ้าผ่า

6.3.1 ขนาดกระแสฟ้าผ่า เป็นค่าที่จำเป็นและจะต้องรู้ในการออกแบบระบบป้องกันและการคำนวณของระบบโดยจะเป็นการวัดค่ายอดของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

6.3.2 ศักดาไฟฟ้าของฟ้าผ่ามีค่าที่สูงมากซึ่งเป็นขนาดที่มีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและอุปกรณ์หลักในสถานีไฟฟ้าย่อย

6.3.3 รูปร่างของคลื่น กระแส และศักดาไฟฟ้าเป็นแบบอิมพัลส์สามารถบอกได้ด้วยเวลาหน้าคลื่นและเวลาหาคคลื่น โดยเวลาช่วงหน้าคลื่นหมายถึงเวลาที่กระแสเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดของคลื่นและเวลาช่วงหางคลื่นหมายถึงเวลาดั้งแต่เริ่มต้นของคลื่นจนถึงค่าที่กระแสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

6.3.4 ขั้วและประจุ กระแสฟ้าผ่าพบว่าประมาณ 90% ของจำนวนฟ้าผ่าทั้งหมดเป็นกระแสฟ้าผ่าลบซึ่งลำฟ้าผ่าจะนำเอาประจุลบจากก้อนเมฆดิสชาร์จลงสู่พื้นโลกส่วนที่เหลือจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นกระแสฟ้าผ่าแบบบวก ซึ่งลำฟ้าผ่าจะนำเอาประจุบวกจากก้อนเมฆดิสชาร์จลงสู่พื้นโลก ซึ่งกระแสฟ้าผ่าลบจะมีความรุนแรงและรวดเร็วกว่ากระแสฟ้าผ่าบวก

6.3.5 ความถี่ในการเกิดฟ้าผ่า การศึกษาเรื่องความถี่ของการเกิดฟ้าผ่าเพื่อทำให้สามารถทราบได้ว่าบริเวณนั้นมีจำนวนครั้งของฟ้าผ่ามากน้อยเพียงใดเพื่อการป้องกันที่ถูกต้องวิธีโดยอาจพิจารณาได้จากจำนวนวันที่มีสายฟ้าผ่าคะนองในหนึ่งปี

6.3.6 จำนวนครั้งฟ้าผ่าต่อเนื่อง ในบางครั้งอาจพบว่ามียำฟ้าผ่าซ้ำๆ กันตามแนวลำฟ้าผ่าครั้งแรก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าฟ้าผ่าซ้ำ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าไม่มีแขนงเพราะไม่มีการขยายตัวเนื่องจากจะมีช่วงเว้นของฟ้าผ่าซ้ำต่อเนื่องระหว่างครั้งประมาณ 5-30 mm.

6.3.7 ระยะฟ้าผ่าคือระยะระหว่างชั้นนำไฟฟ้าชั้นสุดท้ายที่จะกระโดดไปยังสตรีมเมอร์ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุหรือเกิดฟ้าผ่าลงที่บริเวณนั้น ถ้ากระแสฟ้าผ่าสูงค่าระยะฟ้าผ่าก็จะมาก ถ้ากระแสฟ้าผ่าน้อยค่าระยะฟ้าผ่าก็จะน้อย หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าระยะฟ้าผ่านี้จะขึ้นกับประจุของก้อนเมฆหรือกระแสฟ้าผ่านั่นเอง

### 6.3.8 ผลกระทบและอันตรายจากฟ้าผ่า

#### 6.3.8.1 ผลกระทบด้านไฟฟ้า

6.3.8.1.1 เมื่อเกิดฟ้าผ่าขึ้นจะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปรบกวนระบบสื่อสารและระบบไฟฟ้าที่อยู่ข้างเคียง

6.3.8.1.2 ถ้าศักย์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงพอที่จะให้เกิดการสปาร์คด้านข้างซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายรุนแรงได้

6.3.8.1.3 เกิดแรงดันเกินบนสายส่งเนื่องจากฟ้าผ่าลงบนสายส่งโดยตรงจะทำให้เกิดแรงดันสูงมากเป็นคลื่นจรวิ่งไปบนสายส่งทั้งสองด้านของจุดที่ฟ้าผ่าลงทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ที่ได้รับคลื่นจรวิ่งได้

6.3.8.2 ผลกระทบด้านความร้อน เมื่อวัตถุใดถูกฟ้าผ่าจะเกิดการถ่ายเทพลังงานมหาศาลลงวัตถุนั้นซึ่งถ้าวัตถุนั้นไม่สามารถถ่ายเทพลังงานลงสู่พื้นดินได้ในระยะเวลาอันสั้นอาจทำให้เกิดไฟไหม้หรือเกิดระเบิดอย่างรุนแรงได้

6.3.8.3 ผลกระทบด้านแรง กระแสฟ้าผ่าที่มีค่าสูงมากจะทำให้เกิดแรงทางกลขึ้นซึ่งอาจจะเป็นแรงดึงตูดหรือผลักหรือแรงบิดและแรงอีกชนิดหนึ่งที่เกิดจากความร้อนของฟ้าผ่าทำให้เกิดการขยายตัวของอากาศรอบๆ อย่างรวดเร็วทำให้เกิดคลื่นเสียงดังสนั่นหวั่นไหวที่เรียกว่าฟ้าร้องนั่นเอง

## 6.4 อันตรายของฟ้าผ่าต่อสิ่งมีชีวิต

6.4.1 การถูกฟ้าผ่าโดยตรง เป็นอันตรายอย่างมากอาจทำให้หัวใจล้มเหลวและถึงแก่ชีวิตได้ ในกรณีนี้มีข้อแนะนำคือ ในขณะที่ฝนตกฟ้าคะนองพยายามหลีกเลี่ยงการเดินทางหรือการร่วมในพื้นที่โล่งและควรอยู่ในอาคารที่มั่นคง

6.4.2 การเกิดประกายฟ้าผ่าด้านข้าง กรณีที่มีคนยืนอยู่ใกล้กับวัตถุที่ถูกฟ้าผ่าจะเกิดการเกิดประกายฟ้าผ่าด้านข้างขึ้น เช่น ในขณะที่เกิดฟ้าผ่าลงบนต้นไม้จะเกิดความต่างศักย์ที่สูงระหว่างคนกับต้นไม้เนื่องจากฟ้าผ่าจึงมีกระแสไหลผ่านร่างกายลงสู่ดิน ในกรณีนี้มีข้อแนะนำคือ ในขณะที่ฝนตกฟ้าคะนองอย่ายืนอยู่ใกล้ตัวนำสายไฟฟ้าในระบบสายล่อฟ้าในอาคารโดยเด็ดขาด เพราะหากระบบสายดินของระบบขาดจะเกิดประกายฟ้าผ่าด้านข้าง

6.4.3 การเกิดแรงดันสัมผัส ในกรณีที่คนสัมผัสกับวัตถุที่ถูกฟ้าผ่าจะทำให้เกิดแรงดันสัมผัสขึ้นได้เช่น ผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าย่อยที่สัมผัสกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ถูกฟ้าผ่า ในกรณีนี้มีข้อแนะนำคือ ในขณะที่ฝนตกฟ้าคะนองอย่าอยู่ใต้ต้นไม้ใหญ่เพราะต้นไม้ใหญ่เป็นเสมือนตัวล่อฟ้าผ่าชนิดหนึ่ง

6.4.4 การเกิดแรงดันช่วงก้าว การเกิดฟ้าผ่าลงบนพื้นดินจะมีการไหลของกระแสลงสู่พื้นดินทำให้เกิดความต่างศักย์บริเวณรอบ ๆ ผิวดินระหว่างช่วงเท้าหน้าและเท้าหลังเรียกว่าแรงดันช่วงก้าวซึ่งจะมีค่าน้อยลงถ้าคนยืนให้เท้าอยู่ชิดกัน

จะเห็นว่าปรากฏการณ์ฟ้าผ่ามีอันตรายอย่างยิ่งต่อผู้ปฏิบัติงานและอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อย เราจึงต้องมีการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าร่วมกับกับดักเสิร์จโดยติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันซึ่งจะทำให้การป้องกันฟ้าผ่ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## 6.5 ระบบป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูง

เช่นเดียวกับสิ่งปลูกสร้างโดยทั่วไป สถานีไฟฟ้าย่อยก็ต้องมีระบบป้องกันฟ้าผ่าเช่นเดียวกัน เพราะนอกจากจะสร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินภายในสถานีไฟฟ้าย่อยแล้วยังส่งผลให้ผู้ใช้ไฟฟ้าเดือดร้อนและเศรษฐกิจเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ ดังนั้นจึงต้องทราบถึงวิธีการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าซึ่งมีวิธีการออกแบบต่างจากสิ่งปลูกสร้างโดยทั่วไปโดยวิธีการที่จะได้กล่าวดังต่อไปนี้ใช้ได้กับการป้องกันฟ้าผ่าของสถานีไฟฟ้าย่อยเท่านั้น การป้องกันจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ ดังนี้

6.5.1 ระบบการป้องกันฟ้าผ่าจะป้องกันไม่ให้ฟ้าผ่าลงบนอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยแต่จะให้ผ่าไปยังตัวล่อฟ้าแทน

6.5.2 ระบบรากสายดิน มีหน้าที่นำกระแสฟ้าผ่าให้ไหลลงดิน โดยควรออกแบบให้มีค่าความต้านทานของระบบรากสายดินมีค่าต่ำซึ่งหมายความว่า จะสามารถกระจายกระแสฟ้าผ่าและกระแสฟอลต์ให้ไหลลงดินภายในระยะเวลาอันรวดเร็วทำให้สามารถลดความเสียหายของระบบให้น้อยลงได้

6.5.3 ความทนทานของฉนวนในระบบต่อแรงดันเกิน ฉนวนต้องสามารถทนแรงดันเกินได้ตามที่มาตรฐานกำหนด

สามารถแบ่งฉนวนที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ 2 ชนิด คือ

6.5.3.1 ชนิดที่สามารถกลับคืนสภาพเป็นฉนวนได้อีกหลังจากที่เกิด flashover การเกิด flashover ที่ภายนอกของลูกถ้วยที่ใช้ในสายส่ง (line insulator) เนื่องจากแรงดันฟ้าผ่า (lightning surge) หรือ แรงดันเกินอันเนื่องจากการปลด-สับสายส่ง (switching surge) อาจจะทำให้เกิด ground fault ตามมา เมื่อกระแสลัดวงจรหายไปเนื่องจากการทำงานของ breaker จะพบว่าลูกถ้วยยังคงสามารถใช้งานได้ต่อไปได้ หรือยังสามารถทนแรงดันระบบปกติ (normal system voltage) ได้

6.5.3.2 ชนิดที่ไม่สามารถกลับคืนสภาพเป็นฉนวนได้อีกหลังจากที่เกิด flashover ฉนวนภายในหม้อแปลงประเภทกระดาษ pressboard หรือฉนวนของ cable เมื่อเกิดทะลุเนื่องจากแรงดันเกิน (puncture) จะเกิดความเสียหายถาวรไม่สามารถทนแรงดันระดับปกติได้ต่อไป จุดประสงค์ของการออกแบบ insulation coordination คือ จำกัดความเสียหายให้อยู่ในส่วนของ self-restoring insulation เท่านั้น สามารถทดสอบฉนวน self-restoring เพื่อหา mean flashover (V50) และ standard deviation ( $\sigma$ ) ส่วน non-self-restoring ไม่สามารถทดสอบเช่นเดียวกันนี้ได้ จะทดสอบที่ระดับทนได้ (withstanding) ถ้าผ่านการทดสอบจะแสดงว่า ฉนวนนั้นมีโอกาสสูงมากที่จะทนระดับแรงดันที่ระบุ เรียกว่า basic impulse level หรือ basic insulation level withstand (BIL)

6.5.4 แรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า lightning characteristic ขณะที่เกิดฟ้าผ่า (lightning stroke) จะมีกระแสไหลจากเมฆที่มีประจุ charge สูงไหลลงสู่พื้นดิน ประจุทั้งบวก และลบสามารถไหลลงดินได้ แต่ stroke ส่วนใหญ่จะเป็นประจุลบ ฟ้าผ่า 1 ครั้งอาจประกอบด้วยหลายๆ stroke ต่อเนื่องกัน ช่วงเวลาระหว่างstroke จะอยู่ระหว่าง 1-100 millisecond กระแสจะมีทิศทางเดียว และมีลักษณะเพิ่มขึ้นถึง peakอย่างรวดเร็วในช่วงแรก อาจมีกระแสสูงถึง 1-100 kA เกิดขึ้นภายใน 1-10 microsecond และการลดลงจะช้ากว่าช่วงแรก ทั่วไปช่วงเวลาที่กระแสลดลงครึ่งหนึ่งจะใช้เวลาประมาณ 20-50 micro second การคำนวณกระแสของฟ้าผ่าจะใช้สถิติและโอกาสที่จะเกิดขึ้น จำนวน stroke ขึ้นอยู่กับความสูงของสายส่ง และจำนวนวันในหนึ่งปีที่มีฝนตกฟ้าคะนอง (thunder day) หรือ เรียกว่า Isokeraunic level ตรงบริเวณตำแหน่งที่พิจารณา แรงดันที่เกิดขึ้นจะมีค่า และความชันของรูปคลื่นสูงมากจึงเป็น transient over voltage

การชิลด์ โดยใช้ overhead ground wire ซึ่งคลุมสายส่งที่ต่อเข้าสถานี และในสถานีและใช้เสาหล่อฟ้า (ground mast) ติดตั้งที่โครงเหล็ก (steel structure) เป็นการสร้างบริเวณที่ฟ้าผ่าไม่ถึง (lightning proof zone) บริเวณที่ป้องกันนี้เป็นการป้องกันไม่ให้ฟ้าผ่าลงมาตรงที่สายส่งหรืออุปกรณ์ ค่าความต้านทานดินในสถานี และ บริเวณเสาสายส่ง ต้องมีค่าต่ำเพื่อป้องกันมิให้เกิด back flashover ถ้า shield ได้สมบูรณ์จะมีเฉพาะ surge ที่ไม่รุนแรง (attenuate) ทั้งเรื่องขนาดของแรงดันสูง และความชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.5.5 การคำนวณแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าเมื่อมี stroke บน shield line

สายส่งแรงสูงจะมี overhead ground wire อยู่ส่วนบนคลุมเหนือ line conductors และจะต้องลงดินที่ทุกๆ tower structure แต่ในระบบสายส่ง 500 kV จะมีการ isolated เป็นช่วงๆ ขณะเกิดฟ้าผ่าจะผ่าลงบน ground wire กระแสจะไหลผ่าน ground wire ไปยัง tower ทั้ง 2 ด้าน และไหลลงดินผ่าน structure ซึ่งต้องสร้าง low impedance path เพื่อป้องกันการเกิด back flashover ของ phase insulator บางครั้ง จะมี stroke ที่ลอดผ่าน overhead ground wire (shielding) มาสู่ phase conductor ได้ เราเรียกว่า shielding failure โอกาสที่จะเกิด shielding failure จะมีสูงขึ้นเมื่อเสาสูงขึ้น และ shielding angle มากขึ้น แต่ shielding failure จะลดลงเมื่อ stroke มีกระแสต่ำ จำนวนครั้งของ shield failure ต่อ 100 km-year ของสายส่งจะขึ้นอยู่กับ Isokeraunic level, ความสูงเฉลี่ยของสายส่ง, shielding angle และ insulation level ของลูกถ้วยสายส่ง ขณะที่ฟ้าผ่าลงมาที่เสาของสายส่งที่มี shield กระแสจะแบ่งระหว่าง ground wire และเสา tower

6.5.6 แรงดันเกินสวิตชิง over voltage ที่เกิดจากการทำ switching อาจสูงถึง 4 เท่าของ rated system voltage และ wave shape อาจมีลักษณะ fast oscillation ผสมกับ sine wave ของ power frequency voltage เรียกว่า transient switching over voltage เหตุการณ์ที่สามารถทำให้เกิด over voltage ขึ้นในระบบ ได้แก่ three phase fault, short line fault, ปลด unloaded line หรือ energize capacitor bank, line และ magnetizing current chopping ของ air blast breaker เป็นต้น

### 6.5.7 การลดขนาด over voltage เนื่องจากฟ้าผ่าที่มีผลกับอุปกรณ์

6.5.7.1 การชิลด์ใช้ ground wire shield สายส่ง เพื่อป้องกัน direct stroke ที่มีกระแสสูง ช่วยทำให้ propagated wave ที่วิ่งเข้าหาสถานีไฟฟ้ามี magnitude ลดลง โดย propagated wave มี 2 ลักษณะคือ

- induced stroke ที่เกิดขึ้นบน phase conductor

- back-flashover จาก tower ข้าม insulator ไปสู่ phase conductor แรงดันที่ทำให้เกิด flashover ต้องมากกว่า CFO ของลูกถ้วย

เราสามารถลดโอกาสที่จะเกิด back flashover ได้โดยการทำให้ tower footing resistance ให้ต่ำลง ในสถานีจะมี overhead ground wire และ เสาล่อฟ้า เพื่อ shield ในสถานีเช่นกัน จึงป้องกัน direct stroke ลงอุปกรณ์ที่อยู่ใน switchyard ได้ และมี ground mesh ที่พื้นดินในสถานีและใน control room เพื่อป้องกันมิให้ touch/step voltage สูงจนเป็นอันตรายกับ operator หรือช่างบำรุงรักษา ใน switchyard จะโรยหินไว้เพื่อทำให้พื้นดินใน switchyard ขึ้นมีผลดีกับ ground resistance และเพิ่ม resistance ระหว่างคนกับดิน

### 6.5.8 การพิจารณาออกแบบระดับการฉนวน

การพิจารณา insulation coordination ในสถานี

- หาค่า over voltage ที่อาจเกิดขึ้นจากระบบ
- ถ้ามีค่าสูง จำเป็นต้องทำให้ลดลงด้วย protective device
- กำหนดค่า safety margin ระหว่าง maximum stresses กับ insulation level ของอุปกรณ์
- เลือกค่า standard insulation level ให้อุปกรณ์ต่างๆ

### 6.6 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่ง ที่มักจะเกิดควบคู่กันกับการเกิดพายุฝน ฟ้าผ่า ซึ่งสามารถทำลายทุกสิ่งให้พังพินาศได้ ในปัจจุบันนี้ยังไม่มีอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าใดที่ถูกออกแบบมาเพื่อการรองรับขนาดกระแสฟ้าผ่าได้ นอกเหนือจากทันทานต่อแรงดันเกินอันเกิดจากการสวิตชิงเท่านั้น ขนาดกระแสฟ้าผ่าของประเทศไทยเฉลี่ยแล้วอยู่ที่ประมาณ 40 กิโลแอมป์ โดยฟ้าผ่าส่วนมากจะเป็นชนิดฟ้าผ่าแบบชั่วลบ

จุดประสงค์หลักของการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าเพื่อป้องกันกระแสฟ้าผ่าที่จะทำอันตรายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในบริเวณลานไกไฟฟ้าเท่านั้น สำหรับการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อยที่จะกล่าวถึงนี้ นั้น เป็นการออกแบบโดยการอ้างถึง Preliminary Design โดยมีการกำหนดขนาดความสูงของ Tower ระยะห่างของ Tower เพื่อเป็นการตรวจสอบว่า อุปกรณ์ที่อยู่ภายในลานไกไฟฟ้าจะสามารถถูก shield ด้วยระดับความสูงของ Tower และสาย OGW ที่ใช้เป็นระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับอุปกรณ์ที่อยู่ในเขตป้องกันได้หรือไม่ โดยสิ่งแรกที่เราจำเป็นต้องทราบคือ ระดับความสูง ระยะห่างจากเสาจนถึงอุปกรณ์ ระยะห่างระหว่างเสาที่ติดตั้ง OGW แล้วตรวจสอบความสูง Tower ในแต่ละกรณีก่อนถ้าพบว่าความสูงของ Tower เพียงพอที่จะเป็นระบบป้องกันฟ้าผ่าได้ ก็จะมีระยะต่างๆตามความสัมพันธ์ของกราฟในหัวข้อ กรณีที่มีการติดตั้ง OGW บน Tower แต่ถ้าความสูงของ Tower ไม่เพียงพอ การจะเพิ่มความสูงของ Tower จะทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงมาก ดังนั้นวิธีที่ง่ายและประหยัดมากที่สุดคือเพิ่มความสูงโดยการใช้ Rod เสริมให้มีความสูงรวมกับความสูงของ Tower ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงมีการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจากฟ้าผ่า 3 วิธี คือ

- 1) การป้องกันโดยใช้เสาหล่อฟ้า
- 2) การป้องกันโดยใช้สายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ
- 3) การป้องกันโดยใช้เสาหล่อฟ้าและสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ

#### 6.6.1 การป้องกันโดยใช้เสาหล่อฟ้า

เป็นการป้องกันฟ้าผ่าโดยการใช้ตัวนำล่อฟ้าติดตั้งบนเสาสูงโดยที่ระยะความสูงของปลายตัวนำล่อฟ้าจะสูงไม่เกินค่าระยะเผื่อและมีขอบเขตพื้นที่ปลอดภัยของการติดตั้งอุปกรณ์ตามข้อกำหนด

### 6.6.2 การป้องกันโดยใช้สายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ

เป็นการป้องกันฟ้าผ่าโดยการใช้อัฒนาสายดินล่อฟ้า ติดตั้งเหนือระบบเป็นวิธีการที่นิยมเกทสายเหล็ก โดยมีขอบเขตพื้นที่ปลอดภัยในการติดตั้งอุปกรณ์ตามข้อกำหนด

### 6.6.3 การป้องกันโดยใช้เสาล่อฟ้าและสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบร่วมกัน

เป็นการป้องกันฟ้าผ่าโดยการใช้อัฒนาทั้งสองวิธีข้างบนมารวมกัน ซึ่งเป็นวิธีที่ดี แต่เสียค่าใช้จ่ายสูง ถ้าหากมีการติดตั้งอุปกรณ์สถานีไฟฟ้าห่างออกไปเกินขอบเขตพื้นที่ปลอดภัยของวิธีสายดินล่อฟ้า OGW เพราะไม่มีหรือไม่สามารถสร้างโครงสร้างมาซึ่ง สาย OGW เพื่อให้ครอบคลุมอุปกรณ์สถานีไฟฟ้าแรงสูงได้ เราก็สามารถใช้เสาล่อฟ้ามาเสริมในระบบได้

### 6.6.4 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ

ในการคำนวณการออกแบบการป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูง จะมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

6.6.4.1 ค่า  $Z_s$  (Surge Impedance) ในขณะที่เกิดฟ้าผ่าลงบนระบบส่งกำลังไฟฟ้า

จากสูตร

$$Z_s = 60 * (\ln(2h_e/R_c) * \ln(2h_e/r_c))^{1/2} \quad (6.1)$$

เมื่อ  $Z_s$  = เล็ร์จิมพีแดนซ์ของตัวนำ (โอห์ม)

$h_e$  = ความสูงของอุปกรณ์ที่จะป้องกัน (เมตร)

$R_c$  = รัศมีภายนอกของตัวนำ (เมตร)

$r_c$  = รัศมีภายในของตัวนำ (เมตร)

6.6.4.2 หาค่ากระแสฟ้าผ่า ( $I_s$ )

จากสูตร

$$I_s = (2.2BIL) / Z_s \quad (6.2)$$

เมื่อ

$I_s$  = กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมป์)

BIL = Basic impulse level ของอุปกรณ์ที่ถูกป้องกัน

### 6.6.4.3 หาค่าระยะฟ้าผ่า (S)

จากสูตร

$$S = 8.5 * k * (I_s)^{0.65} \quad (6.3)$$

เมื่อ

S = ระยะฟ้าผ่า (เมตร)

K = ค่าคงที่มีค่า 1.2

### 6.6.4.4 หาค่ารัศมีของพื้นที่ที่ถูกป้องกัน (r)

จากสูตร

$$r = (S^2 - (S - h_m)^2)^{1/2} - (S^2 - (S - h_e)^2)^{1/2} \quad (6.4)$$

เมื่อ

r = รัศมีของพื้นที่ที่ถูกป้องกัน (เมตร)

$h_m$  = take off structure + high mast (เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าปรากฏการณ์ฟ้าผ่า มีอันตรายอย่างยิ่งต่อระบบไฟฟ้าและสิ่งมีชีวิต ดังนั้นในการออกแบบสถานีไฟฟ้าจึงต้องมีวิธีการป้องกันภัยจากการเกิดฟ้าผ่า ด้วยวิธีที่ใช้ค่าใช้จ่ายไม่มากนัก โดยนอกจากระบบป้องกันฟ้าผ่าดังที่ได้แสดงในบทนี้แล้ว เรายังมีวิธีป้องกันอีกชั้นหนึ่ง คือ Surge Arrester โดยจะติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันอีกชั้นหนึ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### การออกแบบระบบการต่อลงดิน

#### 7.1 การออกแบบและการติดตั้งระบบการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อย 115/24 kV ของบริษัท SIEMENS

จุดมุ่งหมายในการออกแบบ

- 1) เพื่อให้กระแสสูงผิดปกติที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าหรือกระแสลัดวงจรไหลลงดินในระบบเองให้ไหลลงดินได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว
- 2) เพื่อให้แน่ใจว่ามีความปลอดภัยต่อคนที่ทำงานใน Substation และอยู่ใกล้เคียงกับระบบต่อลงดินจะไม่ได้รับอันตรายหรือช็อค

การออกแบบระบบกราวด์นั้นยังไม่ได้ครอบคลุมการป้องกันที่อาจเกิดจากภัยธรรมชาติที่ส่งผลต่อสถานีไฟฟ้าแรงสูงได้ นั่นคือการเกิดฟ้าผ่าในอุปกรณ์ซึ่งมีผลทำให้อุปกรณ์เสียหายดังนั้นก็จึงต้องมีการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าร่วมด้วย

ระบบรากสายดิน เป็นระบบนำกระแสฟ้าผ่าที่เข้ามาในสถานีไฟฟ้าแรงสูงให้ไหลลงดิน ระบบรากสายดินนี้ ถ้ามีการออกแบบที่ดีหมายถึงค่าความต้านทานของระบบรากสายดินมีค่าต่ำ ( $R_g$ ) ก็จะสามารถระบายกระแสฟ้าผ่ารวมถึงกระแสฟอลท์ (fault current) ต่างๆให้ไหลลงดินได้รวดเร็ว ซึ่งจะช่วยลดความเสียหายของระบบให้น้อยลงได้ นอกจากนี้ยังทำให้ระบบป้องกันฟ้าผ่ามีประสิทธิภาพในการล่อฟ้าในการล่อฟ้าให้ผ่าลงมาที่ตัวล่อฟ้าได้ดีขึ้น เพราะตัวล่อฟ้าสามารถสร้าง สตรีมเมอร์ (Streamer) เพื่อขึ้นไปรับชั้นนำฟ้าผ่า (Step Leader) ได้ยาวกว่าตัวล่อฟ้าที่มีระบบรากสายดินที่มีค่า  $R_g$  สูงๆ

ในขั้นตอนการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น จะต้องทำการออกแบบระบบกราวด์ให้ได้ค่าต่างๆที่มีค่าเหมาะสมตามเงื่อนไขใน ANSI/IEEE Std.80 ก่อนที่จะมีการติดตั้งและใช้งานจริง ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของระบบกราวด์จะมีอยู่ 2 อย่างคือ ในส่วนแรกเพื่อเป็นการนำกระแสไหลลงดินภายใต้สภาวะปกติ และสภาวะที่เกิดกระแสสูงอันเนื่องมาจากฟ้าผ่าหรือกระแสลัดวงจรผิดปกติให้ไหลลงดินอย่างรวดเร็วโดยไม่กระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ และส่วนที่สองเพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานที่อาจได้รับอันตรายจากกระแสดังกล่าว การออกแบบระบบกราวด์ในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ดีนั้น ควรออกแบบให้มีค่าความต้านทานของระบบกราวด์ของระบบต่ำ ค่าศักดาไฟฟ้า สัมผัสสูงสุดและศักดาไฟฟ้าช่วงกาวให้อยู่ในช่วงที่มนุษย์สามารถทนได้ การออกแบบระบบกราวด์ที่ดีนั้น นอกจากจะออกแบบเพื่อให้ใช้งานได้ตามจุดประสงค์แล้ว ควรจะต้องมีการคำนึงถึงความประหยัดด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับขั้นตอนการทำงานออกแบบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆคือ การสำรวจหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินตามมาตรฐาน ANSI/IEEE Std.80 ซึ่งจะต้องไปทำการทดสอบ ณ บริเวณพื้นที่ที่จะทำการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยจริงหรืออาจจะใช้ค่าที่กำหนดมาให้ก็ได้หลังจากที่ได้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินแล้ว จึงนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาขนาดตัวนำ, จำนวนแท่งกราวนรีรอด และจำนวนตัวนำกริด ตามขนาดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขตาม ANSI/IEEE Std.80 โดยค่าคงที่ที่ได้จากมาตรฐาน และค่าตัวแปรที่เป็นค่าจริงของแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยที่ทำการออกแบบ

## 7.2 การคำนวณและออกแบบระบบการต่อลงดินขนาด 115/24 kV ในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังของ SIEMENS

สถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/24 kV มาตรฐานการคำนวณและการออกแบบ(IEEE Guide for safety is Substation Grounding: 80-2000)

### ข้อกำหนดการออกแบบระบบต่อลงดิน

- 1)  $t_f$  อยู่ในช่วงเวลา 0.25-1 วินาที (EGAT กำหนด  $t_f=t_s=1$ )
- 2)  $I_G$  คำนวณจากวงจรที่เกี่ยวข้องปกติแล้ว  $I_G \leq I_f$  เสมอ เพราะว่ามีกระแสลัดวงจรบางส่วนไหลออกจากระบบกราวด์ไปทางสาย Overhead Ground Wire ของ Tower (EGAT กำหนด  $I_f=31.5$  KA สำหรับระบบ 115 KV)
- 3)  $\rho$  ของดินปกติจะใช้การวัด wenner (Four point method )
- 4) ความหนาของหินกรวดมีค่าประมาณ 0.08-0.15 เมตร (EGAT กำหนด  $h_s = 0.15$  เมตร)
- 5) ค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวด ประมาณ 1000-5000 โอห์ม-เมตร (EGAT กำหนด  $\rho_s = 3000$  โอห์ม-เมตร)
- 6) ความลึกของตะแกรงกริดประมาณ 0.5-1.5 เมตร

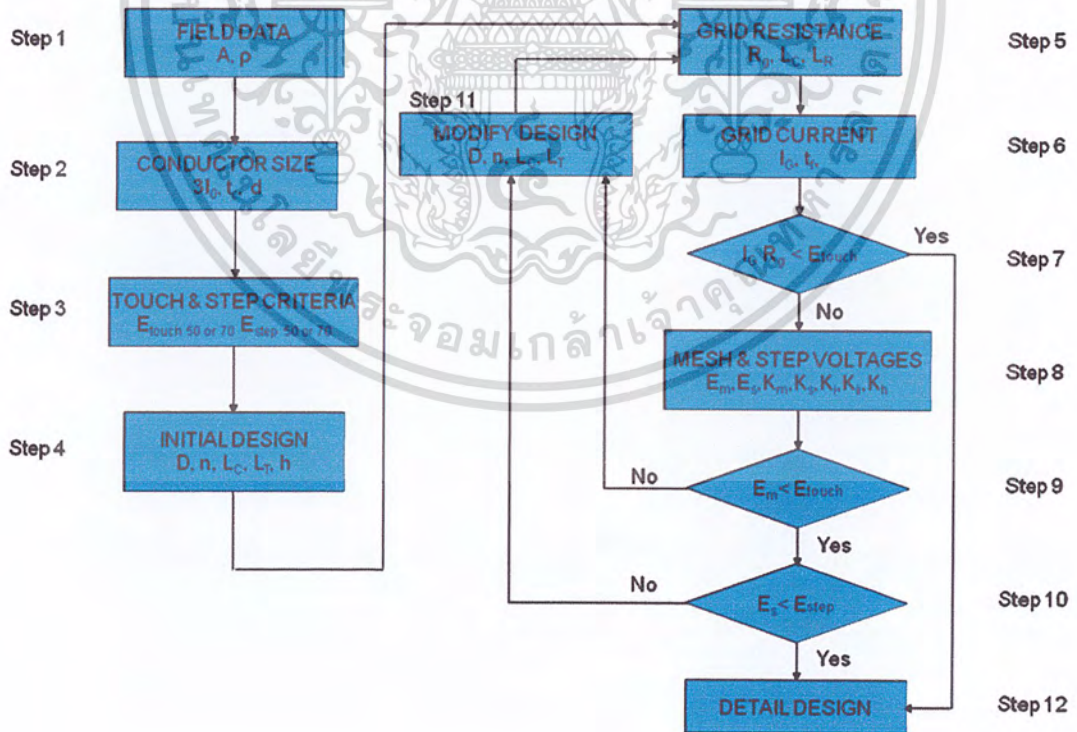
### ข้อมูลสำหรับการคำนวณ

- 1) ค่าความต้านทานดินที่ ( $\rho$ ) 30 โอห์ม-เมตร (EGAT Scope)
- 2) Rated short time withstand current 1 sec = 31.5 kA (EGAT Scope)
- 3) พื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อย  $30 \times 16 = 480$  ตารางเมตร
- 4) ความลึกของตะแกรงกริด ( $h$ ) 0.5 เมตร
- 5) ค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวด ( $\rho_s$ ) = 3,000 โอห์ม-เมตร
- 6) ความลึกของชั้นหินกรวด ( $h_s$ ) 0.15 เมตร
- 7) Mean ambient temperature = 30 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 7.1 ค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้คำนวณ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000

| Description                                 | Material<br>Conductivity<br>(%) | $\alpha_r$<br>Factor<br>@ 20 °C | K<br>(1/ $\alpha_0$ )<br>@ 0 °C | Fusing<br>Temperature<br>(°C) | $\rho_r$<br>@ 20 °C<br>( $\mu\Omega/cm$ ) | TCAP Factor<br>Effective Value<br>( $J/cm^2 / ^\circ C$ ) |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---|---|
| Standard<br>Annealed<br>Soft Copper<br>Wire | 100.0                           | 0.00393                         | 234                             | 1083                          | 1.7241                                    | 3.422   |
| Commercial<br>Hard Drawn<br>Copper Wire     | 97.0                            | 0.00381                         | 242                             | 1084                          | 1.7774                                    | 3.422   |
| Copper-Clad<br>Steel Core<br>Wire           | 40.0                            | 0.00398                         | 245                             | 1084/<br>1300                 | 4.397                                     | 3.846   |
| Copper-Clad<br>Steel Core<br>Wire           | 30.0                            | 0.00398                         | 245                             | 1084/<br>1300                 | 5.862                                     | 3.846   |
| Commercial EC<br>Aluminum<br>Wire           | 61.0                            | 0.00403                         | 228                             | 657                           | 2.862                                     | 2.556   |
| Aluminum Alloy<br>Wire 5005                 | 53.5                            | 0.00353                         | 263                             | 660                           | 3.2226                                    | 2.598   |



รูปที่ 7.1 แสดงขั้นตอนการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยตามมาตรฐาน IEEE 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7.3 ขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดิน

#### ขั้นตอนที่ 1 สํารวจข้อมูลพื้นที่ ( Field Data )

- ขนาดพื้นที่ (A) คือ 30x16 = 480 ตารางเมตร
- Soil Resistivity ( $\rho$ ) = 30 โอห์ม-เมตร

#### ขั้นตอนที่ 2 หาขนาดของตัวนำ (Conductor size)

$$A_{mm^2} = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (7.1)$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ใช้ทำกริด (mm<sup>2</sup>)

I = กระแสลัดวงจรลงดิน (KA, r.m.s)

$T_m$  = อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย (องศาเซลเซียส)

$T_a$  = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (องศาเซลเซียส)

$T_r$  = อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับค่าคงที่ของระบบ (องศาเซลเซียส)

$\alpha_r$  = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ  $T_r$

$\alpha_0$  = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ  $^{\circ}C$

$\rho_r$  = ความต้านทานจำเพาะของความต้านทานที่อุณหภูมิ  $T_r$

TCAP = แฟกเตอร์ความจุทางความร้อน J/cm<sup>3</sup>/ $^{\circ}C$

$t_c$  = เวลาที่กระแสไหลของกระแสลัดวงจร sec

- จากตารางที่ 7.1 เลือก standard Annealed soft copper wire

$$A_{mm^2} = \frac{31.5}{\sqrt{\left(\frac{3.422 \times 10^{-4}}{1 \times 0.00393 \times 1.724}\right) \ln\left(\frac{234 + 1083}{234 + 30}\right)}}$$

$$A_{mm^2} = 110.56 \text{ mm}^2$$

$$d \text{ ( diameter )} = 11.86 \times 10^{-3} \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตาราง 7.2 Typical Conductor Size

| Copper Conductor Size (AWG or MCM) | Cross Sectional Area Circular MILS | Diameter |             |
|------------------------------------|------------------------------------|----------|-------------|
|                                    |                                    | Inches   | $10^{-3}$ m |
| 3                                  | 52,620                             | 0.260    | 6.60        |
| 2                                  | 66,360                             | 0.292    | 7.42        |
| 1                                  | 83,690                             | 0.332    | 8.43        |
| 1/0                                | 105,600                            | 0.373    | 9.47        |
| 2/0                                | 133,100                            | 0.419    | 10.64       |
| 3/0                                | 167,800                            | 0.470    | 11.94       |
| 4/0                                | 211,600                            | 0.528    | 13.41       |
| 250                                | 250,000                            | 0.575    | 14.61       |
| 300                                | 300,000                            | 0.630    | 16.00       |
| 350                                | 350,000                            | 0.681    | 17.30       |
| 400                                | 400,000                            | 0.728    | 18.49       |
| 450                                | 450,000                            | 0.772    | 19.61       |
| 500                                | 500,000                            | 0.813    | 20.65       |

ที่มา : มาตรฐาน IEEE 80

โดยส่วนมากชนิดที่นิยมใช้สำหรับ Grid และ Stinger conductor คือ 4/0 AWG (13.41 mm dia) โดยที่ตัวนำชนิดนี้จะความทนต่อแรงทางกลในการติดตั้งซึ่งมีชนิดอื่น ๆ ดังนั้นเลือกใช้ขนาด 4/0 AWG ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) =  $13.41 \times 10^{-3}$  m

ขั้นตอนที่ 3: หา touch voltage และ step voltage ที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 50 kg

$$E_{touch50} = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} (1000 + 1.5 \times C_s \times \rho_s) \quad (7.2)$$

$$E_{step50} = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} (1000 + 6.0 \times C_s \times \rho_s) \quad (7.3)$$

$$C_s = 1 - a \left[ \frac{\rho_s}{2h_s + a} \right] \quad (7.4)$$

- เมื่อ  $E_{touch50}$  = แรงดันสัมผัสที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์น้ำหนัก 50 kg  
 $E_{step50}$  = แรงดันช่วงก้าวที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์น้ำหนัก 50 kg  
 $C_s$  = Reduction Factor  
 $t_s$  = ระยะเวลาที่ clear fault

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_s = 1 - 0.106 \left[ \frac{1 - \frac{30}{3000}}{2 \times 0.15 + 0.106} \right] = 0.740$$

$$E_{touch50} = \frac{0.116}{\sqrt{1}} (1000 + 1.5 \times 0.74(3,000)) = 502.28 \text{ V}$$

$$E_{step50} = \frac{0.116}{\sqrt{1}} (1000 + 6.0 \times 0.74(3,000)) = 1,661.12 \text{ V}$$

#### ขั้นตอนที่ 4: Initial Design (กำหนดค่าเริ่มต้น D,n,L,h )

การออกแบบการวางระบบกราวด์และการฝังระบบกราวด์หรือคั้งซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากต่อความปลอดภัยและการประหยัดงบประมาณการลงทุนเราจึงควรกำหนดการวางระบบที่มีความเหมาะสมในเบื้องต้นเราจึงกำหนดเท่าที่จำเป็นและตรวจสอบในขั้นตอนต่อไป

กำหนดค่าเริ่มต้น

ความเหมาะสมในการออกแบบค่าเริ่มต้นตามมาตรฐาน

1.  $N < 25$
2.  $0.25 < h < 2.5$
3.  $D > 2.5$
4.  $d < 0.25h$

กว้าง : ยาวของ  $> 1:2.5$

- ระยะห่างตัวนำที่ขนานกัน (D)

- ความยาวรวมตัวนำ ( $L_c$ )

- ความยาวของ Ground Rod ( $L_r$ )

- จำนวนของ Ground Rod (N)

- จำนวนตัวนำของแกน (X,Y)

1) การหาพื้นที่ที่ใช้ติดตั้งสายตัวนำ (Total area enclosed by ground grid )

ในการออกแบบเราจะเห็นว่าพื้นที่ในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อมมีขนาด 16x30 ตารางเมตร แต่ในการติดตั้งระบบกราวด์จะมีการติดตั้งสายเส้นสุดท้ายที่ห่างจากรั้วสถานีที่ 1 เมตร ทั้ง 4 ด้านดังนั้นพื้นที่ที่ใช้ในการติดตั้งระบบกราวด์กริดจริง (Total area enclosed by ground grid) คือ  $18 \times 32 = 576$  ตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การหาขนาดความยาวของตัวนำ (Total length of ground grid conductor)

กำหนดระยะห่างระหว่างสายตัวนำ (D) ที่ระยะห่างที่เท่ากันที่ 2.5 เมตร จะได้

-Total number of ground grid ด้าน (18 m) คือ  $N_a = (18/2.5)+1 = 9$  แถว

-Total number of ground grid ด้าน (32 m) คือ  $N_b = (32/2.5)+1 = 14$  แถว

จะได้ค่า  $L_c$  ซึ่งเป็นผลรวมของความยาวของตัวนำ เท่ากับการนำค่า  $N_a \times$  ความยาว +  $N_b \times$  ความกว้าง ซึ่งเท่ากับ  $9 \times 32 + 14 \times 18 = 540$  m

3) การหาความยาวของ Ground Rod (Total number of ground rod)

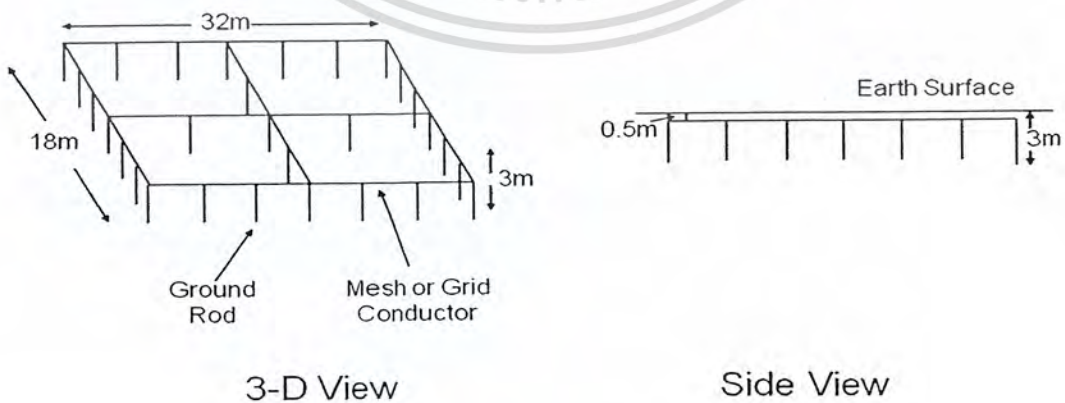
ในการออกแบบสถานีไฟฟ้า จำนวนของกราวนัร็อต (@5/8" Dia. X 10'L) ไม่เป็นสิ่งสำคัญมากนักเพราะว่าเป็นการนำจำนวนความยาวที่ได้ไปรวมกับความยาวของตัวนำ (Ground Grid) แต่ในการออกแบบเรายังนิยมที่จะใช้ Ground Rod ในการวางระบบสายดินกับระบบกราวนัร็อต ดังนั้นจึงไม่มีเกณฑ์กำหนดที่แน่นอนว่าจะต้องใช้จำนวนเท่าไร ในที่นี่จะใช้ที่ 50% ของความยาวรวมของกราวนัร็อต (จากความยาว Ground Rod ประมาณ  $540 \times 50\% = 270$  เมตร) จะได้จำนวน Ground Rod ( $N_r$ ) เท่ากับ  $270/3.048 = 88.58 = 89$  แท่ง ดังนั้น ความยาว Ground Rod ( $L_r$ ) จริงที่จะได้คือ  $89 \times 3.048 = 271.3$  m

4. หาความยาวรวมของสายดินทั้งระบบ (Total length of grounding system conductor)

$$L = L_c + L_r$$

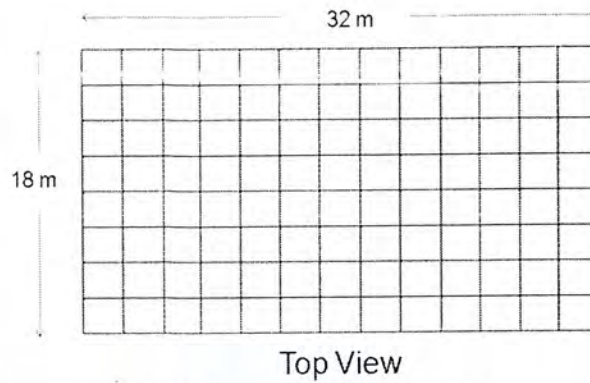
$$= 540 + 271.3 = 811.27 \text{ m}$$

5. กำหนดค่าฝังลึกของตัวนำ (h) โดยมีการฝังลึกที่ 0.5 m จะเห็นว่าในขั้นตอนในขั้นตอนนี้ค่าที่ได้จะเป็นเพียงการออกแบบระบบสายดินช่วงแรก (Initial Design) ผลที่ได้จะต้องปรับเปลี่ยนตามรายการคำนวณขั้นต่อไป



รูปที่ 7.2 แสดงการวางกราวนัร็อต ด้าน 3-D View และ ด้าน Side View

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.3 แสดงการวางกราวกริด

### ขั้นตอนที่ 5: คำนวณค่า Grid Resistance ( $R_g$ )

ในการหาค่าความต้านทานระบบสายดิน ( $R_g$ ) จะมีการกำหนดค่าความต้านทานดินโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะกำหนดในเงื่อนไขการออกแบบระบบสายดินสถานีไฟฟ้าแรงสูงไว้ที่ค่าไม่เกิน 1 โอห์ม ดังนั้นในขั้นตอนการหาค่า ( $R_g$ ) จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความต้านทานดิน ซึ่งหากว่าค่าความต้านทานดินมีค่าสูงมาก ค่าความต้านทานระบบสายดินก็จะมีค่าสูงมากด้วย

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (7.5)$$

$$R_g = 30 \left[ \frac{1}{811.27} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 576}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 2.5\sqrt{20/576}} \right) \right]$$

$$R_g = 0.48 \Omega$$

### ขั้นตอนที่ 6: คำนวณค่า Grid Current and Grid Potential Rise

ในการหาค่า Max. Grid Current ;  $I_g$  เราควรนำค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ Load Flow Diagram ที่หาค่าของขนาด Fault ที่มีกระแสสูงสุดที่จะเกิดภายในสถานีไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นการคำนวณได้จาก Short Circuit Current แบบ Three Phase Fault ( $3I_o$ ) โดยมีการพยากรณ์ว่าจะสามารถครอบคลุมในอนาคตได้ด้วย แต่การออกแบบสถานีไฟฟ้าอุตสาหกรรม ข้อมูลดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยการไฟฟ้าเพราะเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่และมีข้อมูลดังกล่าว ในที่นี้บริษัท seimens กำหนดขนาดให้เป็น 31.5 KA แต่ค่า Max Grid Current จะมีการไหลเข้าสู่ระบบจำหน่ายผ่าน Overhead Ground Wire (OHGW) ซึ่งมีผลทำให้ลดขนาดลงได้ แต่ในที่นี้จะใช้

ขนาด  $3I_o$  เท่ากับ 31.5 KA สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าแรงดันที่เกิดจากระบบสายดิน (Grid Potential Rise;GPR)

$$GPR = I_g \times R_g = 31.5 \text{ kA} \times 0.48 = 15,252 \text{ Volt}$$

ขั้นตอนที่ 7:  $GPR < E_{\text{touch}50}$

เป็นขั้นตอนในการเปรียบเทียบค่าที่ได้จาก Grid Potential Rise (GPR) กับค่าแรงดัน Touch Voltage ดังนี้  $GPR < E_{\text{touch}50}$  ถ้าเป็นไปตามนี้ก็สามารถข้ามขั้นตอนไปที่ขั้นตอนที่ 12 ซึ่งเป็นการทำ Detail Design ได้เลย แต่ถ้า  $GPR > E_{\text{touch}50}$  จะต้องทำตามขั้นตอนที่ 8ต่อไป แต่จากข้อมูลการออกแบบ ค่า  $GPR = 15,252 \text{ V}$  แต่ค่า  $E_{\text{touch}50} = 1,172.4 \text{ V}$  ดังนั้นในขั้นตอนนี้สามารถบอกได้ว่า ค่า Initial Design ไว้ มีการออกแบบไว้ประหยัดดีแล้วแต่จะต้องพิสูจน์ในขั้นตอนความปลอดภัยอีกต่อไป

ขั้นตอนที่ 8: คำนวณหาค่า Mesh and Step Voltage

$$E_m = \frac{\rho \times K_m \times K_i \times I_G}{L_m} \quad (7.6)$$

$$E_s = \frac{\rho \times K_s \times K_i \times I_G}{L_s} \quad (7.7)$$

เมื่อ  $E_m$  = Mesh voltage  
 $E_s$  = Step voltage  
 $\rho$  = ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน  
 $K_m$  = Mesh voltage factor  
 $K_s$  = Step voltage factor

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \quad (7.8)$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)_n^2} \quad (7.9)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (7.10)$$

$$n = n_a \times n_b \quad (7.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_a = \frac{2L_C}{L_p}; n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (7.12)$$

$$L_S = 0.75L_C + 0.85L_R \quad (7.13)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (7.14)$$

$$K_i = 0.656 + 0.172n \quad (7.15)$$

$$L_m = L_C + [1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right)] L_r \quad (7.16)$$

คำนวณ

$$n_a = \frac{2 \times 540}{270} = 4$$

$$n_b = \sqrt{\frac{270}{4\sqrt{576}}} = 1.67$$

$$n = n_a \times n_b = 4 \times 1.67 = 6.7$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.224$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2(6.7))^{(2/6.7)}} = 0.461$$

$$K_i = 0.656 + 0.172(6.7) = 1.638$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \times 0.5} + \frac{1}{2.5 + 0.5} + \frac{1}{2.5} (1 - 0.5^{6.7-2}) \right] = 0.5471$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \frac{2.5^2}{16 \times 0.5 \times 0.0134} + \frac{(2.5 + 2(0.5))^2}{8 \times 2.5 \times 0.0134} - \frac{0.5}{4 \times 0.0134} \right] + \frac{0.46}{1.87} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \times 6.7 - 1)} \right]$$

$$K_m = 0.6295$$

$$L_S = 0.75 \times 540 + 0.85 \times 271.3 = 634.6 \text{ m}$$

$$L_m = 540 + [1.55 + 1.22 \left( \frac{271.3}{\sqrt{32^2 + 18^2}} \right)] 271.3 = 3,415.27 \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_m = \frac{30 \times 0.6625 \times 1.635 \times 31,500}{3406.27} = 285.113\text{v}$$

$$E_s = \frac{30 \times 0.547 \times 1.635 \times 31,500}{635.6} = 1,333.83\text{v}$$

### ขั้นตอนที่ 9: ตรวจสอบค่า Mesh Voltage ( $E_m$ )

ถ้า  $E_m > E_{touch50}$  ไปยัง Step ที่ 11

ถ้า  $E_m < E_{touch50}$  ไปยัง Step ที่ 10

จากการคำนวณพบว่า  $E_m = 285.113\text{V} < E_{touch50} = 502.28\text{V}$

### ขั้นตอนที่ 10: ตรวจสอบค่า Step Voltage ( $E_s$ )

ถ้า  $E_s > E_{step50}$  ไปยัง Step ที่ 11

ถ้า  $E_s < E_{step50}$  ไปยัง Step ที่ 12

จากการคำนวณพบว่า  $E_s = 1,333.73\text{ V} < E_{step50} = 1,661.12\text{V}$

### ขั้นตอนที่ 11: ตรวจสอบค่า Mesh Voltage ( $E_m$ ) และ Step Voltage ( $E_s$ )

ถ้า  $E_m > E_{touch50}$  ไปยัง Step ที่ 11

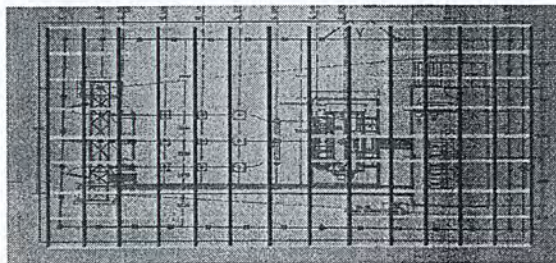
ถ้า  $E_s > E_{step50}$  ไปยัง Step ที่ 11

จะเห็นว่าขั้นตอนที่ 11 นั้น เป็นขั้นตอนที่จะต้องมีการออกแบบค่า  $D, n, L_c, L_T$  ใหม่ เพื่อให้ระบบมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้นมีหลักในการออกแบบดังนี้

- 1) ลดค่า  $D$  (ระยะห่างของตัวนำกริดที่ขนานกัน) จะส่งผลต่อความยาวรวมของกริดเพิ่มขึ้น
- 2) เพิ่มความยาวและจำนวนของกราวหรือดให้มากขึ้น จะส่งผลต่อความยาวรวมของกริดเพิ่มขึ้น
- 3) ผังระบบกราว์กริดให้ลึกกว่าเดิม

### ขั้นตอนที่ 12: Detail Design

ในขั้นตอนนี้เป็นการนำแบบตัวอย่างงานก่อสร้างและค่าระยะการวาง Ground Grid มาวางระบบสายดินในสถานีไฟฟ้าแสดงตามรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 แสดงการวางกราว์กริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 8

### การออกแบบเลือกขนาดอุปกรณ์

จากบทที่ 5 เมื่อเราทำการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์ต่างๆแล้ว การเลือกใช้อุปกรณ์จะต้องพิจารณาจากพิกัดของอุปกรณ์ว่าเหมาะสมกับระดับแรงดันและกระแสฟอลต์หรือไม่ ซึ่งการคำนวณหากระแสฟอลต์เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากเป็นค่าที่ใช้สำหรับเป็นตัวกำหนดพิกัดอุปกรณ์ต่างๆ ภายในสถานีไฟฟ้าย่อย โดยกระแสฟอลต์ที่รุนแรงที่สุดเป็นกระแสฟอลต์ที่บัสหรือบริเวณตรงข้อต่อหม้อแปลง

#### 8.1 การเลือกหม้อแปลงกำลัง (Selection of Power Transformer)

หม้อแปลงที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อย จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ Power transformer ที่เอาไว้แปลงพิกัดแรงดันจาก 115kV เป็น 24kV จากระบบผลิตไปสู่ระบบจำหน่าย และอีกประเภทก็คือ Service transformer ที่เอาไว้ใช้ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยได้แก่ระบบส่องสว่าง รวมทั้งเป็นไฟเลี้ยงจ่ายให้แก่อุปกรณ์ต่างๆ แต่ไม่ว่าจะใช้งานเป็น Power transformer หรือ Service transformer ก็มีจุดประสงค์เดียวกันคือ แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าเหมือนกัน ซึ่งในการผลิตหม้อแปลงอาจจะต้องผลิตตามมาตรฐานต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ก.ตาราง 1-11

การคาดคะเนโหลดเพื่อหาพิกัด MVA ของหม้อแปลงไฟฟ้า ทำได้โดยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังต้องสามารถรับโหลดสูงสุดในช่วงเวลาหนึ่งๆ ในระยะเวลาสั้นๆ ได้ ซึ่งในการสำรวจจากการใช้ภาระไฟฟ้าของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในช่วงปีนั้นสามารถไปเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่พิกัด 20/25 MVA ได้

##### 8.1.2 ข้อกำหนดเฉพาะ (specification)

ผู้ซื้อสามารถจัดทำข้อกำหนดเฉพาะ (Specification) ขึ้นเอง โดยมีเนื้อหาหลักเป็นไปตามมาตรฐานสากล เช่น IEC std, IEEE/ANSI std. และ ระบุความต้องการ ขนาด ลักษณะต่างๆ ไว้ในเอกสารระบุพิกัดและรูปร่าง (ratings and features) ตัวอย่างเนื้อหาของ specification ได้แก่

- 1) แรงดันของขดลวดแต่ละชุด ความถี่ของระบบไฟฟ้า
- 2) MVA ตาม cooling ต่างๆที่กำหนด cooling
- 3) แรงดันสูงสุดของระบบในแต่ละด้าน insulation level ของแต่ละขดลวด และ neutral

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) Creepage distance ของ bushing off-load / on-load tap-changer
- 5) Tapping range ตำแหน่งติดตั้ง tap-changer
- 6) Vector group % impedance voltage ที่ max. rating
- 7) Top oil temperature rise winding temperature rise
- 8) ระดับความดัง (noise) bushing current transformer
- 9) System fault level losses evaluation factor
- 10) Bonus for losses penalty for losses

นอกจากนี้ผู้ซื้ออาจระบุข้อจำกัดต่างๆที่อาจเป็นประโยชน์กับการออกแบบของผู้ผลิต เช่น สีของ tank, ระบบ sealing ของ conservator, จำนวน fault / short circuit ที่เกิดขึ้นต่อปี (rate of fault occurrence) และ รวมถึงการทดสอบพิเศษนอกเหนือจากระบุในมาตรฐานสากล การกำหนดในสิ่งที่ต้องการที่นอกเหนือ หรือ ต่างไปจากมาตรฐานของผู้ผลิต ซึ่งมักกระทบกับ ราคา และ สิ่งสำคัญอาจทำให้ผู้ผลิตจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงวิธีการผลิตไปจากมาตรฐานของบริษัท อาจทำให้กระทบกับคุณภาพของหม้อแปลง จึงควรพิจารณาถึงความต้องการว่ามีจำเป็นจริง

### 8.1.3 การคำนวณหากระแสฟอลต์ที่บัสหรือขั้วต่อของหม้อแปลง

$$I_{rated} = \frac{S}{(\sqrt{3})(V_{rated})} \quad (8.1)$$

$I_{rated}$  = ค่ากระแสฟัลด์

$V_{rated}$  = ค่าแรงดันฟัลด์

$S$  = ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ

$$I_{3\phi fault} = \frac{I_{rated}}{\%Z} \quad (8.2)$$

$I_{3\phi fault}$  = กระแสฟอลด์

$I_{rated}$  = ค่ากระแสฟัลด์

$\%Z$  = Impedance Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสฟอลต์ในฝั่งปฐมภูมิ (115kV) หม้อแปลงของบริษัท SIEMENS (DAIHEN)

$$\begin{aligned} I_{rated} &= \frac{MVA}{(\sqrt{3})(115kV)} \\ &= \frac{25MVA}{(\sqrt{3})(115kV)} \\ &= 125.51A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{3\phi fault} &= \frac{I_{rated}}{\%Z} \\ &= \frac{125.51A}{0.12} \\ &= 1.045kA \end{aligned}$$

กระแสฟอลต์ในฝั่งทุติยภูมิ (24kV) หม้อแปลงของบริษัท SIEMENS (DAIHEN)

$$\begin{aligned} I_{rated} &= \frac{MVA}{(\sqrt{3})(24kV)} \\ &= \frac{25MVA}{(\sqrt{3})(24kV)} \\ &= 601.4A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{3\phi fault} &= \frac{I_{rated}}{\%Z} \\ &= \frac{601.4A}{0.12} \\ &= 5.0117kA \end{aligned}$$

กระแสฟอลต์ในฝั่งปฐมภูมิ (115kV) หม้อแปลงของ MEA (ABB)

$$\begin{aligned} I_{rated} &= \frac{MVA}{(\sqrt{3})(115kV)} \\ &= \frac{25MVA}{(\sqrt{3})(115kV)} \\ &= 125.51A \end{aligned}$$

$$I_{3\phi fault} = \frac{I_{rated}}{\%Z}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{125.51A}{0.07}$$

$$= 1.793kA$$

กระแสฟอลต์ในฝั่งทุติยภูมิ (24kV) หม้อแปลงของ MEA (ABB)

$$I_{rated} = \frac{MVA}{(\sqrt{3})(24kV)}$$

$$= \frac{25MVA}{(\sqrt{3})(24kV)}$$

$$= 601.4A$$

$$I_{3\phi fault} = \frac{I_{rated}}{\%Z}$$

$$= \frac{601.4A}{0.07}$$

$$= 8.591kA$$

ตาราง 8.1 แสดงกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลงของบริษัท SIEMENS และ MEA

| $I_{3\phi fault}$ \ Company | SIEMENS   | MEA      |
|-----------------------------|-----------|----------|
| Primary (115kV)             | 1.045 kA  | 1.793 kA |
| Secondary (24kV)            | 5.0117 kA | 8.591 kA |

ตาราง 8.2 ราคาของหม้อแปลงกำลังไฟฟ้าของ SIEMENS และ MEA

| บริษัท  | ยี่ห้อ | ราคา(บาท)  |
|---------|--------|------------|
| SIEMENS | DAIHEN | 11,358,220 |
| MEA     | ABB    | 19,000,000 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกขนาดหม้อแปลงของทั้ง SIEMENS และ MEA เป็นประเภท Dyn 1 ซึ่งเป็นหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่าย ที่มีขนาดเกิน 315 kVA ขึ้นไป ค่ากระแสที่ไหลลงนิวทรอลจะมีขนาดเท่ากับกระแสที่ไหลในเฟส

ขนาดที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณโหลดของระบบในที่นี้ระบบเรามีปริมาณโหลด 20MVA และในส่วนของ Impedance voltage (%Z) จะมีผลต่อราคาและการทำงานของระบบ โดยยิ่งถ้าระบบต้องแรงดันที่หนึ่งจะต้องลด %Z ลงแต่ต้องแลกมาด้วยราคาที่สูงขึ้นและกระแสฟอลต์ที่สูงขึ้นด้วย ซึ่งทาง SIEMENS ใช้หม้อแปลงของบริษัท DAIHEN ซึ่งมี %Z=12% ส่วนหม้อแปลงของ MEA มี %Z=7% จะเห็นว่าหม้อแปลงที่ MEA เลือกใช้เกิดกระแสฟอลต์สูงกว่าและราคาสูงกว่า อีกทั้งยังส่งผลไปถึงอุปกรณ์ป้องกันต่างๆที่ต้องมีขนาดที่ใหญ่มากขึ้นเพื่อที่จะรองรับกระแสฟอลต์ที่มากขึ้นนี้ได้ แต่การที่มี %Z น้อย ก็ทำให้แรงดันมีความเสถียรมากกว่า

#### 8.1.4 การเลือกใช้ Percent Impedance ที่เหมาะสม

พิจารณาเลือกใช้จาก BIL ของขนาดหม้อแปลงที่ใช้ในระบบดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ตาราง 7 โดย %Z จะเลือกในภาคผนวก ก. ตาราง 11

ดังนั้นที่ระบบแรงดันในระบบ 115kV จากมาตรฐาน NEMA หม้อแปลงกำลังจะต้องมีค่า BIL เท่ากับ 550kV จึงทำให้เลือกค่า Percent Impedance ได้เท่ากับ 9.5 % จึงเป็นค่าที่เหมาะสมตามมาตรฐาน

#### 8.2 การเลือกขนาดของสายส่งแรงดันสูง 115kV (Selection of Wire)

การเลือกขนาดของสายส่ง คำนึงถึงการวางแผนระยะยาวจะต้องพิจารณาว่าสามารถรองรับปริมาณโหลดที่เพิ่มขึ้นในอนาคต, Percent voltage drop ต้องไม่เกิน 10% และต้องไม่ทำให้เกิด corona loss สำหรับการเลือกใช้สายส่งในปัจจุบันเลือกจากขนาดสายส่งที่ใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากในระบบ เพื่อลดปัญหาด้านอะไหล่สำรอง โดยทั้ง SIEMENS และ MEA เลือกใช้สาย AAC ขนาด 400sq.mm

ในการพิจารณาเลือกใช้สายขนาดใดนั้น จะต้องคำนึงถึงขนาดกระแสที่ใช้งานของสาย (Maximum continuous current rating in free air) จะต้องมากกว่าขนาดกระแสพิกัด ( $I_{rated}$ ) ซึ่งสายขนาด 400 sq.mm มีขนาดกระแสของสายเท่ากับ 855A ซึ่งมากกว่าขนาดกระแสพิกัดที่มีขนาด 125.51A จึงมีความเหมาะสมในการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย AAC เป็นสายฟ้าที่ผลิตจากอลูมิเนียม มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ TIS 85-2548 จากกระแสที่กระแสไหลสูงสุด 125.51A การที่ทั้ง SIEMENS และ MEA เลือกใช้สาย ขนาด 400 sq.mm ที่มีขนาดกระแสของสายเท่ากับ 855A ดังตารางในภาคผนวก ก.ตาราง 19 ซึ่งมีความเหมาะสม

ในการออกแบบจะเลือกขนาดของสายจากกระแสไหลสูงสุด โดยหากกระแสไหลสูงสุด เท่ากับ 125.51A โดยจะทำการคูณ 1.25 เท่าเพื่อการจ่ายโหลดของหม้อแปลงที่อาจจะเพิ่มขึ้น กว่าพิกัดได้ 25% ทำให้ได้ขนาดกระแส 156.88A จากขนาดกระแสที่ได้ นำมาเลือกขนาดสาย จากตาราง AAC ได้สายขนาด 35 sq.mm ซึ่งสายขนาดนี้เป็นขนาดขั้นต่ำที่สามารถนำมาใช้ได้ แต่จากการออกแบบจะเห็นว่าทั้ง 2 แห่งเลือกใช้สายขนาด 400 sq.mm เนื่องจาก ในสถานี ไฟฟ้าย่อยที่มีขนาดเล็กการเลือกใช้สายขนาดใหญ่จะมีความคุ้มค่าน่ามากกว่าเนื่องจากสายขนาดใหญ่สามารถรองรับกระแสได้มากกว่าทำให้การเพิ่มโหลดในอนาคตที่ต้องเปลี่ยนไปใช้หม้อ แปลงที่มี MVA สูงขึ้น ซึ่งเมื่อ MVA สูงขึ้นก็ทำให้กระแสไหลสูงสุดเพิ่มสูงขึ้นด้วย ทำให้ไม่ต้อง เปลี่ยนสายและ Connector ชุดใหม่ เป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย

### 8.3 การเลือกขนาดของสายส่งแรงดันปานกลาง 24kV (Selection of Wire)

$$I_{rated} = \frac{MVA}{(\sqrt{3})(24kV)}$$

$$= \frac{25MVA}{(\sqrt{3})(24kV)}$$

$$= 601.4A$$

ในการพิจารณาเลือกใช้ขนาดสายนั้น ขนาดกระแสที่ใช้งานของสายจะต้องมากกว่า ขนาดกระแสพิกัด

สำหรับในด้านแรงดัน 24kV จะเลือกใช้ XLPE Cable เนื่องจากต้องต่อสายเข้ากับชุด สวิตช์เกียร์โดยผ่านทางใต้ดินเนื่องจากเป็นตู้สวิตช์เกียร์ชนิดที่ต้องสอดสายเข้าจากทางด้านใต้ ของตู้ (Bottom entry) โดยทั้ง SIEMENS และ MEA เลือกใช้สาย XLPE Power Cable แบบ Single Core ขนาด 400sq.mm มีขนาดกระแสใช้งานของสายเท่ากับ 840 A ซึ่งมากกว่ากระแส พิกัดที่มีขนาด 601.4A ซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้งาน โดยขนาดสายแสดงภาคผนวก ก.

#### ตาราง 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบจะเลือกขนาดของสายจากกระแสไหลสูงสุด โดยหากกระแสไหลสูงสุดเท่ากับ 601.4 A โดยจะทำการคูณ 1.25 เท่าเพื่อการจ่ายไหลของหม้อแปลงที่อาจจะเพิ่มขึ้นกว่าพิกัดได้ 25% ทำให้ได้ขนาดกระแส 751.75 A จากขนาดกระแสที่คำนวณได้ นำมาเลือกขนาดสายจากตาราง XLPE Power Cable ได้สายขนาด 400sq.mm ซึ่งเป็นขนาดต่ำที่สุดที่สามารถนำมาใช้ได้ และสาเหตุที่ด้านแรงดันต่ำไม่ต้องเผื่อขนาดของสายนั้นเนื่องจาก ถ้าหากว่าในอนาคตมีไหลเพิ่มขึ้นจะทำการเพิ่ม Bay ที่ Switchgear ซึ่งไม่ต้องเปลี่ยนสายในการรองรับกระแสเนื่องจาก Bay ที่เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวแบ่งจ่ายกระแสไปยังโหลดตัวที่เพิ่มขึ้น

#### 8.4 การเลือกเพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Selection of Power Circuit breaker)

เพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Power circuit breaker) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถตัด, ต่อหรือนำกระแสไฟฟ้า (Breaking, Making, Carrying) ทั้งในภาวะปกติหรือในกรณีที่เกิดฟอลต์ ในการตัดวงจรออกเมื่อมีกระแสไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยที่หน้าสัมผัสของมันพยายามที่จะเปิดออกในขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลอยู่ ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะไม่หยุดไหลในทันที สนามไฟฟ้าที่มีค่าสูง ความร้อนบริเวณหน้าสัมผัสจะทำให้เกิดการ ionization ของน้ำมันหรือก๊าซรอบๆ หน้าสัมผัส ก่อให้เกิด arc ขึ้น โดยในการตัดกระแสตัดวงจรจะต้องทำให้ arc ที่เกิดขึ้นนั้นมีความยาวเพิ่มมากขึ้น (ยกเว้นใน Vacuum SF<sub>6</sub>) การเพิ่มความยาวก็เพื่อนเป็นการเพิ่มความต้านทานให้กับมันจนมากพอ จากนั้น arc ก็จะดับไปเมื่อกระแสไฟฟ้าลดลงผ่านจุดศูนย์ หน้าสัมผัสก็จะเปิดออกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งการเลือกขนาดของ circuit breaker เลือกตามมาตรฐาน IEC56 หรือมาตรฐาน ANCI C37.06 ดังแสดงในภาคผนวก ก. ตาราง 12-18

##### 8.4.1 กระแสขณะอินเตอรัพท์ (Interrupting Current)

หรือเรียกย่อว่าค่า IC เป็นค่ากระแสลัดวงจรสมมาตร (rms) โดยที่อุปกรณ์ป้องกันต้องสามารถขจัดจังหวะการไหลของกระแสลัดวงจรสมมาตร ( $I_{3\phi fault}$ ) หรือสามารถตัดกระแสได้หลังจาก 3,5 หรือ 8 ไชเคลสภายใต้แรงดันที่กำหนด ในขณะที่หลังจาก 8 ไชเคลสแล้วนั้นจะไม่มีส่วนประกอบกระแสตรงอยู่เลย ดังนั้นการหาขนาดของ กระแสขณะอินเตอรัพท์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นจึงขึ้นอยู่กับความเร็วของเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยทั่วไปมักใช้ตัวคูณ คูณกับค่ากระแสลัดวงจรสมมาตร ( $I_{3\phi fault}$ ) ดังภาคผนวก ก. ตาราง 17 อย่างไรก็ตามการเลือกขนาดกระแสขณะอินเตอรัพท์ของเบรกเกอร์ต้องให้เท่ากับหรือมากกว่าค่ากระแสลัดวงจร แต่ถ้าเลือกขนาดกระแสขณะอินเตอรัพท์ต่ำกว่าค่ากระแสลัดวงจร โอกาสเบรกเกอร์จะระเบิดย่อมเกิดขึ้นได้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{(ค่ากระแสขณะอินเตอร์รัพท์) Interrupting Current} = \text{Multiplying Factor} \times I_{3\phi \text{ fault}} \quad (8.3)$$

เนื่องจากเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ 3 cycle จึงใช้ค่า Multiplying Factor เท่ากับ 1.2 ดังนั้นค่ากระแสขณะอินเตอร์รัพท์เท่ากับ  $1.2 \times I_{3\phi \text{ fault}}$

SIEMENS: ค่ากระแสขณะอินเตอร์รัพท์ในฝั่งปฐมภูมิ (115kV)

$$\begin{aligned} I_{\text{Interrupting}} &= I_{3\phi \text{ fault}} (k) \\ &= 1.045 \text{ kA} (1.2) \\ &= 1.254 \text{ kA} \end{aligned}$$

SIEMENS: ค่ากระแสขณะอินเตอร์รัพท์ในฝั่งทุติยภูมิ (24kV)

$$\begin{aligned} I_{\text{Interrupting}} &= I_{3\phi \text{ fault}} (k) \\ &= 5.0117 \text{ kA} (1.2) \\ &= 6.0140 \text{ kA} \end{aligned}$$

MEA: ค่ากระแสขณะอินเตอร์รัพท์ในฝั่งปฐมภูมิ (115kV)

$$\begin{aligned} I_{\text{Interrupting}} &= I_{3\phi \text{ fault}} (k) \\ &= 1.793 \text{ kA} (1.2) \\ &= 2.1516 \text{ kA} \end{aligned}$$

MEA: ค่ากระแสขณะอินเตอร์รัพท์ในฝั่งทุติยภูมิ (24kV)

$$\begin{aligned} I_{\text{Interrupting}} &= I_{3\phi \text{ fault}} (k) \\ &= 8.591 \text{ kA} (1.2) \\ &= 10.309 \text{ kA} \end{aligned}$$

ตาราง 8.3 แสดงค่ากระแสขณะอินเตอร์รัพท์ (Interrupting Current) ของบริษัท SIEMENS และ MEA (จากการคำนวณ)

| IC \ Company     | SIEMENS  | MEA       |
|------------------|----------|-----------|
| Primary (115kV)  | 1.254 kA | 2.1516 kA |
| Secondary (24kV) | 6.014 kA | 10.309 kA |

ในการเลือกขนาดของ Circuit Breaker จะต้องเลือกขนาดของ Interrupting Current ให้มากกว่าหรือเท่ากับกระแสลัดวงจร ( $I_{3\phi fault}$ ) เพราะถ้าหากว่าเลือกขนาด Interrupting Current ของ Circuit breaker ต่ำกว่า กระแสลัดวงจรจะทำให้ Circuit breaker มีโอกาสระเบิดได้

#### 8.4.2 กระแสโมเมนเทอรี่ (Momentary Current)

เป็นผลรวมของส่วนประกอบกระแสตรง (DC Component) กับส่วนประกอบกระแสสมมาตรสูงสุด (AC Component) ในช่วงครึ่งไซเคิลถึง 1 ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์ ช่วงเวลาดังกล่าวเซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องสามารถทนต่อค่ากระแสลัดวงจรนี้ได้ โดยที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่เสียหาย ดังนั้นค่ากระแสที่ว่า กระแสโมเมนเทอรี่ ซึ่งค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้จะเป็นเพียงค่ากระแสสมมาตรซึ่งมีเฉพาะส่วนประกอบกระแสสมมาตร (AC Component) ซึ่งไม่ได้รวมส่วนประกอบกระแสตรง (DC Component) เข้าไปด้วย ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวคูณในภาคผนวก ก. ตาราง 18

$$\text{กระแสโมเมนเทอรี่ (Momentary Current)} = I_{3\phi fault} \times \text{Multiplying factor} \quad (8.4)$$

เนื่องจากระบบเป็นแบบ 115/24kV ซึ่งมากกว่า 5kV จึงเลือกใช้ตัวคูณเท่ากับ 1.6 ดังนั้นกระแสโมเมนเทอรี่ (Momentary Current) =  $I_{3\phi fault} \times 1.6$

SIEMENS: กระแสโมเมนเทอรี่ในฝั่งปฐมภูมิ (115kV)

$$\begin{aligned} I_{momentary} &= I_{3\phi fault} (k) \\ &= 1.045 \text{ kA} (1.6) \\ &= 1.672 \text{ kA} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIEMENS: กระแสโมเมนทารีในฝั่งทุติยภูมิ (24kV)

$$\begin{aligned} I_{\text{momentary}} &= I_{3\phi \text{ fault}}(k) \\ &= 5.0117 \text{ kA (1.6)} \\ &= 8.0187 \text{ kA} \end{aligned}$$

MEA: กระแสโมเมนทารีในฝั่งปฐมภูมิ (115kV))

$$\begin{aligned} I_{\text{momentary}} &= I_{3\phi \text{ fault}}(k) \\ &= 1.793 \text{ kA (1.6)} \\ &= 2.8688 \text{ kA} \end{aligned}$$

MEA: กระแสโมเมนทารีในฝั่งทุติยภูมิ (24kV)

$$\begin{aligned} I_{\text{momentary}} &= I_{3\phi \text{ fault}}(k) \\ &= 8.591 \text{ kA (1.6)} \\ &= 13.7456 \text{ kA} \end{aligned}$$

ตาราง 8.4 แสดงค่ากระแสโมเมนทารี (Momentary Current) ของบริษัท SIEMENS และ MEA

| Company                                   | SIEMENS  | MEA       |
|---|----------|-----------|
| $I_{\text{momentary}}$<br>Primary (115kV) | 1.672 kA | 2.868 kA  |
| Secondary (24kV)                          | 8.018 kA | 13.745 kA |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตาราง 8.5 ขนาด Circuit breaker ของ SIEMENS

| Parameter              | Primary | Secondary |
|------------------------|---------|-----------|
| แรงดันที่กำหนด         | 115kV   | 24kV      |
| $I_{momentary}$        | 1.672kA | 8.018kA   |
| $I_{Interrupting}$     | 1.254kA | 6.014kA   |
| พิกัดกระแสลัดวงจรของCB | 31.5kA  | 25kA      |

### ตาราง 8.6 ขนาด Circuit breaker ของ MEA

| Parameter              | Primary  | Secondary |
|------------------------|----------|-----------|
| แรงดันที่กำหนด         | 115kV    | 24kV      |
| $I_{momentary}$        | 2.868kA  | 13.745kA  |
| $I_{Interrupting}$     | 2.1516kA | 10.309kA  |
| พิกัดกระแสลัดวงจรของCB | 31.5kA   | 25kA      |

การเลือกขนาดของ Power Circuit Breaker จะพิจารณาจากกระแสโมเมนเทอรี่ที่เกิดขึ้น โดยขนาดของ Power Circuit breaker ที่จะนำมาใช้นั้นจะต้องมีขนาดพิกัดกระแสลัดวงจรของตัวมันเองสูงกว่ากระแสโมเมนเทอรี่ซึ่งจากพิกัดกระแสลัดวงจรของทั้งสองแห่งเลือกใช้อย่างเหมาะสม

ด้านแรงดัน 115 kV การออกแบบของบริษัท SIEMENS เลือกใช้ Power Circuit Breaker ขนาด 31.5 kA ซึ่งมีขนาดกระแสสูงกว่ากระแสโมเมนเทอรี่ที่มีขนาด 2.5102kA โดย SIEMENS เลือกใช้ Power Circuit Breaker แบบ 3AP1 ซึ่งเลือกใช้ตัวที่มีขนาดพิกัดแรงดัน 123kV ซึ่งเป็นขนาดเล็กที่สุดที่สามารถนำมาใช้ได้ และการเลือกใช้ขนาด 123kV มีความเหมาะสมทั้งในด้านของการใช้งานและในด้านราคาเนื่องจากว่า หากเลือกใช้ Power Circuit Breaker ที่ขนาดใหญ่กว่านี้ก็ยังสามารถนำมาใช้ได้แต่มีราคาที่สูงขึ้น

ด้านแรงดัน 115 kV การออกแบบของบริษัท MEA เลือกใช้ Power Circuit Breaker ขนาด 31.5 kA ซึ่งมีขนาดกระแสสูงกว่ากระแสโมเมนเทอรี่ที่มีขนาด 1.463kA โดย Power Circuit Breaker สำหรับการใช้งานที่ระดับแรงดันสูง (115kV) ซึ่งผลิตภัณฑ์จากบริษัท ABB ดังแสดงในภาคผนวก ก. รูปที่ 1 จะเห็นได้ว่า Power Circuit Breaker รุ่น Live Tank Circuit Breaker Type LTB D (LTB D SF<sub>6</sub> Circuit Breaker) เป็นขนาดเล็กที่สุดที่สามารถนำมาใช้งานได้ ซึ่งจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่จะเห็นว่า ถ้าต้องการใช้รุ่นที่เล็กกว่า LTB D เพียงเพราะเราพิจารณาแต่กระแสโมเมนตัมที่มีขนาด 1.463 kA แล้วรุ่น EDI SK และ EDF SK ก็อาจจะนำมาใช้ได้ถ้าพิจารณาในแง่ของกระแสโมเมนตัมแต่เมื่อพิจารณาทั้งระดับแรงดันขนาด 115kV และกระแสโมเมนตัม การเลือกใช้รุ่น LTB D จึงมีความเหมาะสมมากที่สุด และการเลือกใช้ Power Circuit Breaker ตัวนี้มีความเหมาะสมทั้งในด้านของการใช้งานและในด้านราคาเนื่องจากว่า หากเลือกใช้ Power Circuit Breaker ที่ขนาดใหญ่กว่านี้ก็สามารถนำมาใช้ได้แต่มีราคาที่สูงขึ้น

ตาราง 8.7 ราคา Power circuit breaker ของ SIEMENS และ MEA

| บริษัท  | ยี่ห้อ  | ราคา(บาท) |
|---------|---------|-----------|
| SIEMENS | SIEMENS | 689,720   |
| MEA     | ABB     | 730,000   |

การเลือกใช้ขนาดของ Power Circuit Breaker เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าขนาดที่เลือกใช้เหมาะสมกับพิกัดกระแสและแรงดันของระบบและเป็นขนาดขั้นต่ำที่สุดที่สามารถนำมาใช้ได้ การพิจารณาเลือกใช้จึงควรมองในแง่ของราคาและการรับประกันของแต่ละยี่ห้อ

### 8.5 การเลือกขนาดของสวิตช์ตัดตอน (Selection of disconnecting switch)

สวิตช์ตัดตอน (Disconnecting switch) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการต่อหรือปลดวงจรในสภาวะที่ไม่มีกระแสเพื่อวัตถุประสงค์ในการบำรุงรักษา Power circuit breaker และสวิตช์ต้องปลดหลังจากการ Open circuit breaker ของวงจรแล้ว และต้องต่อวงจรก่อนที่จะ Close Power circuit breaker โดยตำแหน่งที่ติดตั้งสวิตช์ส่วนใหญ่จึงอยู่หัวท้ายของ Power circuit breaker และยังมีสวิตช์อีกประเภทหนึ่ง ที่ทำหน้าที่ต่อระบบสถานีไฟฟ้าลงดินโดยเรียกกันว่า Ground switch จะใช้งานตอนที่ต้องการบำรุงรักษาระบบเพื่อความปลอดภัยในการทำงาน จึงใช้สวิตช์ดังกล่าวในการต่อระบบดังกล่าวลงดิน เลือกตามมาตรฐาน IEC 129 และ 273 หรือ มาตรฐาน ANSI C37.30 ถึง C37.35 แสดงไว้ในภาคผนวก ก.ตาราง 21-27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 8.8 ขนาดสวิตช์ตัดตอนของ SIEMENS

| Parameter            | Primary |
|----------------------|---------|
| แรงดันที่กำหนด       | 115kV   |
| $I_{rated}$          | 125.51A |
| กระแสพิกัดของอุปกรณ์ | 1250    |

ตาราง 8.9 ขนาดของสวิตช์ตัดตอนของ MEA

| Parameter            | Primary |
|----------------------|---------|
| แรงดันที่กำหนด       | 115kV   |
| $I_{rated}$          | 125.51A |
| กระแสพิกัดของอุปกรณ์ | 600     |

การเลือกขนาดของ Disconnecting Switch จะพิจารณาเลือกขนาดจาก  $I_{rated}$  ที่ต้องมีค่าน้อยกว่ากระแสพิกัดของ Disconnecting Switch และพิจารณาจากระดับแรงดันในย่านการใช้งานของ Disconnecting Switch ให้เหมาะสมกับระบบ

SIEMENS เลือกใช้ Disconnecting Switch แบบ Horizontal double-side Break ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ระดับแรงดัน 72.5kV ถึง 245kV (ซึ่งระดับที่ใช้คือ 115kV) โดย Disconnecting Switch แบบ Horizontal Double Side Break จะเลือกใช้กับระดับพิกัดแรงไฟฟ้าต่ำๆ หลักการทำงานคือ ลูกถ้วยที่อยู่บริเวณขอบด้านนอกทั้งสองชุดจะอยู่ประจำตำแหน่งที่ไม่มีการเคลื่อนไหวยบนฐานเหล็ก ส่วนลูกถ้วยที่อยู่ตำแหน่งตรงกลางจะเป็นฐานของจุดหมุน โดยการหมุนสามารถหมุนได้ 60 องศาส่วนการติดตั้ง Earthing Switch จะติดตั้งได้ทั้งสองด้าน

MEA เลือกใช้ Disconnecting Switch แบบ Center-Break Disconnecter ชนิด SGF ของบริษัท Hapam ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ระดับแรงดัน 72.5kV ถึง 550kV (ซึ่งระดับที่ใช้คือ 115kV) โดยข้อมูลทางเทคนิค Disconnecting Switch แบบ Center-Break Disconnectors ของบริษัท HAPAM แสดงอยู่ในภาคผนวก ก.ตาราง28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 8.10 ราคาสวิตช์ตัดตอนของ SIEMENS และ MEA

| บริษัท  | ยี่ห้อ | ราคา(บาท) |
|---------|--------|-----------|
| SIEMENS | COELME | 431,940   |
| MEA     | HAPAM  | 400,000   |

การเลือกใช้นขนาดของ Disconnecting Switch เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าขนาดที่เลือกใช้เหมาะสมกับพิกัดกระแสและแรงดันของระบบและเป็นขนาดขั้นต่ำที่สุดที่สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาเลือกใช้จึงควรมองในแง่ของราคาและการรับประกันของแต่ละยี่ห้อ

การเลือกชนิดของ Disconnecting Switch โดยทั่วไปแล้ว MEA จะเลือกใช้ ชนิด Center-Break Disconnecter ซึ่งมีข้อดีกว่าแบบ Horizontal double-side break ตรงที่ใช้พื้นที่น้อยกว่า ระยะ Clearance น้อยกว่าเมื่อทำการ Interrupt ทำให้มีความปลอดภัยในการทำงานสูงกว่า

### 8.6 การเลือกขนาดของ Instrument Transformer CT&PT

มีไว้เพื่อแปลงพิกัดแรงดันและกระแสที่มีค่าสูงให้มีขนาดเล็กลงเพื่อนำไปใช้ในการวัดค่าต่างๆ สำหรับมิเตอร์และรีเลย์ในระบบป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยขดลวดที่ใช้ภายในของ Instrument Transformer ควรจะต้องมี loss ต่ำ ซึ่งในกรณีที่เรานำมาใช้เป็น Current transformer (CT) นั้นขดลวดด้านปฐมภูมิจำเป็นที่จะต้องสามารถนำกระแสที่ Normal Current และสภาวะการเกิดลัดวงจรได้ใน ขณะที่ Potential Transformer (PT) จะต้องต่อเข้าให้ใช้ได้กับ Rated voltage หรืออาจจะต้องทำงานในภาวะที่ไม่มีโหลดได้ แต่ไม่ว่าจะเป็น CT หรือ PT ขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะต้องแสดงค่าออกมาอย่างถูกต้องตามอัตราส่วนด้านปฐมภูมิ ยกเว้นว่าจะเกิดผิดพลาดบ้าง ขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิที่นำมาใช้มักจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะเป็น CT หรือ PT จำเป็นจะต้องมีความเป็นฉนวนสูงกว่า ในบางครั้งที่แรงดันพิกัดมีค่าสูงกว่า 110kV ขึ้นไป Instrument Transformer ก็อาจจะเป็นทั้ง CT และ PT ในตัวเดียวกัน

Instrument Transformer จะถูกแบ่งออกเป็นแต่ละประเภทจากความถูกต้องในการวัดตามมาตรฐานต่างๆ ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก.ตาราง 29 และจะกล่าวแยกเป็นหัวเรื่อง Current Transformer และ Potential Transformer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 8.6.1 การเลือกขนาดหม้อแปลงกระแส (Selection of Current transformer)

หม้อแปลงวัดกระแสทำหน้าที่ลดขนาดของกระแสลงมาเพื่อใช้ในงานวัดและระบบป้องกัน โดยมีขนาดเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่อยู่ทางด้านทุติยภูมิ โดยทั่วไปกระแสทางด้านทุติยภูมิจะมีขนาด 1A, 2A, 5A และมีหน้าที่แยกวงจรทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิออกจากกัน

ตามมาตรฐาน IEC Pub.185 (1987) ได้กำหนดพิกัดมาตรฐานสำหรับการนำมาใช้ โดยหากเป็น Class Measuring คือ Rate Output มีค่าเป็น 2.5, 5.0, 10, 15 และ 30VA (ที่ค่า Power factor เท่ากับ 0.8) และแบ่ง Class ออกเป็น 3 ประเภท ประเภทแรก มี Class 0.1, 0.2, 0.5 และ 1 สำหรับ CT ที่มีค่ากระแสด้านทุติยภูมิระหว่าง 25-100% ของ Rate Output ส่วนประเภทที่สอง มี Class 0.25 และ 0.5 สำหรับ CT ที่มีพิกัดกระแสด้านทุติยภูมิเป็น 5A เท่านั้น และประเภทสุดท้ายมี Class 3 และ 5 สำหรับ CT ที่มีกระแสด้านทุติยภูมิระหว่าง 50-100% ของ Rate Output ดังแสดงในภาคผนวก ก.ตาราง 30 แสดงพิกัด Burden ของ CT Class Metering Class Protection ตามที่มาตรฐาน IEC Pub.185 (1987) ได้กำหนด Rate Output ให้มีค่าเป็น 10, 15 และ 30VA และแบ่ง Class ออกเป็น 5P และ 10P เท่านั้น โดยในภาคผนวก ก. ตาราง 30 แสดงพิกัด Burden ของ CT Class Protection

ตาราง 8.11 แสดงการเชื่อมต่อของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าของบริษัท SIEMENS

| บริษัท  | แรงดัน | CT Ratio<br>( $N_p$ ) | Class         | หน้าที่   |
|---------|--------|-----------------------|---------------|---|
| SIEMENS | 115kV  | 150/1                 | 30VA CL0.5    | ส่งสัญญาณกระแสไปยัง Multifunction Meter, MEA Meter  |
|         |        |                       | 30VA CL0.5P20 | ส่งสัญญาณกระแสไปยัง Ground Overcurrent Relay, Overcurrent Relay เพื่อคอยสั่งการให้ CB trip เมื่อกระแสเกินและเชื่อมต่อกับ Transformer Diff Relay |
|         | 24kV   | 800/1                 | 10VA CL0.5    | ส่งสัญญาณกระแสไปยัง Multifunction Meter   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  |  |  |                  |  |
|--|--|--|------------------|--|
|  |  |  | 10VA<br>CL0.5P10 | ส่งสัญญาณกระแสไปยัง Ground<br>Overcurrent Relay, Overcurrent<br>Relay, Breaker failure Relay   |
|  |  |  | 15VA<br>CL0.5P20 | ส่งสัญญาณกระแสไปยัง Transformer<br>Differential Relay เพื่อตรวจ Ratio<br>ของกระแสทั้งสองด้าน เพื่อสั่งให้ CB<br>trip เมื่อ ratio ผิดปกติเนื่องมาจาก<br>ฟอลต์ |

ตาราง 8.12 แสดงการเชื่อมต่อของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าของ MEA

| บริษัท | แรงดัน | CT Ratio<br>(N <sub>p</sub> ) | Class          | หน้าที่  |
|--------|--------|-------------------------------|----------------|--|
| MEA    | 115kV  | 300-400/5                     | 50VA<br>CL5P20 | ส่งสัญญาณกระแส 30° ไปยัง Distance<br>Relay                       |
|        |        |                               | 50VA CL1       | ส่งสัญญาณกระแสไปยัง Amp Meter                                    |
|        |        |                               | 30VA CL1       | ส่งสัญญาณกระแส Wathour Meter                                     |
|        |        |                               | 30VA<br>CL5P10 | ส่งสัญญาณกระแสไปยัง Overcurrent<br>Relay, Transformer Diff Relay |
|        | 24kV   | 1000-<br>2000/5               | 30VA<br>CL5P10 | ส่งสัญญาณกระแส Overcurrent Relay,<br>Earth fault Relay           |
|        |        |                               | 30VA CL1       | ส่งสัญญาณกระแส Capacitor control,<br>Amp meter, Wathour meter    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 8.6.1.2 การคำนวณหา CT Ratio

ในด้านปฐมภูมิจะพิจารณาจากขนาดกระแสฟัด โดยต้องเลือก Ratio ด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงกระแสให้สูงกว่าขนาดกระแสฟัด ในด้านทุติยภูมิต้องทำการคำนวณโดยใช้สมการดังนี้

$$CT\ ratio_{sec} = \frac{(I_s)(CT\ ratio_{pri})}{I_p} \quad (8.5)$$

$I_s$  = กระแสฟัดในด้านทุติยภูมิ

$I_p$  = กระแสฟัดในด้านปฐมภูมิ

$CT\ ratio_{pri}$  = CT Ratio ของหม้อแปลงกระแสด้านปฐมภูมิ

$CT\ ratio_{sec}$  = CT Ratio ของหม้อแปลงกระแสด้านทุติยภูมิ

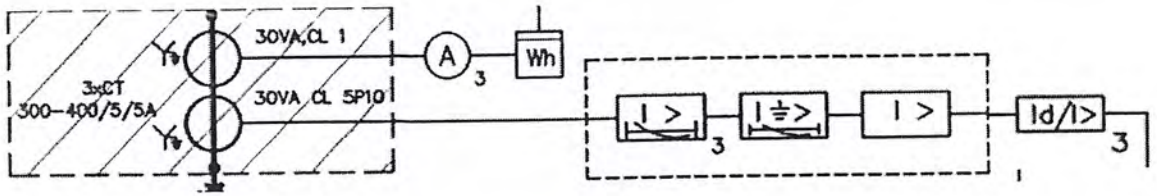
บริษัท SIEMENS การเลือกใช้ CT สำหรับการป้องกันและตรวจวัด จะพิจารณาจากขนาดกระแสฟัดของระบบ โดยในด้านแรงสูง (115kV) มีขนาดกระแสฟัดเท่ากับ 125.51 A และมีขนาดกระแสด้านแรงดันต่ำ (24kV) เท่ากับ 601.04 A จากค่าฟัดกระแสเหล่านี้เราจึงเลือกขนาด CT ด้านแรงดัน 115kV ให้มีค่ามากกว่า 125.51A

ดังนั้นจึงเลือกใช้ CT ที่ขั้ว Tap Pick-up ที่มีค่า  $CT\ ratio_{pri}$  เป็น 150/1 และในขณะเดียวกัน CT ด้านแรงดัน 24kV ควรจะมีค่าฟัดกระแสด้านทุติยภูมิของ CT เท่ากับ  $\frac{(601.04)(150)}{125.51} = 718.31$  ดังนั้นจึงเลือกใช้  $CT\ ratio_{sec}$  เป็น 800/1 A

MEA การเลือกใช้ CT สำหรับการป้องกันและตรวจวัด จะพิจารณาจากขนาดกระแสฟัดของระบบ โดยในด้านแรงสูง (115kV) มีขนาดกระแสฟัดเท่ากับ 125.51 A และมีขนาดกระแสด้านแรงดันต่ำ (24kV) เท่ากับ 601.04 A จากค่าฟัดกระแสเหล่านี้เราจึงเลือกขนาด CT ด้านแรงดัน 115kV ให้มีค่ามากกว่า 125.51A

ดังนั้นจึงเลือกใช้ CT ที่ขั้ว Tap Pick-up ที่มีค่า  $CT\ ratio_{pri}$  เป็น 300-400/5 และในขณะเดียวกัน CT ด้านแรงดัน 24kV ควรจะมีค่าฟัดกระแสด้านทุติยภูมิของ CT เท่ากับ  $\frac{(601.04)(150)}{125.51} = 718.31$  ดังนั้นจึงเลือกใช้  $CT\ ratio_{sec}$  เป็น 1000-2000/5 A

### 8.6.1.3 การหาขนาดของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า



รูป 8.1 แสดง Current Transformer พิกัด 300-400/5/5A CL5P10 30VA ของบริษัท Trench

กำหนดสายที่ใช้เชื่อมต่อภายในวงจรมีค่าความต้านทาน 0.1 โอห์ม

$$\text{พลังงานที่ใช้สำหรับสาย} = I^2 R = 5^2 \times 0.1 = 2.5 \text{ VA}$$

$$\text{พลังงานที่ใช้สำหรับ Overcurrent Relay} = 2.0 \text{ VA (ที่ 5 A)}$$

$$\text{พลังงานที่ใช้สำหรับ Ground Overcurrent Relay} = 5.0 \text{ VA (ในขณะที่ทำงาน)}$$

$$\text{พลังงานที่ใช้สำหรับ Transformer Differential Relay} = 1.0 \text{ VA}$$

$$\text{พลังงานที่ต้องการทั้งหมด (Total Power requirement)} = 10.5 \text{ VA}$$

ดังนั้นจะต้องเลือกหม้อแปลงกระแสที่มีขนาดอย่างน้อย 10.5 VA ในที่นี้ ในที่นี้จึงเลือกใช้ 30VA

หมายเหตุ: ข้อมูลการใช้พลังงานของรีเลย์แสดงไว้ในภาคผนวก ก.ตาราง 32; 33

### 8.6.1.4 การคำนวณ Overcurrent Factor ของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

MEA เลือกใช้ CT ที่ด้านแรงดัน 115kV มีพิกัด 300-400/5/5A CL5P10 30VA โดยพลังงานที่ต้องใช้ทั้งหมด (Total Power requirement) เท่ากับ 10.5 VA

$$\text{Overcurrent factor} = \frac{(S)(A.L.F)}{(\text{Total power requirement})} \quad (8.6)$$

*Overcurrent factor* = ค่าสำหรับกรณีที่หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าเกิด Overcurrent

*A. L. F* = Accuracy Limit Factor

*Total power requirement* = พลังงานที่ต้องการทั้งหมด

$$\begin{aligned} \text{Overcurrent factor} &= \frac{(S)(A.L.F)}{(\text{Total power requirement})} \\ &= \frac{(30\text{VA})(10)}{10.5\text{VA}} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Overcurrent Factor จะต้องมากกว่าพลังงานที่ต้องใช้ทั้งหมด แสดงจึงสามารถนำหม้อแปลงกระแสไฟฟ้านี้ไปใช้ได้ ซึ่งการเลือกนี้มีความเหมาะสมสามารถนำไปใช้งานได้

ตาราง 8.13 ราคาหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าของSIEMENS และMEA

| บริษัท  | ยี่ห้อ | ราคา(บาท) |
|---------|--------|-----------|
| SIEMENS | Trench | 558,030   |
| MEA     | Trench | 770,000   |

การเลือก Current Transformer จะต้องพิจารณาเลือกขนาด Current transformer จากระดับแรงดันที่จะใช้งานให้มีความเหมาะสม จากนั้นการกำหนด CT ratio ของ Current transformer จะพิจารณาจากค่ากระแสพิกัด  $I_{rated}$  ในด้านแรงดันต่ำหรือด้านแรงดันสูง โดยต้องกำหนดให้ CT ratio มีค่าสูงกว่าค่ากระแสพิกัด  $I_{rated}$  ในส่วนของด้านทุติยภูมิจะทำการเชื่อมต่อกับ Protection Relay หรือ Meter ต่างๆ ซึ่งการเลือกใช้ CT จะแบ่งตาม Class ที่เหมาะสมกับลักษณะงานที่จะนำไปใช้ และต้องคำนึงถึงความต้องการพลังงาน (Power requirement) ของ Protection Relay หรือ Meter ที่จะนำมาต่อ การเลือก Current Transformer ในด้านแรงดันสูง (115kV) ทั้ง MEA และ SIEMENS ใช้ CT Class TPX (5p10และ 5P20) ที่ใช้สำหรับป้องกัน Transient (IEC 44-6) ซึ่ง Class นี้เมื่อเกิดความไม่เสถียรของระบบขึ้นจะเกิด Error น้อย

การเลือก Current Transformer ของทั้งสองแห่งเลือกใช้ของบริษัท Trench โดยทางบริษัทSIEMENS ให้ทางTrench เป็น Supplier ของ SIEMENS ในการผลิต Current Transformer จึงทำให้ราคาที่ใช้ในนั้นถูกกว่า

#### 8.6.2 การเลือกขนาดหม้อแปลงแรงดัน (Selection of Voltage transformer)

หม้อแปลงวัดแรงดันจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ขดลวดเหนี่ยวนำและคาปาซิเตอร์โดยในการใช้งานเพื่อวัดระดับแรงดันที่สูงขึ้นจนถึง 765 kV นั้นการออกแบบขดลวดหม้อแปลงแบบขดลวดเหนี่ยวนำอาจจะยุ่งยากและไม่ประหยัด จึงได้มีการคิดค้นหม้อแปลงแบบคาปาซิเตอร์ขึ้น ซึ่งจะใช้หลักการแบ่งแรงดัน โดยVoltage transformer แบบ Capacitor จะใช้กับแรงดันตั้งแต่ 132kV ขึ้นไป เลือกตามมาตรฐาน ANSI/IEEE 57.13 การแบ่ง Class แสดงไว้ในภาคผนวก ก. ตาราง 29 และมาตรฐานต่าง แสดงในภาคผนวก ก.ตาราง 41-16

ตาราง 8.14 แสดงการเชื่อมต่อของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าของบริษัท SIEMENS

| บริษัท  | แรงดัน | VT Ratio               | Class      | หน้าที่  |
|---------|--------|------------------------|------------|--|
| SIEMENS | 115kV  | 115kV/115v<br>(1000/1) | 25VA CL0.5 | เชื่อมต่อกับ MEA Revenue Meter                             |
|         |        |                        |            | เชื่อมต่อกับ Under voltage Relay<br>และ Over voltage Relay |
|         | 24kV   | 24kV/110V<br>(220/1)   | 30VA CL0.5 | เชื่อมต่อกับ Multifunction Meter                           |

ตาราง 8.15 แสดงการเชื่อมต่อของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าของ MEA

| บริษัท | แรงดัน                  | VT Ration              | Class      | หน้าที่                                      |
|--------|-------------------------|------------------------|------------|--|
| MEA    | 115kV<br>(Line<br>No.1) | 115kV/115V<br>(1000/1) | 100VA CL1  | เชื่อมต่อกับ Under voltage Relay,<br>Meter   |
|        |                         |                        | 30VA CL3P  | เชื่อมต่อกับ Distance Relay                  |
|        | 115kV<br>(Line<br>No.2) | 115kV/115V<br>(1000/1) | 75VA CL0.3 | เชื่อมต่อกับ Under voltage Relay,<br>Meter   |
|        |                         |                        | 75VA CL0.3 | เชื่อมต่อกับ Meter                           |
|        |                         |                        | 30VA CL3P  | เชื่อมต่อกับ Distance Relay                  |
|        | 24kV                    | 24kV/120V<br>(200/1)   | 2000VA CL1 | เชื่อมต่อกับ Under frequency Relay,<br>Meter |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.16 ราคาของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าของทั้ง SIEMEN และ MEA

| บริษัท  | ยี่ห้อ | ราคา(บาท) |
|---------|--------|-----------|
| SIEMENS | Trench | 558,030   |
| MEA     | ABB    | 610,000   |

การเลือก Voltage Transformer จะพิจารณาจากระดับแรงดันและความถี่ของระบบที่จะนำมาใช้งาน ซึ่งทั้ง 2 บริษัทต่างเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสม โดยแสดงในภาคผนวก ก.ตาราง 48, 49 ข้อมูลทางเทคนิคของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเราจะเลือกใช้ตามความถี่และขนาดแรงดันของระบบในด้านที่จะทำการติดตั้ง

เมื่อเงื่อนไขทางด้านการใช้งานมีความเหมาะสมแล้วการพิจารณาเลือกใช้จึงต้องมองในแง่ของราคาและการรับประกันเหมือนอุปกรณ์ก่อนหน้านี้ ซึ่งการเลือก Voltage transformer ของบริษัท SIEMENS ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายไปได้ 51,970 บาท

### 8.7 การเลือกกับดักฟ้าผ่า (Selection of Surge arrester)

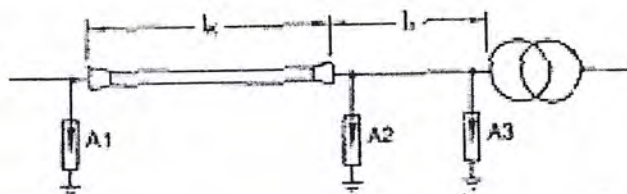
กับดักฟ้าผ่าจะทำงานเมื่อได้รับอิทธิพลของ Surge voltage หรือแรงดันเกินโดยใช้เวลาเพียงสั้นๆ ประมาณ  $1/100s$  ในการต่อ Live conductor ลงดินเพื่อ Discharge แรงดันเกินเนื่องจาก Surge ลงดินได้อย่างปลอดภัยและทำหน้าที่ป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าจากแรงดันเกินภายในสถานีไฟฟ้า เลือกตามมาตรฐาน ANSI C62.11 และมาตรฐาน IEC 99 ดังแสดงในภาคผนวก ก.ตาราง 50, 53-59

การเลือกขนาดพิจารณาจากระดับแรงดันของระบบ (Nominal system voltage) จากนั้นขนาดของ Surge arrester (Phase arrester) จะต้องคำนึงว่าระบบมีการต่อลงดินหรือไม่ หากมีระบบต่อลงดิน Earth fault factor ( $C_E$ ) เท่ากับ 1.4 หากไม่มีระบบต่อลงดิน Earth fault factor ( $C_E$ ) เท่ากับ  $\sqrt{3}$  ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเมื่อใช้แรงดันที่ระดับ 115kV จะเลือกใช้ Surge arrester ขนาด 96kV/10kA

ในสถานีไฟฟ้าย่อย ด้านแรงดัน 115kV จะมีการติดตั้ง Arrester เพื่อป้องกันตัวนำและหม้อแปลงตั้งใน Switchgear ตามตำแหน่งและระยะห่าง ตามที่แสดงไว้ในภาพ 8.7-1 ถ้าระยะมี

ระยะ  $I_x$  น้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 เมตร แล้วเราติด Arrester เพียงแค่ 2 ชุด คือ Arrester A1 ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำหน้าที่ป้องกันตัวนำและ Arrestor A3 ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันหม้อแปลง แต่ถ้าระยะ  $l_x$  มีระยะมากกว่า 5 เมตร ก็จะต้องเพิ่ม Arrestor A2 เข้าไปอีก 1 ตัว โดยมีระยะห่างจากหม้อแปลงเป็นระยะ  $l_1$  ซึ่งค่านี้ควรน้อยกว่าระยะ  $l_x$



รูป 8.2 ตำแหน่งการวางของ Arrestor ด้าน incoming (ที่มา : วิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาการติดตั้งและทดสอบ สถานีไฟฟ้าย่อย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2543)

ในการออกแบบของ SIEMENS จากระยะ Arrestor A1 ไปจนถึงระยะ Arrestor A3 อยู่ที่ 12m จะเห็นได้ว่าระยะเกิน 5m แต่ไม่ได้ออกแบบโดยใส่ Arrestor A2 ซึ่งก็เช่นเดียวกับทาง MEA ในการออกแบบได้ทำการใส่เพียงแต่ Arrestor A3 เพียงตัวเดียว ซึ่งตามหลักปฏิบัติเราสามารถติดตั้งไว้เฉพาะแค่เพียงหน้าหม้อแปลงกำลังซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สุดที่เราจะต้องป้องกันจาก Surge voltage เพียง 1 ตัวก็ได้

Surge Arrestor ของบริษัท SIEMENS เลือกโครงสร้าง Surge arrester แบบไม่มีแกนชนิด Metal Oxide ใน Class 3EQ ขนาด 96kV และกำหนดระดับการป้องกันกระแสไว้ที่ 10kA เนื่องจากที่ระดับแรงดันสูงกว่า 30kV จะต้องกำหนดระดับป้องกันกระแสไว้ที่ 10kA เหตุผลในการเลือกใช้ Class 3EQ เนื่องจาก Surge Arrestor ชนิดนี้ใช้ฉนวนแบบ Silicone Rubber (SR) ซึ่งเหมาะกับการใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งภายนอกอาคาร และคุณสมบัติที่ดีอีกข้อหนึ่งก็คือ Class 3EQ มีระดับการป้องกันสูงสุดดังนั้นเมื่อเกิด Short circuit ขึ้นก็ยังไม่ทำให้ระบบมี Reliability

การเลือกขนาดของ Surge Arrestor จะต้องพิจารณาจากระดับแรงดันของระบบและ Earth fault-factor ซึ่งในที่นี้มีระดับแรงดัน (Nominal system voltage) เท่ากับ 115kV ( $\approx 110kV$ ) และเป็นระบบที่มีระบบต่อลงดิน จึงมี Earth fault-factor ( $C_E$ ) เท่ากับ 1.4 จากภาคผนวก ก.ตาราง 50 จึงเลือกใช้ Surge Arrestor ขนาด 96kV

Surge Arrestor ของ MEA เลือกโครงสร้าง Surge arrester แบบไม่มีแกน (Gapless) ชนิด Metal-Oxide ยี่ห้อ ABB รุ่น PEXLIM เลือกใช้ขนาด 96kV และกำหนดระดับป้องกันกระแสไว้ที่ 10kA ซึ่งการเลือกขนาดพิจารณาตั้งในภาคผนวก ก.ตาราง 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 8.17 ราคาติดตั้งฟ้าผ่าของทั้ง SIEMENS และ MEA

| บริษัท  | ยี่ห้อ  | ราคา(บาท) |
|---------|---------|-----------|
| SIEMENS | SIEMENS | 262,760   |
| MEA     | ABB     | 310,000   |

การเลือก Surge Arrester ต้องคำนึงถึงระดับแรงดันของระบบ (Nominal system voltage) และ ระบบการต่อลงดินซึ่งมีผลต่อขนาดของ Surge arrester ดังในภาคผนวก ก. ตาราง 50 เมื่อเลือกใช้ขนาดที่เหมาะสมได้แล้วการเลือกชนิดของ ความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Resistor) ก็มีความสำคัญ ซึ่งหากเปรียบเทียบกันแล้วระหว่าง Surge arrester ชนิด Metal-Oxide กับชนิด SiC จะพบว่า ชนิด Metal-Oxide ดีกว่าตรงที่สามารถกำจัดกระแสตาม (Follow Current) ที่เกิดหลังจาก impulse ได้ดีกว่า, มีน้ำหนักเบากว่าและมีความทนทานมากกว่า ดังนั้นจากการเลือก Surge Arrester ทั้งบริษัท SIEMENS และ MEA ต่างเลือกใช้ ชนิด Metal Oxide จึงมีความเหมาะสม

การเลือก Surge Arrester ของบริษัท SIEMENS และ MEA เลือกใช้แบบไม่มีแกป (Gapless) ซึ่งหากเปรียบเทียบกับ Surge Arrester ชนิดที่มี Spark Gap เมื่อเกิดฟ้าผ่าและมีการแสไฟฟ้าไหลผ่าน Spark Gap จะทำให้อากาศหรือก๊าซเกิดการ Ionization แม้ว่ามีรีเลย์ป้องกันจะ Trip วงจรไฟฟ้าไปแล้ว การเกิด Ionization ก็ยังทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลอยู่ต่อไปได้ (Holding Current) แต่สำหรับ Surge Arrester ชนิด Gapless ปัญหาเช่นนี้จะไม่เกิดขึ้น เนื่องจาก Metal Oxide Block จะไม่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้อีกต่อไปหากการเกิด Overvoltage จบลงไปแล้ว

การติดตั้ง Surge arrester มีจำนวนที่แตกต่างกัน ซึ่งทางบริษัท SIEMENS เลือกติดตั้งที่ 2 จุด ส่วนทาง MEA เลือกติดตั้งแค่เพียงจุดเดียวคือที่บริเวณหน้าหม้อแปลงกำลัง (Power Transformer) ซึ่งการติดตั้งที่บริเวณหน้าหม้อแปลงกำลังเป็นสิ่งที่จำเป็นอยู่แล้ว แต่การที่บริษัท SIEMENS เลือกจะวางที่สาย incoming อีกตัวแสดงให้เห็นถึงว่าระบบจะมีความปลอดภัยสูงขึ้น เนื่องจากเป็นการป้องกัน Surge voltage ที่จะเข้ามาจากต้นทางได้

ในทางปฏิบัตินั้น ในต่างประเทศจะทำการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าไว้ที่บริเวณทั้งด้านหน้าและด้านหลังของตัวหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่เราต้องการป้องกัน โดยในการติดตั้งนั้นเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต้องติดตั้งไว้ให้ชิดกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ตามมาตรฐาน NEMA Power Switching Equipment Standard SG 6 ซึ่งแน่นอนว่าการติดตั้งจำนวนมากขึ้นก็ย่อมทำให้ราคาต้นทุนเพิ่มสูงขึ้นแต่ก็คุ้มค่าเมื่อเทียบกับความปลอดภัยทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สินที่มากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 9

### การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า

#### 9.1 การออกแบบของบริษัท ซีเมนต์

##### 9.1.1 หาค่า Surge Impedance ( $Z_s$ ) ของตัวนำ

จากสูตร  $Z_s = 60 \cdot (\ln(2h_e/R_c) \cdot \ln(2h_e/r_c))^{1/2}$  (9.1)

เมื่อ  $Z_s =$  เสรีจิมพีแดนซ์ของตัวนำ (โอห์ม)

$h_e =$  ความสูงของอุปกรณ์ที่จะป้องกัน (เมตร)

$R_c =$  รัศมีภายนอกของตัวนำ (เมตร)

$r_c =$  รัศมีภายในของตัวนำ (เมตร)

ในสถานีไฟฟ้าย่อยระดับแรงดัน 115/24 kv บริษัทซีเมนต์ จำกัด จะใช้สายตัวนำขนาด 400 Square mm. ซึ่งมีรัศมีภายนอกของตัวนำ และ รัศมีภายในของตัวนำ เป็น 0.0714 และ 0.0636 เมตร ตามลำดับ ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 20/25 MVA มี ความสูงที่ใช้ในการคำนวณเป็น 6.4 เมตร

แทนค่าในสมการที่ 1 :

$$Z_s = 60 \cdot (\ln(2 \cdot 6.4 / 0.0714) \cdot \ln(2 \cdot 6.4 / 0.0636))^{1/2}$$

$$Z_s = 314.64 \text{ โอห์ม}$$

##### 9.1.2 หาค่ากระแสฟ้าผ่า ( $I_s$ )

จากสูตร  $I_s = (2 \cdot \text{BIL}) / Z_s$  (9.2)

เมื่อ  $I_s =$  กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมป์)

$\text{BIL} =$  Basic impulse level ของอุปกรณ์ที่ถูกป้องกัน

แทนค่าในสมการที่ 2 :

$$I_s = (2 \cdot 550) / 314.64$$

$$I_s = 3.49 \text{ กิโลแอมป์}$$

##### 9.1.3 หาค่าระยะฟ้าผ่า (S)

จากสูตร  $S = 8.5 \cdot k \cdot (I_s)^{0.65}$  (9.3)

เมื่อ  $S =$  ระยะฟ้าผ่า (เมตร)

$K =$  ค่าคงที่มีค่า 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{แทนค่าในสมการที่ 3 ; } S = 8.5 \cdot 1.2 \cdot (3.49)^{0.65}$$

$$S = 22.98 \text{ เมตร}$$

#### 9.1.4 หาค่ารัศมีของพื้นที่ที่ถูกป้องกัน (r)

##### 9.1.4.1 คิดที่เสา take off structure

$$\text{จากสูตร} \quad r = S^2 - (S - h_m)^2)^{1/2} - (S^2 - (S - h_e)^2)^{1/2} \quad (9.4)$$

เมื่อ  $r =$  รัศมีของพื้นที่ที่ถูกป้องกัน (เมตร)

$h_m =$  take off structure + high mast (เมตร)

ในสถานีไฟฟ้าย่อยระดับแรงดัน 115/24 kv การไฟฟ้านครหลวง จะใช้ take off structure สูง 15 เมตร และ high mast 1.2 เมตร ดังนั้นความสูงของเสาไฟฟ้าในการคำนวณ คือ  $15 + 1.2 = 16.2$  เมตร

$$\text{แทนค่าในสมการ ; } r = (22.98^2 - (22.98 - 16.2)^2)^{1/2} - (22.98^2 - (22.98 - 6.4)^2)^{1/2}$$

$$r = 7.35 \text{ เมตร}$$

9.1.4.2 เพื่อเป็นการเพิ่มรัศมีการป้องกันให้ครอบคลุมทั้งสถานีไฟฟ้าย่อยจะติดตั้งนำล่อฟ้าที่เสาอีก ดันหนึ่งซึ่งมี

$$h_m = \text{ความสูงเสา} + \text{high mast} = 11.8 + 1.2 = 13 \text{ เมตร}$$

$$\text{แทนค่าในสมการ ; } r = (22.98^2 - (22.98 - 13)^2)^{1/2} - (22.98^2 - (22.98 - 6.4)^2)^{1/2}$$

$$r = 6.05 \text{ เมตร}$$

ในการออกแบบของบริษัท ซีเมนต์ จำกัด จะใช้ตัวนำล่อฟ้าชนิดทองแดง พื้นที่หน้าตัด 400 ตารางมิลลิเมตร ติดไว้ที่สองต้นโดยต้นแรกติดตั้งที่ take off structure มีความสูงติดตั้ง Air Terminal 16.2 เมตร ซึ่งจะมีระยะปลอดภัยมีระยะห่างจากเสาไฟฟ้าที่ระยะรัศมีการป้องกัน 7.35 เมตร ส่วนต้นที่สองติดตั้งที่ความสูงติดตั้ง 13 เมตร ซึ่งจะมีระยะปลอดภัยมีระยะห่างจากเสาไฟฟ้าที่ระยะรัศมีการป้องกัน 6.05 เมตร โดยสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งนี้มีการติดตั้ง Over Head Ground Wire ร่วมอยู่ด้วย โดยสามารถวาดไซนของการป้องกันได้ดังรูปที่ 9.1



## 9.2 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าของการไฟฟ้านครหลวง

### 9.2.1 หาค่า Surge Impedance ( $Z_s$ ) ของตัวนำ

จากสูตร  $Z_s = 60 \ln(2h_e/r)$  (9.5)

เมื่อ  $Z_s =$  เสรีจิมพีแดนซ์ของตัวนำ (โอห์ม)

$h_e =$  ความสูงของอุปกรณ์ที่จะป้องกัน (เมตร)

$r =$  รัศมีของตัวนำ (เมตร)

ในสถานีไฟฟ้าย่อยระดับแรงดัน 115/24 kv บริษัทซีเมนต์ จำกัด จะใช้สายตัวนำขนาด 400 Square mm. ซึ่งมีรัศมีของตัวนำ 0.0636 เมตร ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 20/25 MVA มีความสูงที่ใช้ในการคำนวณเป็น 5.35 เมตร

แทนค่าในสมการที่ 1 ;

$$Z_s = 60 \ln(2 \cdot 5.35 / 0.0636)$$

$$Z_s = 307.52 \text{ โอห์ม}$$

### 9.2.2 หาค่ากระแสฟ้าผ่า ( $I_s$ )

จากสูตร  $I_s = (2BIL) / Z_s$  (9.6)

เมื่อ  $I_s =$  กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมป์)

BIL = Basic impulse level ของอุปกรณ์ที่ถูกป้องกัน

แทนค่าในสมการที่ 2 ;

$$I_s = (2 \cdot 550) / 307.52$$

$$I_s = 3.57 \text{ กิโลแอมป์}$$

### 9.2.3 หาค่าระยะฟ้าผ่า (S)

จากสูตร  $S = 8.5 \cdot k \cdot (I_s)^{0.65}$  (9.7)

เมื่อ  $S =$  ระยะฟ้าผ่า (เมตร)

$K =$  ค่าคงที่มีค่า 1.2

แทนค่าในสมการที่ 3 ;

$$S = 8.5 \cdot 1.2 \cdot (3.57)^{0.65}$$

$$S = 23.35 \text{ เมตร}$$

## 9.2.4 หาค่ารัศมีของพื้นที่ที่ถูกป้องกัน (r)

### 9.2.4.1 คิดที่เสา take off structure

$$\text{จากสูตร} \quad r = (S^2 - (S - h_m)^2)^{1/2} - (S^2 - (S - h_e)^2)^{1/2} \quad (9.8)$$

เมื่อ  $r =$  รัศมีของพื้นที่ที่ถูกป้องกัน (เมตร)

$h_m =$  take off structure + high mast (เมตร)

ในสถานีไฟฟ้าย่อยระดับแรงดัน 115/24 kv บริษัทซีเมนต์ จำกัด จะใช้

take off structure สูง 15 เมตร และ high mast 0.8 เมตร ดังนั้นความสูงของเสาไฟฟ้าในการ

คำนวณ คือ  $15 + 0.8 = 15.8$  เมตร

$$\text{แทนค่าในสมการ ;} \quad r = (23.35^2 - (23.35 - 15.8)^2)^{1/2} - (23.35^2 - (23.35 - 5.35)^2)^{1/2}$$

$$r = 5.91 \text{ เมตร}$$

### 9.2.4.2 เพื่อเป็นการเพิ่มรัศมีการป้องกันให้ครอบคลุมทั้งสถานีไฟฟ้าย่อยจะติดตั้งนำ

ล่อฟ้าที่เสาด้านที่สองซึ่งมี  $h_m =$  ความสูงเสา + high mast =  $11.8 + 0.8 = 12.6$  เมตร

$$\text{แทนค่าในสมการ ;} \quad r = (23.35^2 - (23.35 - 12.6)^2)^{1/2} - (23.35^2 - (23.35 - 5.35)^2)^{1/2}$$

$$r = 4.59 \text{ เมตร}$$

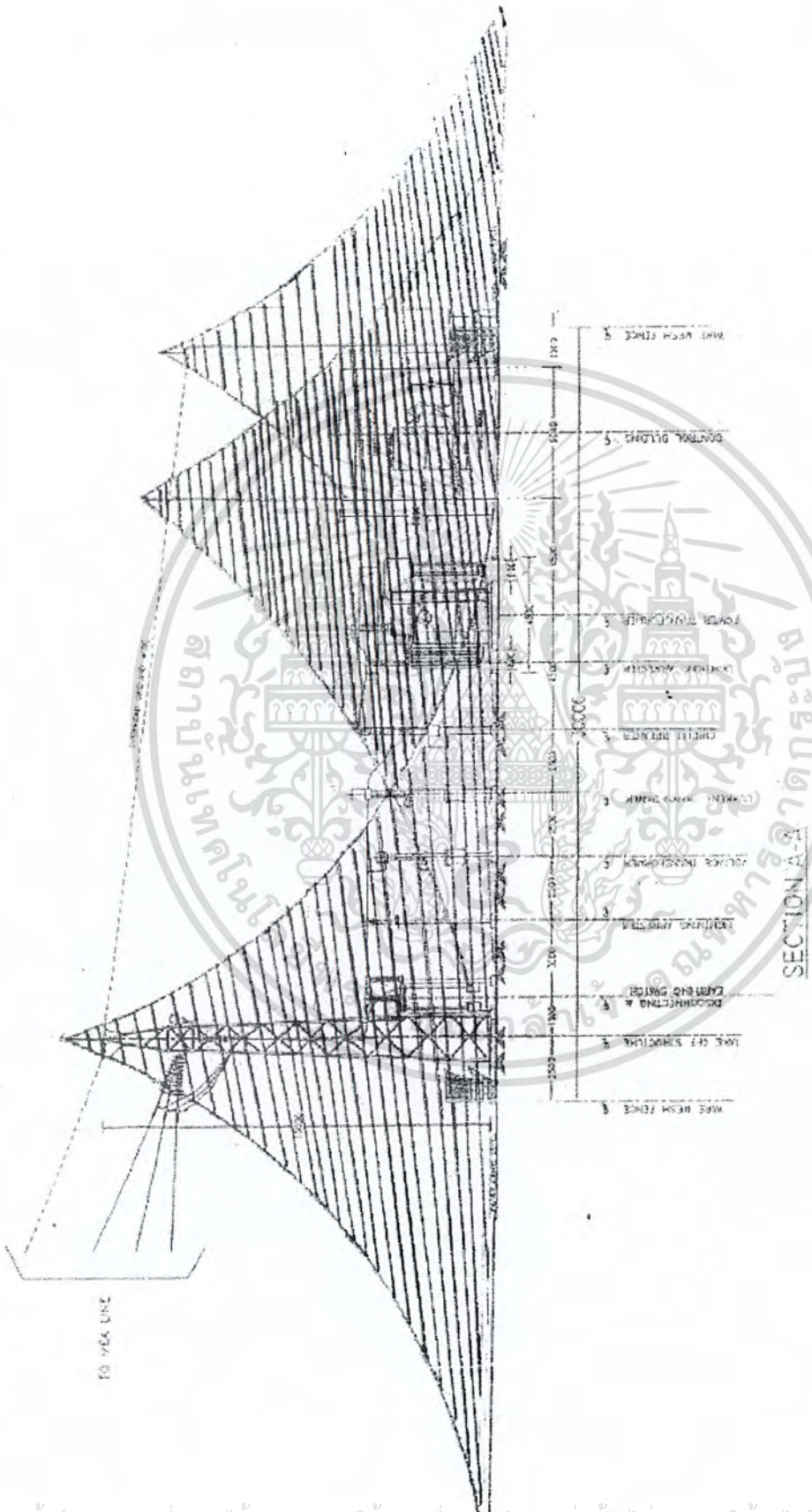
### 9.2.4.3 เพื่อเป็นการเพิ่มรัศมีการป้องกันให้ครอบคลุมทั้งสถานีไฟฟ้าย่อยจะติด

ตัวนำล่อฟ้าที่เสาด้านที่สาม ซึ่งมี  $h_m =$  ความสูงเสา + high mast =  $11 + 0.8 = 11.8$  เมตร

$$\text{แทนค่าในสมการ ;} \quad r = (23.35^2 - (23.35 - 11.8)^2)^{1/2} - (23.35^2 - (23.35 - 5.35)^2)^{1/2}$$

$$r = 3.94 \text{ เมตร}$$

ในการออกแบบของการไฟฟ้านครหลวง จะใช้ตัวนำล่อฟ้าชนิดทองแดง พื้นที่หน้าตัด 400 ตารางมิลลิเมตร ติดไว้ที่สามต้นโดยต้นแรกติดที่ take off structure มีความสูงติดตั้ง Air Terminal 15.8 เมตร ซึ่งจะมีระยะปลอดภัยมีระยะห่างจากเสาไฟฟ้าที่ระยะรัศมีการป้องกัน 5.91 เมตร ส่วนต้นที่สองติดที่ความสูงติดตั้ง 12.6 เมตร ซึ่งจะมีระยะปลอดภัยมีระยะห่างจากเสาไฟฟ้าที่ระยะรัศมีการป้องกัน 4.59 เมตร ต้นที่ 3 ติดตั้งที่ความสูง 11.8 เมตร มีรัศมีการป้องกัน 3.94 เมตร โดยสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งนี้มีการติดตั้ง Over Head Ground Wire ร่วมอยู่ด้วย ดังรูปที่ 9.2



รูปที่ 9.2 แสดงโชนป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/24 kV ของการไฟฟ้านครหลวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากกรณีของข้อ 1. และข้อ 2. เราทราบสเปคของตัวนำล่อฟ้าจากแบบที่กำหนดมาให้แล้วนำมาทำการคำนวณหาเสิร์จอิมพีแดนซ์และสามารถนำมาออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าได้ แต่ในหัวข้อต่อไปในการแนะนำการออกแบบจะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE std. 998-1996 ในการเลือกตัวนำฟ้าผ่า โดยจะสามารถทราบค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ได้

### 9.3 แนะนำการออกแบบ

อ้างอิงการออกแบบตามมาตรฐาน IEEE std. 998-1996 โดยเลือกการป้องกันระดับที่ 2 จะสามารถเลือกตัวนำล่อฟ้า ซึ่งมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ 317.14 โอห์ม และสามารถหาค่ากระแสฟ้าผ่าได้จาก

$$\text{จากสูตร} \quad I_s = (2BIL) / Z_s \quad (9.9)$$

$$\text{เมื่อ} \quad I_s = \text{กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมป์)}$$

BIL = Basic impulse level ของอุปกรณ์ที่ถูกป้องกัน

แทนค่าในสมการที่ 2 ;

$$I_s = (2 \cdot 550) / 317.14 \text{ โอห์ม}$$

$$I_s = 3.46 \text{ กิโลแอมป์}$$

หาค่าระยะฟ้าผ่า (S)

$$\text{จากสูตร} \quad S = 8.5 \cdot k \cdot (I_s)^{0.65} \quad (9.10)$$

$$\text{เมื่อ} \quad S = \text{ระยะฟ้าผ่า (เมตร)}$$

$$K = \text{ค่าคงที่มีค่า 1.2}$$

แทนค่าในสมการที่ 3 ;

$$S = 8.5 \cdot 1.2 \cdot (3.46)^{0.65}$$

$$S = 22.85 \text{ เมตร}$$

หาค่ารัศมีของพื้นที่ที่ถูกป้องกัน (r)

คิดที่เสา take off structure

$$\text{จากสูตร} \quad r = \sqrt{S^2 - (S - h_m)^2} - \sqrt{S^2 - (S - h_e)^2} \quad (9.11)$$

$$\text{เมื่อ} \quad r = \text{รัศมีของพื้นที่ที่ถูกป้องกัน (เมตร)}$$

$$h_m = \text{take off structure} + \text{high mast (เมตร)}$$

จะใช้ take off structure สูง 15 เมตร และ high mast 1.8 เมตร ดังนั้นความสูงของเสา ล่อฟ้าในการคำนวณ คือ  $15 + 1.8 = 16.8$  เมตร

$$\text{แทนค่าในสมการ ; } r = \sqrt{22.85^2 - (22.85 - 16.8)^2} - \sqrt{22.85^2 - (22.85 - 6.4)^2}^{1/2}$$

$$r = 6.18 \text{ เมตร}$$

เพื่อเป็นการเพิ่มรัศมีการป้องกันให้ครอบคลุมทั้งสถานีไฟฟ้าย่อยจะติดตั้งนำล่อฟ้าที่เสา อีกต้นหนึ่งซึ่งมี  $h_m = \text{ความสูงเสา} + \text{high mast} = 11.8 + 1.8 = 13.6$  เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{แทนค่าในสมการ ; } r = (22.85^2 - (22.85 - 13.6)^2)^{1/2} - (22.85^2 - (22.85 - 6.4)^2)^{1/2}$$

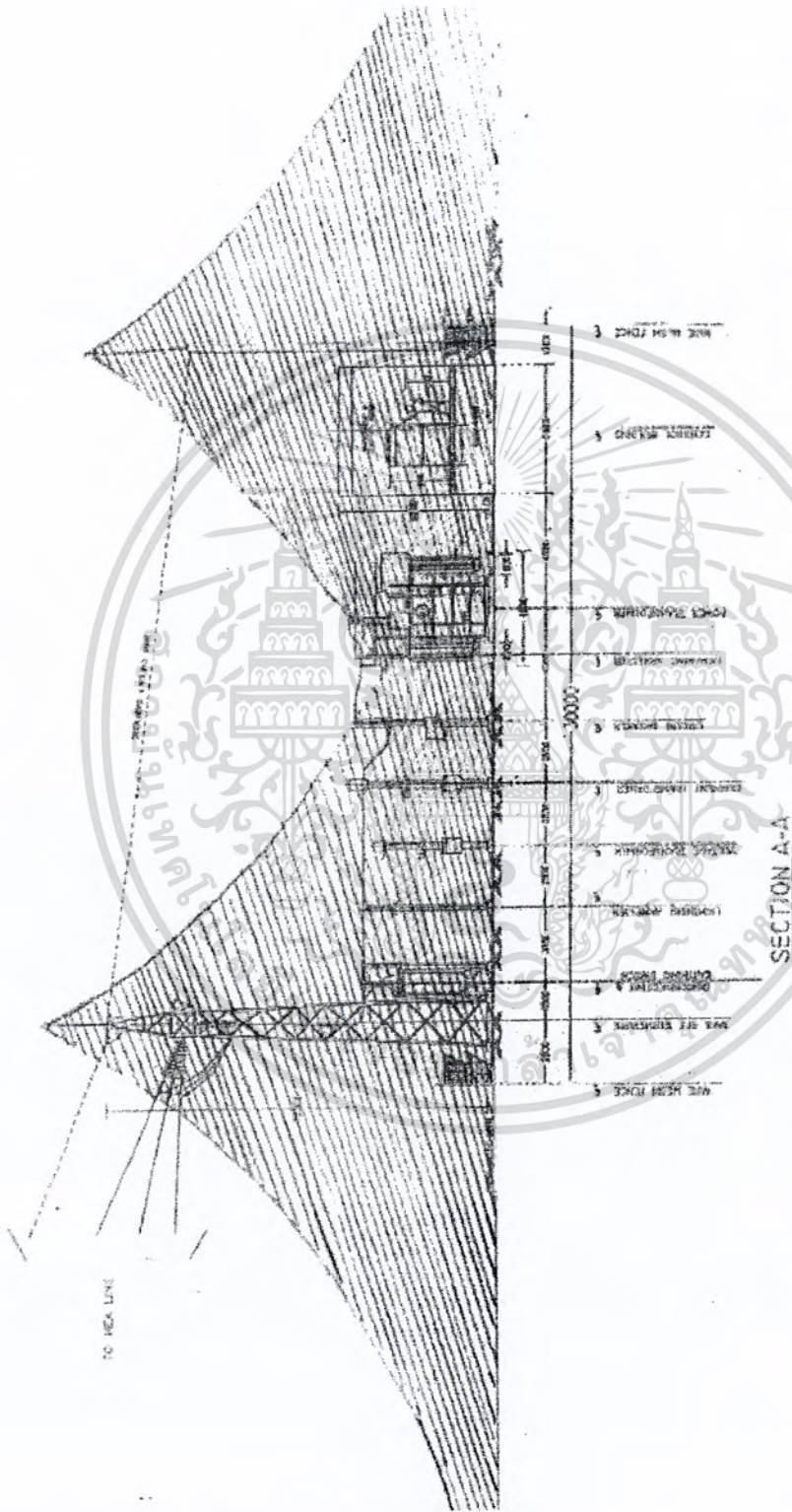
$$r = 5.04 \text{ เมตร}$$

ในการแนะนำออกแบบ จะใช้ตัวนำล่อฟ้าชนิดทองแดง พื้นที่หน้าตัด 360 ตารางมิลลิเมตร ติดไว้ที่สองต้นโดยต้นแรกติดที่ take off structure มีความสูงติดตั้ง Air Terminal 16.8 เมตร ซึ่งจะมีระยะปลอดภัยมีระยะห่างจากเสาล่อฟ้าที่ระยะรัศมีการป้องกัน 6.18 เมตร ส่วนต้นที่สองติดที่ความสูงติดตั้ง 13.6 เมตร ซึ่งจะมีระยะปลอดภัยมีระยะห่างจากเสาล่อฟ้าที่ระยะรัศมีการป้องกัน 5.04 เมตร โดยสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งนี้มีการติดตั้ง Over Head Ground Wire ร่วมอยู่ด้วย

ซึ่งจากการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าตามที่ได้แนะนำนั้นเมื่อवादโซนป้องกันแล้วนั้นสามารถป้องกันอุปกรณ์หลักต่างๆภายในสถานีไฟฟ้าย่อยได้และยังมีข้อได้เปรียบจาก 2 วิธีข้างต้นคือใช้ตัวนำล่อฟ้าซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่า ทำให้สามารถประหยัดเรื่องต้นทุนได้อีกแต่ก็ยังคงมีความปลอดภัยทางด้านวิศวกรรม ดังรูปที่ 9.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.3 แสดงโชนป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าขนาด 115/24 kV ของการศึกษารออกแบบโดยนักศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 10

### วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการศึกษา

#### 10.1 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการศึกษาของระบบการต่อลงดินในสถานีฟ้าย่อย

ตาราง 10.1 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานที่ใช้คำนวณระบบการต่อลงดินของแต่ละแห่ง

| การออกแบบระบบการต่อลงดิน  |                |         |
|---|----------------|---------|
| MEA   | BLACK & VEATCH | SIEMENS |
| ใช้มาตรฐาน ANSI/IEEE Std.80   |                |         |
| ในการออกแบบของนักศึกษา<br>ใช้มาตรฐาน ANSI/IEEE Std.80-2000<br>นำเสนอแนวทางการออกแบบระบบการต่อลงดินในสถานีฟ้าย่อยขนาดให้มีความ<br>เหมาะสมทางด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ |                |         |

ในการออกแบบระบบ Grounding ในสถานีฟ้าย่อย 115/24 kV ของ MEA, Black & Veatch, SIEMENS ต่างก็มีการอ้างอิงจากมาตรฐาน (IEEE Guide for safety is Substation Grounding: 80-2000) เช่นเดียวกัน

10.1.1 แนวทางในการออกแบบระบบการต่อลงดินให้มีความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

จุดประสงค์ในการออกแบบระบบการต่อลงดินในสถานีฟ้าย่อยขนาดให้มีความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

- เพื่อสามารถเลือกค่าเริ่มต้นในการออกแบบระบบการต่อลงดินในสถานีฟ้าย่อยได้อย่างเหมาะสมทั้งทางวิศวกรรมศาสตร์และเศรษฐศาสตร์

- ในการออกแบบออกแบบระบบการต่อลงดินไม่ต้องมีการออกแบบใหม่เพราะการออกแบบไม่มีความปลอดภัย ซึ่งจะไม่ทำให้เสียเวลาในการคำนวณ สามารถลดค่าใช้จ่ายในระบบการต่อลงดิน

10.1.2 หลักการในการออกแบบระบบการต่อลงดินให้มีความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

ซึ่งพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการออกแบบที่ทำให้เกิดความปลอดภัยและเหมาะสมทางด้านราคา คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### พารามิเตอร์ที่ควบคุมได้

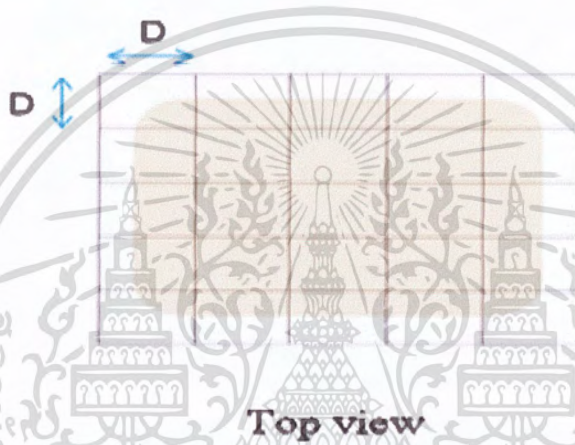
- ค่าความต้านทานของหินโรย ( $\rho_s$ )
- ค่าระยะห่างตัวนำที่ขนานกันของแต่ละตัวนำ ( $D$ )
- ค่าความลึกของ Ground Grid ( $h$ )

### พารามิเตอร์ที่ควบคุมไม่ได้

- ค่าความต้านทานของดินทางไฟฟ้า ( $\rho$ )
- ค่าความต้านทานของคน

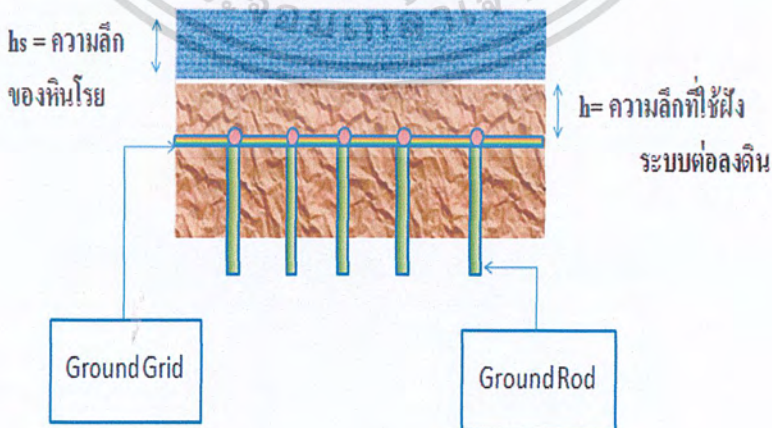
จากการศึกษาพบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการออกแบบที่ทำให้เกิดความปลอดภัย

- 1)  $D$  (ระยะห่างของตัวนำที่อยู่ใกล้กัน)



รูปที่ 10.1 แสดงระบบกริดด้าน Top view

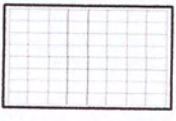
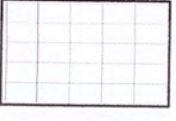

- 2)  $h$  (ความลึกของระบบกริด)



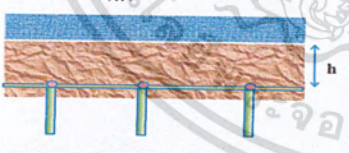
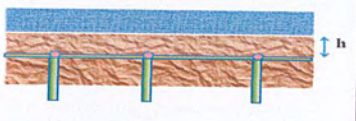
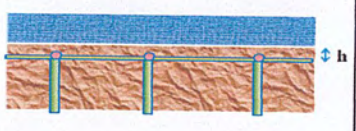
รูปที่ 10.2 แสดงระบบกริดด้าน Side view

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 10.2 แสดงการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างตัวนำกริดที่ขนานกัน (D) ที่มีผลต่อราคา

| ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดในการออกแบบให้มีความปลอดภัยคือ ระยะห่างระหว่างตัวนำกริดที่ขนานกัน (D) ซึ่งในการออกแบบจะส่งผลดังนี้ |                          |             |                    |
|--|--------------------------|-------------|--------------------|
| D  | ความปลอดภัย              | ตัวนำที่ใช้ | ราคาของวัสดุที่ใช้ |
| แคบ<br>                                 | สูง                      | มาก         | แพง                |
| กว้าง<br>                               | ต่ำ                      | น้อย        | ถูก                |
| - Optimization   | มีความปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ | เหมาะสม     | เหมาะสม            |
| กว้างมาก<br>                            | ไม่ปลอดภัย               | น้อยลง      | ถูกลง              |

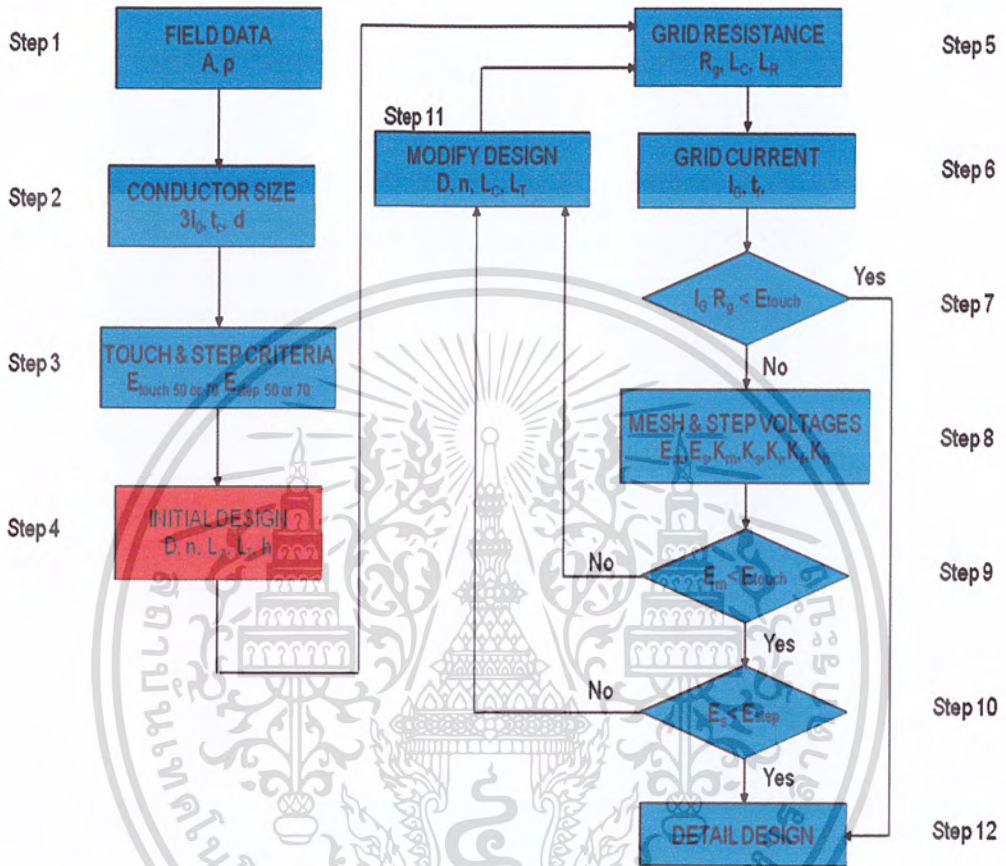
ตาราง 10.3 แสดงการเปรียบเทียบความลึกของกริดที่มีผลต่อราคา

| ปัจจัยที่มีผลรองลงมาในการออกแบบให้มีความปลอดภัยคือ ความลึกของการฝังกริด (h) ซึ่งในการออกแบบจะส่งผลดังนี้ |                          |                  |
|--|--------------------------|------------------|
| h  | ความปลอดภัย              | การลงทุนในการขุด |
| ลึก<br>               | มาก                      | มาก              |
| Optimization<br>      | มีความปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ | เหมาะสม          |
| ตื้น<br>              | น้อย                     | น้อย             |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 10.1.3 ขั้นตอนในการออกแบบระบบการต่อลงดินให้มีความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

ขั้นตอนในการออกแบบระบบการต่อลงดินให้มีความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ จะพิจารณาในการเลือกพารามิเตอร์ในการออกแบบใน step 4



รูปที่ 10.3 แสดงลำดับการออกแบบของระบบการต่อลงดิน มาตรฐาน IEEE Std. 80

จากมาตรฐาน IEEE 80 ได้กำหนดค่าในการออกแบบดังนี้

$D > 2.5$  (พารามิเตอร์หลัก)

$0.25 < h < 2.5$  (พารามิเตอร์รอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 10.4 แสดงขั้นตอนการออกแบบระบบการต่อลงดินให้มีความเหมาะสมทางด้านราคา และมีความปลอดภัยตามหลักวิศวกรรม และเศรษฐศาสตร์

|   |  |
|---|--|
| ขั้นตอนการออกแบบระบบการต่อลงดินให้มีความเหมาะสมทางด้านราคา และมีความปลอดภัย |  |
| พิจารณาจาก step 4 จาก Flow Chart ขั้นตอนการออกแบบระบบการต่อลงดิน (IEEE 80)  |  |
| 1.คำนวณ step1 step2 step3   |  |
| 2. กำหนดค่า D<br>(ระยะห่างระหว่างกริดตัวนำที่ขนานกัน)                       | 2. กำหนดค่า h<br>(ความลึกของตะแกรงกริด)                        |
| 3. พิจารณาจากเงื่อนไขของมาตรฐาน<br>D>2.5 (พารามิเตอร์หลัก)                  | 3. พิจารณาจากเงื่อนไขของมาตรฐาน<br>0.25<h<2.5 (พารามิเตอร์รอง) |
| 4. นำค่าพารามิเตอร์ทั้งสองไปคำนวณตามขั้นตอนต่อไป ใน (step 5 - step 8)       |  |
| 5. วิเคราะห์เลือกค่าที่เหมาะสมของ D และ h                                   |  |

ขั้นตอนที่ 1. พิจารณา step1 step2 step3

**step1**

- ขนาดพื้นที่ (A) คือ  $30 \times 16 = 480$  ตารางเมตร
- Soil Resistivity ( $\rho$ ) = 30 โอห์ม-เมตร

**step2**

d (เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำกริด)=13.41 mm เลือกชนิด standard Annealed soft copper wire

**step 3**

- $E_{touch50} = 502.28 \text{ V}$  ,  $E_{step50} = 1,661.12 \text{ V}$

ขั้นตอนที่ 2. กำหนดค่า D และ h

ขั้นตอนที่ 3. จากการกำหนดค่า D และ h จะต้องพิจารณาจากเงื่อนไขของมาตรฐาน IEEE 80 คือ  $D > 2.5 \text{ m}$  และ  $0.25 < h < 2.5 \text{ m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| D(ขมม) | h(ขมม) | Lr | Lc | Em | Es |
|--------|--------|----|----|----|----|
| 2.5    | 0.5    |    |    |    |    |
| 2.5    | 1      |    |    |    |    |
| 2.5    | 1.5    |    |    |    |    |
| 2.5    | 2      |    |    |    |    |
| 2.5    | 2.5    |    |    |    |    |
| 3      | 0.5    |    |    |    |    |
| 3      | 1      |    |    |    |    |
| 3      | 1.5    |    |    |    |    |
| 3      | 2      |    |    |    |    |
| 3      | 2.5    |    |    |    |    |
| 3.5    | 0.5    |    |    |    |    |
| 3.5    | 1      |    |    |    |    |
| 3.5    | 1.5    |    |    |    |    |
| 3.5    | 2      |    |    |    |    |
| 3.5    | 2.5    |    |    |    |    |
| 4      | 0.5    |    |    |    |    |
| 4      | 1      |    |    |    |    |
| 4      | 1.5    |    |    |    |    |
| 4      | 2      |    |    |    |    |
| 4      | 2.5    |    |    |    |    |
| 4.5    | 0.5    |    |    |    |    |
| 4.5    | 1      |    |    |    |    |
| 4.5    | 1.5    |    |    |    |    |
| 4.5    | 2      |    |    |    |    |
| 4.5    | 2.5    |    |    |    |    |

2. กำหนดค่า D และ h

เป็นค่าที่ออกแบบ  
ความมาตรฐาน ต่ำ  
มาใช้โดย  
กำหนด

3. พิจารณาจากเงื่อนไขของมาตรฐาน  
จากมาตรฐาน IEEE 80 ได้  
กำหนดค่าในการออกแบบดังนี้  
 $D > 2.5$  (พารามิเตอร์หลัก)  
 $0.25 < h < 2.5$  (พารามิเตอร์รอง)

รูปที่ 10.4 แสดงการกำหนดค่า D และ h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอนที่ 4. คำนวณผลจากโปรแกรมจาก step 5 – step 8

### ตาราง 10.5 แสดงผลจากการคำนวณของโปรแกรม

4. คำนวณผลจาก  
โปรแกรม  
จาก step5 –  
step8

| D(mm) | h(mm) | Lr  | Lc  | Em       | Es       |
|-------|-------|-----|-----|----------|----------|
| 2.5   | 0.5   | 270 | 540 | 285.1133 | 1333.832 |
| 2.5   | 1     | 270 | 540 | 283.9835 | 908.6754 |
| 2.5   | 1.5   | 270 | 540 | 301.7949 | 751.5525 |
| 2.5   | 2     | 270 | 540 | 323.2388 | 665.2889 |
| 2.5   | 2.5   | 270 | 540 | 344.2124 | 609.2176 |
| 3     | 0.5   | 220 | 440 | 412.6601 | 1433.614 |
| 3     | 1     | 220 | 440 | 399.5038 | 953.3084 |
| 3     | 1.5   | 220 | 440 | 413.9629 | 778.9753 |
| 3     | 2     | 220 | 440 | 436.1132 | 684.3373 |
| 3     | 2.5   | 220 | 440 | 459.7011 | 623.2075 |
| 3.5   | 0.5   | 211 | 422 | 463.4943 | 1401.03  |
| 3.5   | 1     | 211 | 422 | 441.155  | 913.5899 |
| 3.5   | 1.5   | 211 | 422 | 448.9767 | 739.1377 |
| 3.5   | 2     | 211 | 422 | 466.7715 | 645.3813 |
| 3.5   | 2.5   | 211 | 422 | 487.69   | 585.2093 |
| 4     | 0.5   | 177 | 354 | 624.7263 | 1517.981 |
| 4     | 1     | 177 | 354 | 587.6339 | 970.9164 |
| 4     | 1.5   | 177 | 354 | 589.42   | 777.2746 |
| 4     | 2     | 177 | 354 | 605.4186 | 674.1047 |
| 4     | 2.5   | 177 | 354 | 626.9608 | 603.2958 |
| 4.5   | 0.5   | 161 | 322 | 743.0008 | 1568.354 |
| 4.5   | 1     | 161 | 322 | 693.6088 | 986.9056 |
| 4.5   | 1.5   | 161 | 322 | 688.8944 | 782.8888 |
| 4.5   | 2     | 161 | 322 | 700.3071 | 674.9953 |
| 4.5   | 2.5   | 161 | 322 | 719.7575 | 606.5599 |

เป็นค่าจากการ  
ออกแบบที่มี  
ความปลอดภัย

หมายเหตุ : ตัวแปรที่กำหนดให้คงที่คือ ความยาวรวมของแท่งกราวนรีหรือคือ 50% ของ ความยาวรวมของกราวนรีกริด

#### 10.1.4 วิเคราะห์ผลเลือกค่าการออกแบบที่เหมาะสมจากผลการทดลอง

##### ขั้นที่ 1

$$E_m < E_{touch50} \quad \text{และ} \quad E_s < E_{step50}$$

##### ขั้นที่ 2

เลือก  $L_r, L_c$  ที่มีค่าน้อยที่สุด จะส่งผลต่อจำนวนตัวนำทั้ง Ground Grid และ Ground Rod ที่ใช้มีจำนวนที่ลดลง

##### ขั้นที่ 3

เลือกความลึกที่น้อยที่สุดเพื่อไม่ต้องมีการลงทุนเรื่องการขุดมากขึ้นหรือการปรับยกพื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 10.1.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ตาราง 10.6 แสดงการวิเคราะห์ผลการทดลอง

| D(เมตร) | h(เมตร) | Lr  | Lc  | Em       | Ea       |
|---------|---------|-----|-----|----------|----------|
| 2.5     | 0.5     | 270 | 540 | 285.1133 | 1333.632 |
| 2.5     | 1       | 270 | 540 | 283.9835 | 908.0754 |
| 2.5     | 1.5     | 270 | 540 | 301.7040 | 751.5525 |
| 2.5     | 2       | 270 | 540 | 323.2388 | 665.2889 |
| 2.5     | 2.5     | 270 | 540 | 344.2124 | 609.2176 |
| 3       | 0.5     | 220 | 440 | 412.0001 | 1433.614 |
| 3       | 1       | 220 | 440 | 399.5038 | 953.3084 |
| 3       | 1.5     | 220 | 440 | 413.9029 | 778.9753 |
| 3       | 2       | 220 | 440 | 436.1132 | 684.3373 |
| 3       | 2.5     | 220 | 440 | 459.7011 | 623.2075 |
| 3.5     | 0.5     | 211 | 422 | 403.4943 | 1401.03  |
| 3.5     | 1       | 211 | 422 | 441.155  | 913.5809 |
| 3.5     | 1.5     | 211 | 422 | 446.9767 | 739.1377 |
| 3.5     | 2       | 211 | 422 | 466.7715 | 645.3813 |
| 3.5     | 2.5     | 211 | 422 | 487.09   | 585.2093 |
| 4       | 0.5     | 177 | 354 | 624.7268 | 1517.981 |
| 4       | 1       | 177 | 354 | 567.8389 | 970.9164 |
| 4       | 1.5     | 177 | 354 | 599.42   | 777.2740 |
| 4       | 2       | 177 | 354 | 605.4185 | 674.1047 |
| 4       | 2.5     | 177 | 354 | 626.9608 | 608.2958 |
| 4.5     | 0.5     | 161 | 322 | 743.0008 | 1588.354 |
| 4.5     | 1       | 161 | 322 | 693.8098 | 988.9056 |
| 4.5     | 1.5     | 161 | 322 | 688.3944 | 782.8888 |
| 4.5     | 2       | 161 | 322 | 700.3071 | 674.0953 |
| 4.5     | 2.5     | 161 | 322 | 719.7575 | 608.5509 |

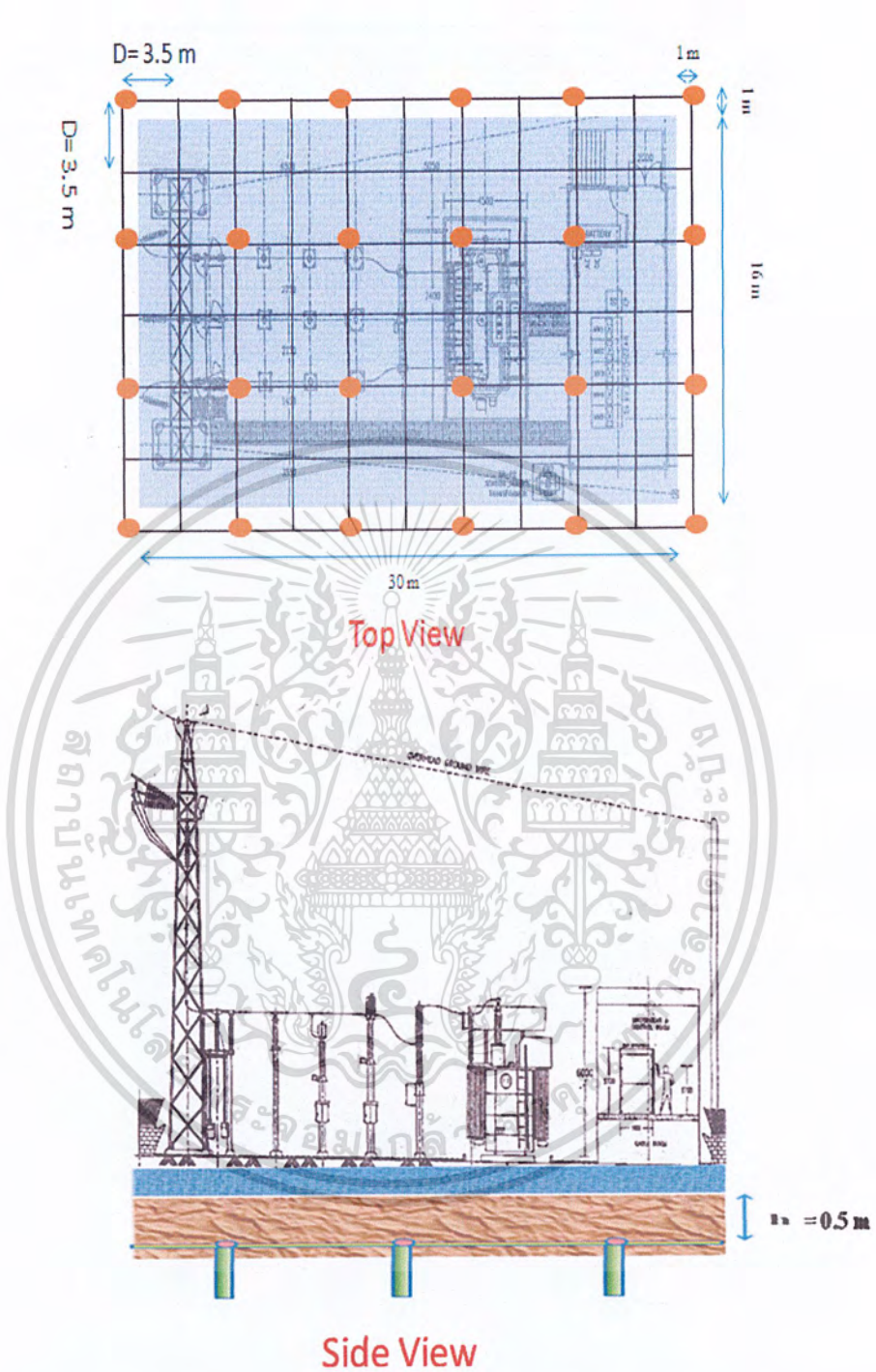
3. เลือกกระยะ  
ความลึกของ  
การฝังกริดที่  
น้อยที่สุด

1. เลือกค่าจาก  
การออกแบบที่  
มีความ  
ปลอดภัย

2. เลือกความยาว  
ของตัวนำที่มี  
ความยาวรวม  
น้อยที่สุด

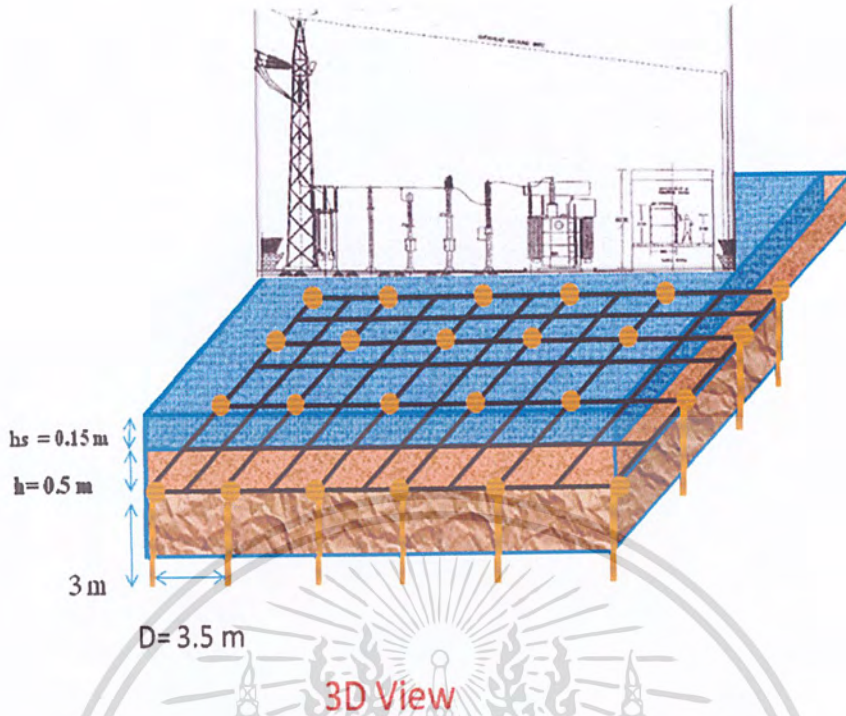
ดังนั้นจากการคำนวณจะเลือกใช้  $D = 3.5 \text{ m}$ ,  $h = 0.5 \text{ m}$  ซึ่งจะทำให้การออกแบบประหยัดและปลอดภัย แต่อาจจะไม่ดีที่สุดเพราะถ้ามีการคำนวณที่ละเอียดขึ้นอาจจะมึระยะที่เหมาะสมมากกว่า แต่การคำนวณนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบได้

ผลการออกแบบระบบการทดลองดินให้มีความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมและ  
เศรษฐศาสตร์



รูปที่ 10.5 แสดงผลการทดลองด้าน Top View และ Side View

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10.6 แสดงผลการทดลองด้าน 3D View

10.1.5 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลองระบบการต่อลงดินในสถานี่ไฟฟ้าย่อยให้มีความเหมาะสมทั้งทางด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

จากการคำนวณจะเลือกใช้  $D=3.5\text{ m}$  ,  $h=0.5\text{ m}$  ซึ่งจะทำให้การออกแบบตรงตามหลักวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ นั่นคือมีทั้งความปลอดภัยต่อผู้ที่ทำงานในสถานี่ไฟฟ้าย่อยและวัสดุที่ใช้มีราคาถูกเหมาะสม

#### ข้อดี

1. เป็นการเลือกค่าเริ่มต้นในการออกแบบโดยไม่ต้องมีการประมาณระยะ  $D$  และ  $h$  ในการออกแบบซึ่งค่าที่ประมาณมานั้นอาจจะไม่ถูกต้องในการออกแบบ
2. ไม่ต้องมีการ Redesign เนื่องจากการออกแบบไม่มีความปลอดภัย
3. ทำให้มีความปลอดภัยที่ยอมรับได้และราคาค่าวัสดุจากเหล็กถูกเหมาะสม

#### ข้อแนะนำ

- การคำนวณที่มีความละเอียดมากขึ้นก็จะทำให้การออกแบบมีความเหมาะสมมากขึ้น

## 10.2 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการศึกษาของการเลือกอุปกรณ์บนลานไกในสถานีไฟฟ้าย่อย

บทนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์และวิจารณ์การออกแบบของทั้ง 2 บริษัท ดังนี้

ตาราง 10.7 วิเคราะห์การเลือกใช้อุปกรณ์ของบริษัท SIEMEN และ MEA

| อุปกรณ์               | วิเคราะห์  |
|-----------------------|--|
| Power Transformer     | - การเลือกหม้อแปลงราคาขึ้นอยู่กับ Impedance voltage (%Z) โดยยิ่งถ้าระบบต้องแรงดันที่หนึ่งจะต้องลด %Z ลงแต่ต้องแลกมาด้วยราคาที่สูงขึ้นและกระแสฟอลต์ที่สูงขึ้นด้วย ซึ่งทาง SIEMEN ใช้หม้อแปลงของบริษัท DAIHEN ซึ่งมี %Z=12% ส่วนหม้อแปลงของ MEA มี %Z=7% จะเห็นว่าหม้อแปลงที่ MEA เลือกใช้เกิดกระแสฟอลต์สูงกว่าและราคาสูงกว่า อีกทั้งยังส่งผลไปถึงอุปกรณ์ป้องกันต่างๆที่ต้องมีขนาดใหญ่มากขึ้นเพื่อที่จะรองรับกระแสฟอลต์ที่มากขึ้นนี้ได้ แต่การที่มี %Z น้อย ก็ทำให้แรงดันมีความเสถียรมากกว่า   |
| Wire (115kV)          | - ทั้ง SIEMEN และ MEA เลือกใช้สายขนาด 400 sq.mm ที่มี Ampacity 855A ซึ่งสามารถรองรับกระแสขนาด 156.88A ได้ ซึ่งการเลือกขนาดสายถ้าในกรณีที่ไม่ต้องการเผื่อโหลดในอนาคต การเลือกขนาด 400sq.mm ดูจะเป็นการจะเป็นการสิ้นเปลืองเกินไปเนื่องจากที่ระดับกระแส 156.88A ในตาราง ก-10 ในภาคผนวก ซึ่งเป็นตารางแสดงขนาดสาย AAC เราสามารถเลือกใช้ขนาด 70sq.mm ซึ่งมี Ampacity 190A ก็เพียงพอแล้ว  |
| Wire (24kV)           | - ทั้ง SIEMEN และ MEA เลือกใช้สาย ชนิด XLPE Power Cable แบบ Single Core เลือกใช้สายขนาด 400 sq.mm ที่มี Ampacity 840A ซึ่งสามารถรองรับกระแสที่กระแสขนาด 751.75A ได้อย่างเพียงพอ จึงเป็นการออกแบบได้อย่างเหมาะสม โดยในฝั่งแรงดันด้านนี้จะไม่มีการเผื่อขนาดสายไว้สำหรับการเพิ่มโหลดในอนาคตดังที่ได้กล่าวไปแล้ว จากตาราง ก-11 ในภาคผนวก ซึ่งเป็นตารางแสดงขนาดสาย XLPE สายขนาด 400 sq.mm เป็นขนาดเล็กที่สุดที่สามารถรองรับกระแส 751.75A ได้ (300sq.mm ; Ampacity 740) ซึ่งการเลือกใช้สายขนาดนี้จึงมีความเหมาะสมทั้งในด้านการใช้งานและเศรษฐศาสตร์ |
| Power Circuit Breaker | - ทั้ง SIEMEN และ MEA เลือกใช้ขนาดของ Power Circuit Breaker เหมาะสมกับพิกัดกระแสและแรงดันของระบบและเป็นขนาดขั้นต่ำที่สุดที่สามารถนำมาใช้ได้ ดังนั้นการพิจารณาเลือกใช้จึงควรมองในแง่ของราคาและการรับประกันของแต่ละยี่ห้อจากตัวอย่างการเลือกใช้จากทั้ง 2 บริษัท จึงควรเลือก Power Circuit Breaker ของบริษัท SIEMEN ที่มีราคาถูกกว่า ABB 40,280 บาท   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                        |   |
|------------------------|---|
| Disconnecting Switch   | - SIEMEN เลือกใช้แบบ Horizontal double-side Break (SIEMEN) และ MEA เลือกใช้แบบ Center-Break Disconnecter break (HAPAM) ซึ่งการเลือกใช้ของ MEA ดีกว่า SIEMEN ตรงที่แบบ Center-Break Disconnecter break ใช้พื้นที่น้อยกว่า ระยะClearance น้อยกว่าเมื่อทำการ Interrupt ทำให้มีความปลอดภัยในการทำงานสูงกว่า อีกทั้งราคาของยี่ห้อ HAPAM ยังถูกกว่าของSIEMEN 31,940 บาท |
| Instrument Transformer | - หากมองในด้านการใช้งาน ทั้ง SIEMEN และ MEA เลือกใช้ได้อย่างเหมาะสม แต่หากมองในด้านเศรษฐศาสตร์ราคาของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า และหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าของ Trench ที่บริษัท SIEMEN เลือกใช้มีราคาถูกกว่าโดย หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า SIEMEN มีราคาถูกกว่า 211,970 บาท และหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า SIEMEN มีราคาถูกกว่า 51,970 บาท ดังนั้นการเลือกใช้ของ SIEMEN จึงดีกว่า MEA          |
| Surge Arrester         | - ทั้ง SIEMEN และ MEA เลือกใช้แบบไม่มีแก๊ป(Gapless) ขนาด 96kV,10kA ซึ่งการเลือกเป็นไปตามมาตรฐานสำหรับขนาดแรงดัน 115kV การพิจารณาจะมองในแง่ของตำแหน่งในการติดตั้ง ซึ่งจะกล่าวอยู่ใน ตาราง6.2   |

ตาราง 10.8 วิเคราะห์การออกแบบระบบของบริษัท SIEMEN และ ABB

|               |   |
|---------------|---|
| ระบบ          | - SIEMEN ที่เป็นแบบ 1 incoming line และการออกแบบระบบของ MEA เป็นแบบ 2 incoming lines ซึ่งแบบ 2incoming lines ระบบมีการรับไฟฟ้าขนาดแรงดัน 115kV เข้ามาจากสายส่งสองวงจร ทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือมากกว่าเนื่องจากหากเกิดการลัดวงจรของวงจรหนึ่งก็ยังมีอีกวงจรหนึ่งที่สามารถจ่ายโหลดได้<br>- เนื่องจาก MEA เป็นแบบ 2incoming lines แน่แน่นอนว่าระบบย่อมมีความน่าเชื่อถือสูงแต่ก็ต้องแลกมาด้วยจำนวนอุปกรณ์ป้องกันชนิดต่างๆที่ต้องติดตั้งเข้าไปในทั้งสองวงจรจึงทำให้ราคาของสถานีไฟฟ้าย่อยสูงขึ้น |
| การจัดวาง บัส | - วางบัสแบบ Radial Bus เนื่องจากเป็นสถานีไฟฟ้าย่อยขนาดเล็กไม่มีความซับซ้อน และการวางบัสแบบนี้มีราคาถูก แต่มีข้อเสียคือความน่าเชื่อถือต่ำ ซึ่งทั้ง SIEMEN และ MEA แก้ไขปัญหาในจุดนี้คือการ ในด้านแรงดันต่ำ (24kV) เลือกใช้ Withdraw able Circuit Breaker ซึ่งเป็นชนิดที่ หากเสียหรือแม้ต้องมีการถอดออกไปซ่อมบำรุง กระแสไฟฟ้าก็ยังสามารถไหลผ่านใน feeder นั้นได้ ทำให้สามารถจ่ายโหลดได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือสูงขึ้น   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <p>การติดตั้งกับ<br/>ดักฟ้าผ่า</p> | <p>การออกแบบทั้งสองโดยรวมแล้วคล้ายคลึงกัน แต่จะมีข้อที่แตกต่างกันบ้างดังนี้</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า SIEMEN เลือกวางกับดักฟ้าผ่าไว้สองตำแหน่ง คือที่หน้าหม้อแปลงกำลังและต้นทางของสาย incoming ซึ่งมีความปลอดภัยสูงกว่า การออกแบบของ MEA ที่ติดตั้งเพียงตัวเดียวไว้ที่หน้าหม้อแปลงกำลัง เนื่องจากหากเกิดแรงดันเกินเนื่องจากเมื่อเกิดฟ้าผ่าในสายส่งกับกักฟ้าผ่าตัวนี้จะสามารถดักฟ้าผ่าได้ก่อนที่จะผ่านเข้ายังอุปกรณ์ป้องกัน เช่น หม้อแปลงกระแส หม้อแปลงแรงดัน เซอร์คิตเบรกเกอร์ ซึ่งอาจเกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์เหล่านี้ได้เนื่องจากขนาดของกระแสฟ้าผ่านั้นสูงถึง 10-20kA ส่วนสาเหตุของ MEA ที่เลือกวางไว้ที่หน้าหม้อแปลงกำลังเพียงที่เดียวนั้นก็เพราะเห็นว่าหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ และมีราคาสูงที่สุดในสถานีไฟฟ้าย่อย</li> </ul> |
| <p>ระบบรีเลย์<br/>ป้องกัน</p>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- การออกแบบระบบรีเลย์ป้องกัน (Protection Relay) ทั้งสองแห่งเลือกใช้คล้ายๆกัน แต่การออกแบบระบบของ MEA มีความปลอดภัยสูงกว่าตรงที่เลือกใช้ Temperature Relay และ Butchholtz Relay เพื่อป้องกันความเสียหายที่หม้อแปลง โดย Temperature Relay จะช่วยป้องกันความเสียหายจากความร้อนที่สูงเกินปกติ และ Butchholtz Relay ซึ่งตรวจวัดระดับก๊าซในถังเก็บน้ำมันเพื่อเป็นการตรวจสอบฟอลต์หรือการรั่วซึมภายในหม้อแปลง</li> </ul>  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 10.9 เปรียบเทียบการเลือกอุปกรณ์ SIEMEN และ ABB

| Company<br>Equipment  | Sizing  | SIEMEN   | MEA   |
|-----------------------|---|--|---|
| Power Transformer     | Load Demand   | -ต่อขดลวดแบบ Dyn1 ซึ่งเหมาะกับระบบที่มีขนาดเกิน 315kVA(ระบบนี้ 25MVA)<br><br>-Impedance Voltage (% Z) เท่ากับ 12%<br>ทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือต่ำกว่าแต่ราคาหม้อแปลงถูกกว่า | -ต่อขดลวดแบบ Dyn1 ซึ่งเหมาะกับระบบที่มีขนาดเกิน 315kVA(ระบบนี้ 25MVA)<br><br>-Impedance Voltage (% Z) เท่ากับ 7%<br>ทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือสูงกว่าแต่ราคาหม้อแปลงแพงกว่า |
| Wire (115kV)          | $I_{rated} = \frac{MVA}{(\sqrt{3})(115kV)}$<br>$I_{rated} < I_{Maximum\ Capacity}$  | AAC 400sq.mm<br><br>เลือกขนาดสายที่สามารถรองรับกระแสได้อย่างเหมาะสม และเผื่อไว้สำหรับการเพิ่มโหลดในอนาคตเพื่อรองรับกระแสที่มากขึ้นได้โดยไม่ต้องทำการเปลี่ยนสายใหม่           | AAC 400sq.mm<br><br>เป็นเลือกขนาดสายที่สามารถรองรับกระแสได้อย่างเหมาะสม และเผื่อไว้สำหรับการเพิ่มโหลดในอนาคตเพื่อรองรับกระแสที่มากขึ้นได้โดยไม่ต้องทำการเปลี่ยนสายใหม่      |
| Wire (24kV)           | $I_{rated} = \frac{MVA}{(\sqrt{3})(24kV)}$<br>$I_{rated} < I_{Maximum\ Capacity}$   | XLPE Cable 400sq.mm<br><br>เลือกขนาดสายที่สามารถรองรับกระแสได้อย่างเหมาะสม   | XLPE Cable 400sq.mm<br><br>เลือกขนาดสายที่สามารถรองรับกระแสได้อย่างเหมาะสม  |
| Power Circuit Breaker | $I_{2/50kV} = \frac{I_{rated}}{0.6Z}$<br>$I_{Maximum} = I_{2/50kV} \times k$<br>$I_{Circuit\ Breaker} > I_{Maximum}$  | Power Circuit Breaker Type 3AP1<br><br>เลือกขนาดได้อย่างเหมาะสม<br><br>ราคาถูกกว่า   | Live Tank Circuit Breaker Type LTB D<br><br>เลือกขนาดได้อย่างเหมาะสม<br><br>ราคาแพงกว่า   |
| Disconnecting Switch  | - พิจารณาจากระดับแรงดันของระบบ<br><br>- $I_{rated} = \frac{MVA}{(\sqrt{3})(24kV)}$<br><br>- $I_{rated} < I_{Maximum\ Capacity}$   | ชนิด Horizontal double-side Break<br><br>มีระยะClearance เมื่อทำการ Interrupter สูงกว่า<br><br>ราคาแพงกว่า   | ชนิด Center-Break Disconnecter<br><br>มีระยะClearance เมื่อทำการ Interrupter น้อยกว่า ทำให้ปลอดภัยต่อการทำงาน<br><br>ราคาถูกกว่า  |
| Current Transformer   | - พิจารณาจากระดับแรงดันของระบบ<br><br>- CT ratio( $N_p$ ) พิจารณาจาก $I_{rated}$<br><br>- Overcurrent Factor<br>$= \frac{(VA) \times (ALF)}{(Total\ Power\ requirement)}$ | Current Transformer Type Oil filled<br><br>เลือกขนาดได้และกำหนดค่าCT Ratio ได้อย่างเหมาะสม<br><br>ทั้งสองบริษัทใช้ CT ยี่ห้อTrench เหมือนกัน แต่ SIEMEN ได้ราคาถูกกว่า       | Current Transformer Type Oil filled<br><br>เลือกขนาดได้และกำหนดค่าCT Ratio ได้อย่างเหมาะสม<br><br>ทั้งสองบริษัทใช้ CT ยี่ห้อTrench เหมือนกัน แต่ MEA ชื่อราคาแพงกว่า        |
| Voltage Transformer   | - พิจารณาจากระดับแรงดันและความถี่ของระบบ  | Capacitor Voltage Transformer<br><br>เลือกขนาดได้อย่างเหมาะสม<br><br>ราคาถูกกว่า   | Capacitor Voltage Transformer<br><br>เลือกขนาดได้อย่างเหมาะสม<br><br>ราคาแพงกว่า  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                |   |   |  |
|----------------|---|---|--|
| Surge Arrester | <ul style="list-style-type: none"> <li>- พิจารณา Nominal System Voltage จากนั้นเลือกขนาด S/A จาก Phase arrester ในตาราง</li> <li>- <math>C_2 = 1.4</math> Earthing</li> <li>- <math>C_2 = \sqrt{3}</math> Non-Earthing</li> </ul> | ชนิด Gapless Metal-Oxide<br>ระบบปลอดภัยและมีความน่าเชื่อถือสูงกว่าเนื่องจากติดตั้ง S/A ไว้ 2 ตำแหน่ง<br>ราคาถูกกว่า | ชนิด Gapless Metal-Oxide<br>มีการติดตั้ง S/A ไว้เพียงแค่หน้าหม้อแปลงกำลังเท่านั้น จึงทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบต่ำกว่า<br>ราคาแพงกว่า |
|----------------|---|---|--|

ตาราง 10.10 เปรียบเทียบการออกแบบระบบระหว่างบริษัท SIEMEN และ MEA

| Company<br>System      | SIEMEN  | MEA   |
|------------------------|---|---|
| One line diagram       | 1 incoming line ระบบความน่าเชื่อถือต่ำ เนื่องจากหากเกิดการลัดวงจรของสายส่งจะส่งผลให้ไม่สามารถจ่ายโหลดได้อีกต่อไป                | 2 incoming lines ระบบมีความน่าเชื่อถือสูง เนื่องจากหากเกิดการลัดวงจรของวงจรหนึ่งก็ยังมีอีกวงจรหนึ่งที่สามารถจ่ายโหลดได้   |
| การจัดวางบัส           | วางบัสแบบ Radial Bus และเลือกใช้ Withdraw able Circuit Breaker ซึ่งทำให้ช่วยแก้ไขจุดต่อด้านความน่าเชื่อถือของการวางบัสแบบนี้ได้ | วางบัสแบบ Radial Bus และเลือกใช้ Withdraw able Circuit Breaker ซึ่งทำให้ช่วยแก้ไขจุดต่อด้านความน่าเชื่อถือของการวางบัสแบบนี้ได้   |
| การติดตั้งกับดักฟ้าผ่า | ติดตั้งดักฟ้าผ่าไว้สองตำแหน่งคือที่หน้าหม้อแปลงกำลังและต้นทางของสาย incoming  | ติดตั้งเพียงตัวเดียวไว้ที่หน้าหม้อแปลงกำลัง   |
| ระบบรีเลย์ป้องกัน      | Relay ป้องกันเลือกใช้คล้ายกันแต่ต่างกันที่ไม่มี Relay สำหรับป้องกันหม้อแปลงกำลัง  | Relay ป้องกันเลือกใช้คล้ายกันแต่ต่างกันที่<br>- เลือกใช้ Temperature ที่ช่วยป้องกันความเสียหายจากความร้อนที่สูงเกินปกติของขดลวดหม้อแปลง<br>- เลือกใช้ Butchholtz Relay ซึ่งตรวจวัดระดับก๊าซในถังเก็บน้ำมันเพื่อเป็นการตรวจสอบฟอลต์หรือการรั่วซึมภายในหม้อแปลง |

หมายเหตุ: การเปรียบเทียบนี้ สมมุติให้หม้อแปลงกำลังในแผนภาพวันไลน์ (รูป ก-13) ของ MEA มีขนาด 20/25MVA เท่ากันกับขนาดหม้อแปลงกำลังในแผนภาพวันไลน์ (รูป ก-14) ของบริษัท SIEMEN เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันให้เห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งวัตถุประสงค์คือต้องการแสดงให้เห็นถึงถ้าการออกแบบถูกกำหนดมาภายใต้เงื่อนไขเดียวกันคือโหลดเท่ากับ 20/25MVA แล้วทั้งสองแห่งจะออกแบบวันไลน์และเลือกใช้จัดวางอุปกรณ์อย่างไร

ตาราง 10.11 สรุปรูปแบบที่เราจะเลือก (อุปกรณ์)

| Equipment             | Company | Selection  |
|-----------------------|---------|--|
| Power Transformer     |         | - ไม่เลือกการกำหนด Percent Impedance ตามการออกแบบของทั้งสองแห่ง ซึ่งค่าที่เหมาะสมต้องกำหนดให้เท่ากับ 9.5% จึงเหมาะสมตามมาตรฐาน NEMA  |
| Wire (115kV)          |         | - เลือกการกำหนดขนาดสายตามการออกแบบของทั้งสองแห่ง ซึ่งมีการเลือกที่เหมือนกัน และขนาดสายที่ใช้มีความเหมาะสมที่สุด (เมื่อขนาดมาแล้วและเป็นสายขนาดเล็กที่สุดที่สามารถรองรับกระแสที่เมื่อมาแล้วได้ทำให้ประหยัด) |
| Wire (24kV)           |         | - เลือกการกำหนดขนาดสายตามการออกแบบของทั้งสองแห่ง ซึ่งมีการเลือกที่เหมือนกัน และขนาดสายที่ใช้มีความเหมาะสมที่สุด (เมื่อขนาดมาแล้วและเป็นสายขนาดเล็กที่สุดที่สามารถรองรับกระแสที่เมื่อมาแล้วได้ทำให้ประหยัด) |
| Power Circuit Breaker |         | - เลือกใช้ตาม SIEMEN เนื่องจากราคาถูกกว่า (ในด้านการใช้งานเลือกใช้เหมาะสมเหมือนกัน ต่างกันตรงราคา)   |
| Disconnecting Switch  |         | - เลือกใช้ตาม MEA เนื่องจากชนิด Center-Break Disconnecter มีระยะ Clearance เมื่อทำการ Interrupter น้อยกว่า ทำให้ปลอดภัยต่อการทำงานกว่า และมีราคาถูกกว่า  |
| Current Transformer   |         | - เลือกใช้ตาม SIEMEN เนื่องจากราคาถูกกว่า (ในด้านการใช้งานเลือกใช้เหมาะสมเหมือนกัน ต่างกันตรงราคา)   |
| Voltage Transformer   |         | - เลือกใช้ตาม SIEMEN เนื่องจากราคาถูกกว่า (ในด้านการใช้งานเลือกใช้เหมาะสมเหมือนกัน ต่างกันตรงราคา)   |
| Surge Arrester        |         | - เลือกใช้ตาม SIEMEN เนื่องจากราคาถูกกว่า (ในด้านการใช้งานเลือกใช้เหมาะสมเหมือนกัน ต่างกันตรงราคา)   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 10.12 สรุปรูปแบบที่เราจะเลือก (ระบบต่างๆ)

| System                 | Company | Selection   |
|------------------------|---------|---|
| One line diagram       |         | - เลือกใช้ตามการออกแบบของ MEA เนื่องจากระบบมี 2 incoming lines จึงทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือสูงเนื่องจากหากเกิดการลัดวงจรของวงจรหนึ่งก็ยังเหลืออีกวงจรหนึ่งที่สามารถจ่ายโหลดได้   |
| การจัดวางบัส           |         | - เลือกใช้ตามการออกแบบของทั้งสองแห่ง (วางบัสรูปแบบเดียวกัน) เนื่องจากการวางบัสแบบ Radial Bus ถึงแม้ว่าจะมีความน่าเชื่อถือต่ำแต่ก็ราคาถูกซึ่งแก้ไขโดยใช้ Withdraw able Circuit Breaker ซึ่งทำให้ช่วยแก้ไขจุดด้อยด้านความน่าเชื่อถือของการวางบัสแบบนี้ได้ |
| การติดตั้งกับดักฟ้าผ่า |         | - เลือกใช้ตามการออกแบบของ SIEMEN เนื่องจากติดตั้งดักฟ้าผ่าไว้สองตำแหน่งคือที่หน้าหม้อแปลงกำลังและต้นทางของสาย incoming ระบบมีความน่าเชื่อถือสูงกว่า   |
| ระบบรีเลย์ป้องกัน      |         | - เลือกใช้ตามการออกแบบของ MEA เนื่องจากใช้ Temperature Relay ที่ช่วยป้องกันความเสียหายจากความร้อนที่สูงเกินปกติของขดลวดหม้อแปลง และ Butchholtz Relay ซึ่งตรวจวัดระดับก๊าซในถังเก็บน้ำมันเพื่อเป็นการตรวจสอบฟอลต์หรือการรั่วซึมภายในหม้อแปลง             |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.3 การจัดวางระยะห่างของอุปกรณ์หลักภายในสถานี่ไฟฟ้าแรงสูง 115/24 kV โดยมีการจัดวางบัสแบบ Single Bus

ตาราง 10.13 การจัดวางระยะห่างของอุปกรณ์หลักภายในสถานี่ไฟฟ้าแรงสูง 115/24 kV โดยมีการจัดวางบัสแบบ Single Bus

| company             |         | company |         | company  |         | company  |          |
|---------------------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|----------|
| Ø - Ø spacing (cm.) | SIEMENS | MEA     | SIEMENS |          | MEA     | SIEMENS  |          |
|                     |         |         | Minimum | Standard | Minimum | Standard | Standard |
| DS                  | 225     | 225     | cm.     | cm.      | cm.     | cm.      | cm.      |
| L/A                 | 225     | 225     | 106.68  | 250      | 106.68  | 250      | 250      |
| VT                  | 225     | 225     | 106.68  | 150      | 106.68  | 170      | 170      |
| CT                  | 225     | 225     | 106.68  | 300      | 106.68  | 300      | 300      |
|                     |         |         | 106.68  | 250      | 106.68  | 300      | 300      |
|                     |         |         | 106.68  | 250      | 106.68  | 250      | 250      |
|                     |         |         | 106.68  | 300      | 106.68  | 450      | 450      |
|                     |         |         | 106.68  | 150      | 106.68  | 200      | 200      |
|                     |         |         | 106.68  | 500      | 106.68  | 500      | 500      |
|                     |         |         | 106.68  | 150      | 106.68  | 200      | 200      |

เมื่อ TOS คือ Take of Structure (เสาโครงสร้างเหล็ก)

ข้อเสนอแนะที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบ

ระยะห่างที่ปลอดภัยทางไฟฟ้าของ MEA มีมากกว่าของ SIEMENS ทำให้มีความสะดวกมากกว่าเนื่องจากมีพื้นที่ว่างมากกว่าสำหรับ

1.1 การซ่อมบำรุงในแต่ละอุปกรณ์ในสถานี่ไฟฟ้าย่อมเมื่อเกิดความเสียหาย

1.2 การขนย้ายอุปกรณ์ในสถานี่ไฟฟ้าโดยด้วยขนาดใหญ่ เคน หรือการใช้เครื่องจักรกลหนัก

1.3 มีความปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงาน อุปกรณ์ไฟฟ้า และสัตว์ในสถานี่ไฟฟ้า

1.4 การปฏิบัติงานภายในงานอาคารควบคุม งานรั้วสถานี่และประตูทางเข้า งานแสงสว่างภายนอก และงานโครงเหล็ก

เนื่องจาก MEA มีระยะห่างที่ปลอดภัยทางไฟฟ้ามากกว่า SIEMENS ดังนั้นในการออกแบบระบบล่อฟ้าผ่า (ซึ่งต้องมีระยะห่างที่ปลอดภัยทางไฟฟ้า เป็น Input) จึงต้องมีระยะป้องกันฟ้าผ่าสูงตามไปด้วยจึงจะเกิดความปลอดภัยแก่คน สัตว์ และอุปกรณ์ภายในสถานี่ไฟฟ้า

จะเห็นได้ว่าระยะห่างของอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบทั้ง ของ MEA และ SIEMENS มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน NEMA และ IEC เนื่องจากมาตรฐานเป็นเพียงค่าที่แยที่พอจะยอมรับได้ถ้ามีพื้นที่เพียงพอ ผนวกกับต้องการประโยชน์ของ MEA และ IEC นอกจากนี้อาจจัดให้สวยงามและมีระเบียบตามของผู้ออกแบบก็ได้ ถ้ามีพื้นที่เพียงพอ

ตัวแปรที่มีผลต่อการจัดวางระยะปลอดภัยทางไฟฟ้าอีกอย่างก็คือ Design ทางโยธา เนื่องจากอุปกรณ์หลักของสถานี่ไฟฟ้าอยู่ตามโครงเหล็ก ที่ยึดติดบนฐานคอนกรีต (ซึ่งเป็น Design ทางโยธา)

การจัดวางระยะห่างที่ปลอดภัยทางไฟฟ้าระหว่าง เฟส-เฟส นั้น ถ้าสถานี่ไฟฟ้าโดยมีเนื้อที่ความกว้างที่จำกัด ไม่สามารถจัดระยะห่างที่ปลอดภัยทางไฟฟ้าตามค่า Minimum ที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานได้ ก็ควรจะเลือกเป็นการปรับเปลี่ยนระยะสูงต่ำของโครงเหล็กแทนได้ (ซึ่งปกติจะมีความสูงเท่ากันระหว่างเฟส) เพื่อให้ได้ระยะห่างที่เป็นไปตามมาตรฐาน

การจัดวางระยะห่างที่ปลอดภัยทางไฟฟ้าของทั้ง MEA และ SIEMENS จะพบวาระระยะห่างที่ปลอดภัยทางไฟฟ้าของ Power Transformers ทั้ง 2 ด้านจะมีค่าสูงกว่าระยะอื่น ๆ เนื่องจาก Power Transformers เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความสำคัญ มีราคาแพงที่สุด มีขนาดใหญ่ในการเคลื่อนย้ายต้องใช้พื้นที่มาก และต้องถูกดูแลให้มีความปลอดภัยสูงเนื่องจากถ้าเกิดระเบิดหรือเกิดความเสียหายจะมีอาณาภาในการทำลายล้างมากกว่าอุปกรณ์อื่น ๆ และเกิดความเสียหายทั้งด้านชีวิต ทรัพย์สิน และทำให้เสียเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

ตาราง 10.14 ข้อเสนอแนะที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบการติดตั้งของอุปกรณ์หลักภายในสถานี่ไฟฟ้าแรงสูง 115/24 kV.

|    | ข้อเสนอแนะที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบ   |
|----|---|
| 7. | ทั้ง MEA และ SIEMENS จะมีระยะปลอดภัยทางไฟฟ้าระหว่างเฟส - เฟส เท่ากัน และระยะ เฟส a - b และ b - c มีค่าเท่ากัน เนื่องจากอุปกรณ์ชนิดเดียวกัน แต่ละเฟส (a,b,c) จะมีความสูงเท่ากัน ซึ่งต่างจากระยะปลอดภัยทางไฟฟ้าของแต่ละอุปกรณ์ ซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากมีรูปร่างที่ออกแบบของอุปกรณ์ไม่เท่ากันและมีความสำคัญอุปกรณ์ไม่เท่ากัน   |
| 8. | การออกแบบจัดระยะห่างที่ปลอดภัยทางไฟฟ้าของทั้ง MEA และ SIEMENS จะทำให้มีพื้นที่เผื่อขยายในอนาคตในกรณีที่มีความต้องการ load เพิ่มขึ้น   |
| 9. | เมื่อเราพิจารณาในแง่ของการ Maintenance Service Clearance แล้วทางด้านการจัดวางระยะห่างที่ปลอดภัยทางไฟฟ้าของ SIEMENS สามารถทำได้ง่ายกว่าเนื่องจากระยะห่างของแต่ละอุปกรณ์อยู่ห่างกันมากกว่า แต่ถ้าพิจารณาในแง่ของราคาพื้นที่ที่ใช้ในการก่อสร้าง หากว่าสถานีไฟฟ้าย่อยอยู่ในบริเวณใจกลางเมืองซึ่งที่ดินมีราคาแพง การจัดวางแบบ MEA จะเหมาะสมกว่า เนื่องจากใช้พื้นที่น้อยกว่า ซึ่งการจัดวางนี้หากพื้นที่เราจำกัดจริงๆ ก็สามารถบีบระยะห่างที่ปลอดภัยทางไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ ลงมาได้อีกจนถึงระยะ 106.68 cm. ซึ่งเป็นระยะห่างที่ปลอดภัยทางไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ที่ต่ำที่สุด (Minimum) ตามมาตรฐาน IEC |

10.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการศึกษาของระบบป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อย

ตาราง 10.15 ตารางแสดงการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการศึกษาของระบบป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อย

| company   | SIEMENS  | MEA   |
|---|--|---|
| step of lightning design                              | $Z_s = 60 * (\ln(2h_0/R_c) * \ln(2h_0/r_c))^{1/2}$ $Z_s = 60 * (\ln(2 * 6.4 / 0.0714)) * (\ln(2 * 6.4 / 0.0636))^{1/2}$ $Z_s = 314.64 \text{ โอห์ม}$   | $Z_s = 60 \ln(2h_0/r)$ $Z_s = 60 \ln(2 * 5.35 / 0.0636)$ $Z_s = 307.52 \text{ โอห์ม}$   |
| 1. หาค่า S Surge Impedance (Z <sub>s</sub> ) ของตัวนำ | <p>หมายเหตุ</p> <p>ในสถานีไฟฟ้าย่อยระดับแรงดัน 115/24 kv บริษัทซีเมนส์จำกัด จะใช้สายตัวนำ ขนาด 400 Square mm. ซึ่งมีรัศมีภายนอกของตัวนำ และ รัศมีภายในของตัวนำ เป็น 0.0714 และ 0.0636 เมตร (Bundle Conductor)ตามลำดับ สูง 6.4 เมตร</p> | <p>ในสถานีไฟฟ้าย่อยระดับแรงดัน 115/24 kv การไฟฟ้านครหลวง จะใช้สายตัวนำ ขนาด 400 Square mm. ซึ่งมีรัศมีของตัวนำ 0.0636 เมตร (Single Conductor) สูง 5.35 เมตร</p> |
| 2. หาค่ากระแสฟ้าผ่า (I <sub>s</sub> )                 | $I_s = (2BIL) / Z_s$ $I_s = (2 * 550) / 314.64$ $I_s = 3.49 \text{ กิโลแอมป์}$   | $I_s = (2BIL) / Z_s$ $I_s = (2 * 550) / 307.52$ $I_s = 3.57 \text{ กิโลแอมป์}$  |

ตาราง 10.15 ตารางแสดงการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระบบป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อย

| company  | SIEMENS   | MEA   |
|--|---|---|
| step of lightning design<br><br>3. หาค่าระยะฟ้าผ่า (S)<br><br>4. หาค่ารัศมีของพื้นที่ที่ถูปกป้องกัน (r)<br><br>4.1 คัดที่เสา take off structure<br><br>4.2 เพื่อเป็นการเพิ่มรัศมีการป้องกันให้ครอบคลุมทั้งสถานีไฟฟ้าย่อยจะติดตั้งนำล่อฟ้าที่เสาอีก | $S = 8.5 * k * (I_s)^{0.65}$ $S = 8.5 * 1.2 * (3.49)^{0.65} = 22.98 \text{ เมตร}$ $S = 22.98 \text{ เมตร ซึ่งก็คือรัศมีของทรงกลมกำลัง}$ $r = (S^2 - (S - h_m)^2)^{1/2} - (S - h_e)^{2,1/2}$ $r = (22.98^2 - (22.98 - 16.2)^2)^{1/2} - (22.98^2 - (22.98 - 6.4)^2)^{1/2}$ $r = 7.35 \text{ เมตร}$ $r = (22.98^2 - (22.98 - 13)^2)^{1/2} - (22.98^2 - (22.98 - 6.4)^2)^{1/2}$ $r = 6.05 \text{ เมตร}$ | $S = 8.5 * k * (I_s)^{0.65}$ $S = 8.5 * 1.2 * (3.57)^{0.65} = 23.35 \text{ เมตร}$ $S = 23.35 \text{ เมตร ซึ่งก็คือรัศมีของทรงกลมกำลัง}$ $r = (S^2 - (S - h_m)^2)^{1/2} - (S - h_e)^{2,1/2}$ $r = (23.35^2 - (23.35 - 15.8)^2)^{1/2} - (23.35^2 - (23.35 - 5.35)^2)^{1/2}$ $r = 5.91 \text{ เมตร}$ $r = (23.35^2 - (23.35 - 12.6)^2)^{1/2} - (23.35^2 - (23.35 - 5.35)^2)^{1/2}$ $r = 4.59 \text{ เมตร}$ $r = (23.35^2 - (23.35 - 11.8)^2)^{1/2} - (23.35^2 - (23.35 - 5.35)^2)^{1/2}$ $r = 3.94 \text{ เมตร}$ |

ตาราง 10.16 ตารางการแนะนำการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อย

| ขั้นตอนการคำนวณ   | ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า   |
|---|--|
| 1. หาค่า S Surge Impedance ( $Z_s$ ) ของตัวนำ   | อ้างอิงการออกแบบตามมาตรฐาน IEEE std. 998-1996 โดยเลือกการป้องกันระดับที่ 2 จะสามารถเลือกตัวนำล่อฟ้าชนิดทองแดง พื้นที่หน้าตัด 360 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ 317.14 โอห์ม |
| 2. หาค่ากระแสฟ้าผ่า ( $I_s$ )   | $I_s = (2BIL) / Z_s$ $I_s = (2*550) / 317.14 \text{ โอห์ม}$ $I_s = 3.46 \text{ กิโลแอมป์}$   |
| 3. หาค่าระยะฟ้าผ่า (S)  | $S = 8.5 * k * (I_s)^{0.65}$ $S = 8.5 * 1.2 * (3.46)^{0.65}$ $S = 22.85 \text{ เมตร}$  |
| 4. หาค่ารัศมีของพื้นที่ที่ถูกป้องกัน (r)  | $r = S^2 - (S - h_m)^2)^{1/2} - (S^2 - (S - h_e)^2)^{1/2}$   |
| 4.1 คิดที่เสา take off structure  | $r = (22.85^2 - (22.85 - 16.8)^2)^{1/2} - (22.85^2 - (22.85 - 6.4)^2)^{1/2}$ $r = 6.18 \text{ เมตร}$   |
| 4.2 เพื่อเป็นการเพิ่มรัศมีการป้องกันให้ครอบคลุมทั้งสถานีไฟฟ้าย่อยจะติดตั้งนำล่อฟ้าที่เสาอีก | $r = (22.85^2 - (22.85 - 13.6)^2)^{1/2} - (22.85^2 - (22.85 - 6.4)^2)^{1/2}$ $r = 5.04 \text{ เมตร}$   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 10.17 ตารางแสดงสรุปการเปรียบเทียบการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าทั้ง 3 วิธี

| Company<br>Parameters                    | SIEMENS          | MEA            | Recommend      |
|--|------------------|----------------|----------------|
| 1. หาค่า Surge Impedance ( $Z_s$ )       | 314.64 โอห์ม     | 307.52 โอห์ม   | 317.14 โอห์ม   |
| 2. หาค่ากระแสฟ้าผ่า ( $I_s$ )            | 3.49 กิโลแอมแปร์ | 3.57 กิโลแอมป์ | 3.46 กิโลแอมป์ |
| 3. หาค่าระยะฟ้าผ่า (S)                   | 22.98 เมตร       | 23.35 เมตร     | 22.85 เมตร     |
| 4. หาค่ารัศมีของพื้นที่ที่ถูกป้องกัน (r) |                  |                |                |
| ดันทันที่ 1                              | 7.35 เมตร        | 5.91 เมตร      | 6.18 เมตร      |
| ดันทันที่ 2                              | 6.05 เมตร        | 4.59 เมตร      | 5.04 เมตร      |
| ดันทันที่ 3                              | -                | 3.94 เมตร      | -              |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 10.18 ตารางแสดงการสรุปผลการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อยทั้ง 3 วิธี

| สรุปผลการออกแบบ   |   |   |
|---|---|---|
| SIEMENS   | MEA   | Reference   |
| <p>ในการออกแบบของบริษัท ซิเมนส์ จำกัด จะใช้ตัวนำล่อฟ้าชนิดทองแดง พื้นที่หน้าตัด 400 ตารางมิลลิเมตร ติดไว้ที่สองต้นโดยต้นแรกติดที่ take off structure มีความสูงติดตั้ง Air Terminal 16.2 เมตร ซึ่งจะมียาระยะปลอดภัยมีระยะห่างจากเสาล่อฟ้าที่ระยะรัศมีการป้องกัน 7.35 เมตร ส่วนต้นที่สองติดที่ความสูงติดตั้ง 13 เมตร ซึ่งจะมียาระยะปลอดภัยมีระยะห่างจากเสาล่อฟ้าที่ระยะรัศมีการป้องกัน 6.05 เมตร โดยสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งนี้มีการติดตั้ง Over Head Ground Wire รวมอยู่ด้วย</p> | <p>ในการออกแบบของการไฟฟ้านครหลวง จะใช้ตัวนำล่อฟ้าชนิดทองแดง พื้นที่หน้าตัด 400 ตารางมิลลิเมตร ติดไว้ที่สามต้นโดยต้นแรกติดที่ take off structure มีความสูงติดตั้ง Air Terminal 15.8 เมตร ซึ่งจะมียาระยะปลอดภัยมีระยะห่างจากเสาล่อฟ้าที่ระยะรัศมีการป้องกัน 5.91 เมตร ส่วนต้นที่สองติดที่ความสูงติดตั้ง 12.6 เมตร ซึ่งจะมียาระยะปลอดภัยมีระยะห่างจากเสาล่อฟ้าที่ระยะรัศมีการป้องกัน 4.59 เมตร ต้นที่ 3 ติดตั้งที่ความสูง 11.8 เมตร มีรัศมีการป้องกัน 3.94 เมตร โดยสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งนี้มีการติดตั้ง Over Head Ground Wire รวมอยู่ด้วย</p> | <p>ในการแนะนำออกแบบ จะใช้ตัวนำล่อฟ้าชนิดทองแดง พื้นที่หน้าตัด 360 ตารางมิลลิเมตร ติดไว้ที่สองต้นโดยต้นแรกติดที่ take off structure มีความสูงติดตั้ง Air Terminal 16.8 เมตร ซึ่งจะมียาระยะปลอดภัยมีระยะห่างจากเสาล่อฟ้าที่ระยะรัศมีการป้องกัน 6.18 เมตร ส่วนต้นที่สองติดที่ความสูงติดตั้ง 13.6 เมตร ซึ่งจะมียาระยะปลอดภัยมีระยะห่างจากเสาล่อฟ้าที่ระยะรัศมีการป้องกัน 5.04 เมตร โดยสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งนี้มีการติดตั้ง Over Head Ground Wire รวมอยู่ด้วย</p> |

## บทที่ 11

### สรุปการแนะนำการออกแบบ

จากบทก่อนหน้า เมื่อเราทราบถึงการออกแบบระบบต่างๆ เช่น ระบบต่อลงดิน ระบบล่อฟ้า และการเลือกใช้อุปกรณ์แล้วโดยในการออกแบบนั้นอาจไม่ใช้การออกแบบที่ดีที่สุด ด้วยเหตุผลเนื่องจากปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์ ในบทนี้จึงเป็นการแนะนำในการออกแบบระบบต่อลงดิน ระบบล่อฟ้าและการเลือกใช้อุปกรณ์เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพและความปลอดภัยสูงสุด ดังนี้

#### 11.1 แนะนำการการออกแบบระบบการต่อลงดิน

ตาราง 11.1 แนะนำการการออกแบบระบบการต่อลงดินให้มีความปลอดภัยและราคาถูกเหมาะสม

|   |  |
|---|--|
| 1.การพิจารณาจะอ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE 80   |  |
| 2.พิจารณาพารามิเตอร์  |  |
| - พารามิเตอร์ต้น คือพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญจากมากที่สุดไปหาน้อยที่สุด ที่ใช้ในการออกแบบ นั่นคือ D(ระยะห่างของตัวนำที่ขนานกัน),h(ความลึกของกริด) |  |
| -พารามิเตอร์ตาม คือ พารามิเตอร์ที่กำหนดให้มีค่าหนึ่งหรือคงที่ นั่นคือ ความยาวรวมของแท่งกราวนด์หรือด   |  |
| 3.คำนวณความปลอดภัยจาก มาตรฐาน IEEE 80 โดยค่าตัวแปรที่ไม่แปรผันซึ่งกันและกัน มาเปรียบเทียบกันคือ D และ h   |  |
| 4. เมื่อได้ค่าจากการคำนวณจึงใช้หลักในการพิจารณาเลือกการออกแบบที่เหมาะสม   |  |
| -ขั้นที่ 1  | $E_m < E_{touch50}$ และ $E_s < E_{step50}$   |
| -ขั้นที่ 2  | $L_m, L_s$ ที่มีค่าน้อยที่สุด จะส่งผลต่อจำนวนตัวนำทั้ง Ground Grid และ Ground Rod ที่ใช้มีจำนวนที่ลดลง และมียังคงมีความปลอดภัย |
| -ขั้นที่ 3  | เลือกความลึกที่น้อยที่สุดเพื่อไม่ต้องมีการลงทุนเรื่องการขุดมากขึ้นหรือการปรับยกพื้นที่   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 11.2 แนะนำการเปรียบเทียบการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115 kV ของแต่ละที่

| เปรียบเทียบการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/24 kV ในแต่ละที่ |           |           |                      |
|---|-----------|-----------|----------------------|
| การออกแบบของแต่ละที่  | SIEMENS   | MEA       | การออกแบบของนักศึกษา |
| มาตรฐาน   | IEEE 80   | IEEE 80   | IEEE 80              |
| D (ระยะของกริดตัวนำที่ขนานกัน)  | 2.5       | 3 m       | 3.5 m                |
| h (ความลึกของระบบกริด)  | 0.5       | 0.5 m     | 0.5 m                |
| Lc (ความยาวรวมของตัวนำ)   | 270       | 220       | 211 m                |
| Lr (ความยาวรวมของกราวนด์ร็อด)   | 540       | 430       | 422 m                |
| Em  | 285.1133  | 412.6601  | 463.4943             |
| Es  | 1,333.632 | 1,433.614 | 1,401.03             |
| ความปลอดภัย   | ปลอดภัย   | ปลอดภัย   | ปลอดภัย              |
| ราคาวัสดุ   | มากที่สุด | มาก       | น้อย                 |

จากตารางข้างต้นในการออกแบบของนักศึกษาที่ได้นำเสนอในบทที่ผ่านมาซึ่งมีความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์เนื่องจากมีความปลอดภัยแต่มีราคาของวัสดุน้อยที่สุด ซึ่งราคานั้นก็คือความยาวของตัวนำนั่นเอง

## 11.2 แนะนำการเลือกอุปกรณ์สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/24kV

### ตาราง 21.3 แนะนำการเลือกอุปกรณ์สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/24kV

| Equipment         | Selection  |
|-------------------|--|
| Power Transformer | <ul style="list-style-type: none"> <li>- หม้อแปลงที่เลือกใช้จะต้องผลิตตามมาตรฐาน IEC 726, DIN VDE 0532 Part1, DIN 42500, DIN 42533 และ DIN 42524</li> <li>- เลือกขนาดให้เหมาะสมกับโหลดของระบบ</li> <li>- รูปแบบการพันขดลวดพิจารณาจากขนาดของหม้อแปลงในที่นี้หม้อแปลงมีขนาด 20/25MVA จึงเลือกการพันขดลวดแบบ Dyn ซึ่งรูปแบบการพันแบบนี้เหมาะสำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดตั้งแต่ 315kVA ขึ้นไป</li> <li>- เลือกใช้ Percent Impedance เท่ากับ 9.5% ตามมาตรฐาน NEMA Std.</li> </ul> |
| Wire (115kV)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- สายที่ใช้ต้องผลิตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ TIS 85-2548</li> <li>- เลือกขนาดของสาย โดยพิจารณาให้ขนาดกระแสพิกัดมากกว่าค่า Maximum continuous Current Rating in free air จากตารางสายของผู้ผลิต โดยในการ</li> </ul>  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                       |  |
|-----------------------|--|
|                       | <p>เลือกสายต้องเผื่อขนาดไว้ 25% ของกระแสฟักัดที่จะใช้งานด้าน incoming ซึ่งทำเพื่อเป็นการเผื่อโหลดที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคตโดยที่ไม่ต้องทำการเปลี่ยนสายใหม่ให้สิ้นเปลือง</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- เลือกสายชนิด AAC เนื่องจากสายชนิดนี้สามารถตัดโค้งตามลักษณะสูงต่ำของอุปกรณ์ที่ต้องการเชื่อมต่อเพราะมีลักษณะสายอ่อนตามคุณสมบัติของอลูมิเนียม ส่วนสาย ACSR นั้นจะนิยมใช้กรณีที่เป็นการชิงสายฟ้าที่มีระยะทางยาว เสียมากกว่า</li> <li>- เนื่องจากขนาดกระแสภายในสถานีไฟฟ้าย่อยมีกระแสสูงถึงระดับ 1,000-1,700 A ในการเลือกใช้ขนาดสาย หากเลือกขนาดที่สามารถทนกระแสดังกล่าวได้ ขนาดของสายจะมีขนาดใหญ่มาก ซึ่งก่อให้เกิดความลำบากมากในการทำการติดตั้งเนื่องมาจากขนาดที่ใหญ่มาก ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาจึงควรเลือกใช้สายที่ขนาดเล็กลง โดยใช้สายที่มีขนาดเล็กเท่าๆกันสองเส้นและเป็นสายที่สามารถรับขนาดกระแสดังกล่าวได้จะดีกว่า</li> </ul>   |
| Wire (24kV)           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- สายที่ใช้ต้องผลิตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ TIS 85-2548</li> <li>- เลือกขนาดของสาย โดยพิจารณาให้ขนาดกระแสฟักัดมากกว่าค่า Maximum Continuous Current Rating in free air จากตารางสายของผู้ผลิต</li> <li>- ในการออกแบบไม่ต้องทำการเผื่อขนาดสายเพื่อรองรับโหลดในอนาคต เนื่องจากหากมีโหลดเพิ่มขึ้นจะทำการเพิ่ม Bay ที่ตู้ Switchgear โดยใช้สายขนาดเท่าเดิม</li> <li>- เลือกสายชนิด XLPE Cable เนื่องจากตู้ Switchgear ที่อยู่ภายในห้องควบคุมถูกออกแบบให้เป็นระบบ Bottom Entry คือทั้งสายไฟและสายควบคุมต้องเข้าและออกจากด้านใต้ของตู้เท่านั้น ดังนั้นสายไฟที่ออกจากด้านแรงดันต่ำ (24kV) ของหม้อแปลงกำลังไปยัง Switchgear จะต้องมาผ่านทางใต้ดินจึงต้องเลือกใช้สายชนิดเคเบิลใต้ดิน</li> <li>- เลือกใช้ฉนวนแข็งชนิด XLPE เพราะสามารถใช้งานในภาวะปกติได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 90°C และที่ภาวะลัดวงจรฟักัดอุณหภูมิอยู่ที่ 250°C เนื่องจากกระแสฟอลต์มีขนาด 5 - 8kA ซึ่งมีขนาดสูงทำให้เกิดความร้อนสูงภายในสาย เหตุผลที่ไม่เลือกใช้ PE เพราะมีข้อเสียในด้านการต้านทานต่อการเกิดร่องรอยบนผิวเนื่องจากไฟฟ้า (Electrical tracking Resistance) ซึ่งอาจทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายได้</li> </ul> |
| Power Circuit Breaker | <ul style="list-style-type: none"> <li>- เลือกตามมาตรฐาน IEC56 หรือ ANCI C37.06</li> <li>- เลือกใช้เมื่อแรงดันเกิน 1000V ขึ้นไป</li> <li>- เลือกใช้แบบ SF<sub>6</sub> Circuit Breaker เนื่องจากมีค่าความคงทนของไดอิเล็กตริกสูง อาร์คจึงมีการดับอย่างรวดเร็ว อีกทั้งมีสภาพการนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดีจึงมี</li> </ul>  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                               |   |
|-------------------------------|---|
|                               | <p>แรงดันตกคร่อมที่อาร์คต่ำและความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้กลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนได้อย่างรวดเร็ว และแม้จะเกิดกระแสลัดวงจรสูงๆ ก็ไม่สามารถเปลี่ยนสภาพก๊าซSF<sub>6</sub>ได้ จึงทำให้ก๊าซSF<sub>6</sub>สามารถใช้ได้นาน และดีกว่าแบบ Oil Circuit Breaker ตรงที่ก๊าซSF<sub>6</sub>ไม่ติดไฟจึงมีความปลอดภัย และยังอาร์คมีความรุนแรงขึ้นมากเพียงใดก็ยังไม่ส่งผลให้ความเป็นฉนวนของน้ำมันลดลงมากเท่าที่นั่นซึ่งการใช้ก๊าซ SF<sub>6</sub>จะไม่เกิดปัญหาในส่วนนี้ ส่วน Air blast Circuit Breaker นั้นเหมาะสำหรับการใช้งานที่แรงดันที่สูงกว่าระบบนี้ คืออยู่ในช่วง 121-362kV</p> <p>- การเลือกใช้งานในทางปฏิบัติ หากคุณสมบัติของอุปกรณ์เป็นไปตามเงื่อนไขการใช้งานแล้ว การพิจารณาเลือกใช้จะมองในแง่ของราคาและการรับประกันอุปกรณ์ของแต่ละบริษัท</p> |
| <p>Disconnecting Switch</p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- เลือกตามมาตรฐาน IEC 129 และ 273 หรือ มาตรฐาน ANSI C37.30 ถึง C37.35</li> <li>- เลือกใช้ Disconnecting Switch ที่ถูกออกแบบตามมาตรฐาน IEC 62271-102, IEC 60694</li> <li>- เลือกใช้แบบ Center-Break Disconnecter เนื่องจากใช้พื้นที่น้อยกว่า ระยะ Clearance น้อยกว่าเมื่อทำการ Interrupt ทำให้มีความปลอดภัยในการทำงานสูงกว่า ซึ่งแบบ Center-Break Disconnecter สามารถใช้สำหรับพิกัดแรงดันตั้งแต่ 72.5 - 550kV</li> </ul>  |
| <p>Instrument Transformer</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- เลือกตามมาตรฐาน ANSI/IEEE Std. C57.13-1978</li> <li>- เลือกใช้ตาม Class ในแต่ละมาตรฐาน ให้เหมาะสมกับลักษณะงานของอุปกรณ์ที่นำมาเชื่อมต่อทางด้านทุติยภูมิ</li> <li>- การเลือกใช้ Burden แบบใดนั้นต้องคำนึงถึง Power Requirement ของอุปกรณ์ที่นำมาเชื่อมต่อทางด้านทุติยภูมิ โดยที่ Rate output (VA) ของ Burden ที่เลือกใช้นั้นต้องสามารถรองรับ Power requirement เหล่านั้นได้ โดยการคำนวณค่า Overcurrent Factor ซึ่งต้องมีค่ามากกว่า Power Requirement</li> </ul>   |
| <p>Surge Arrester</p>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- เลือกตามมาตรฐาน ANSI C62.11 และมาตรฐาน IEC 99</li> <li>- เลือกใช้แบบไม่มีแกป (Gapless) ซึ่งดีกว่าแบบมีแกปตรงที่เมื่อเกิดฟ้าผ่าและมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Spark Gap จะทำให้อากาศหรือก๊าซเกิดการ Ionization แม้ว่ามีรีเลย์ป้องกันจะ Trip วงจรไฟฟ้าไปแล้ว การเกิด Ionization ก็ยังทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลอยู่ต่อไปได้ (Holding Current) แต่สำหรับ Surge Arrester ชนิด Gapless ปัญหาเช่นนี้จะไม่เกิดขึ้น เนื่องจาก Zinc Oxide Block จะไม่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้อีกต่อไปหากการเกิด Overvoltage จบลงไปแล้ว</li> <li>- การติดตั้งควรติดตั้งในด้านสาย incoming ก่อนเข้า CT และ PT, ด้านหน้าของ</li> </ul>   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลงกำลัง, ด้านหลังหม้อแปลงกำลัง, ด้านหลังก่อนเข้า CTและPT และก่อนเข้าหม้อแปลงจำหน่ายในแต่ละ feeder ซึ่งการติดตั้งแบบนี้อาจยืดหยุ่นได้ตามความสำคัญของระบบและงบประมาณที่มีอยู่ โดยอย่างน้อยที่สุดก็ควรติดตั้งไว้ด้านหน้าของหม้อแปลงกำลัง



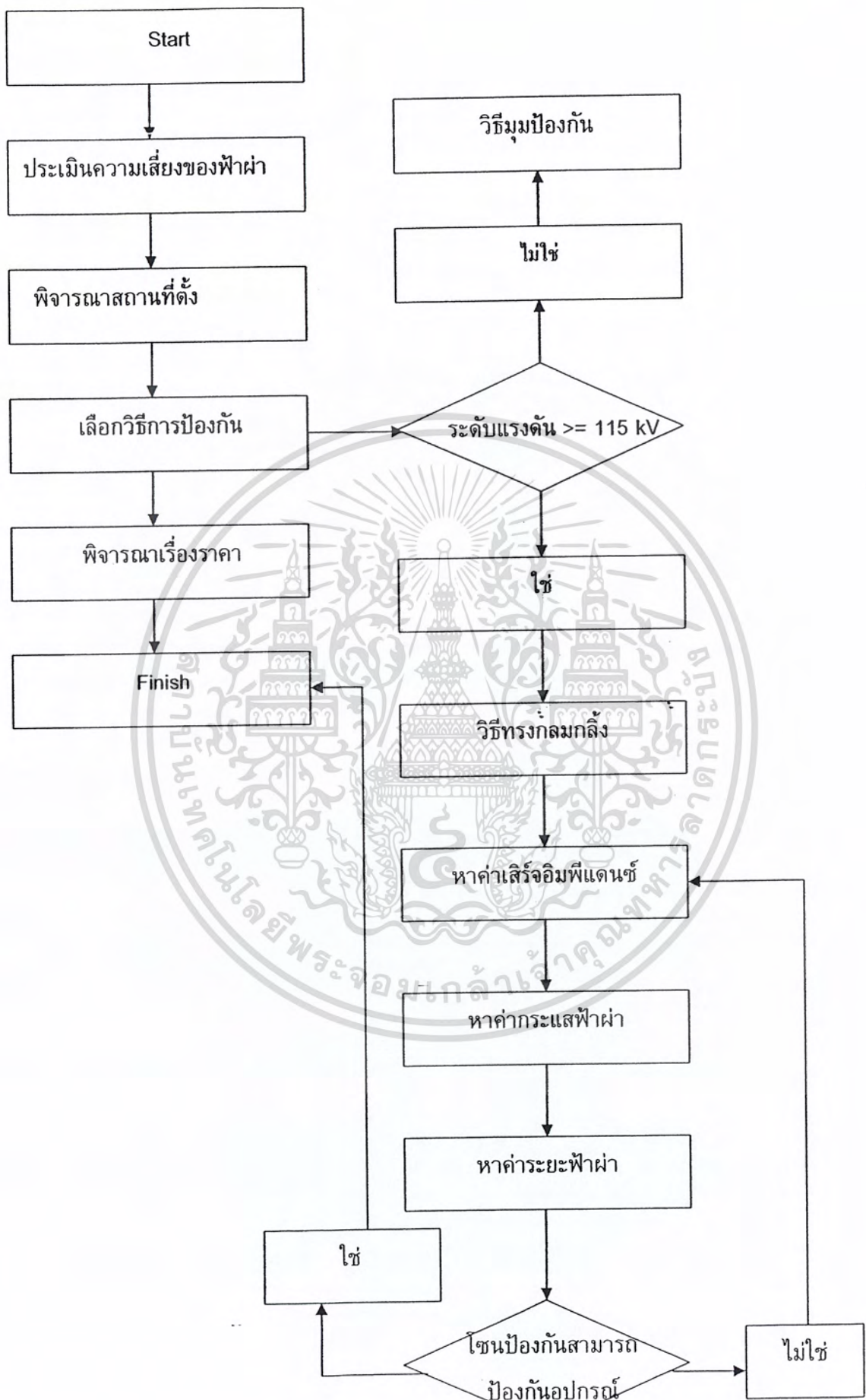
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 11.3 แนะนำการจัดวางระยะห่างทางไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/24kV

#### ตาราง 11.4 แนะนำการจัดวางระยะห่างทางไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าย่อย

| Thailand<br>System<br>Voltage | IEC. Standard Min. Clearance |              |              | NEMA. Standard Min. Clearance |                 |                 |
|-------------------------------|------------------------------|--------------|--------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
|                               | Max.<br>Voltage<br>KV.       | Ø - Ø<br>cm. | Ø - G<br>cm. | Operating<br>Voltage          | Ø - Ø<br>cm.    | Ø - G<br>cm.    |
| 22 KV.                        | 24                           | 22           | 22           | 23                            | 38.10 – 60.96   | 24.40 – 30.10   |
| 115 KV.                       | 123                          | 110          | 110          | 115                           | 134.62 – 167.64 | 106.68 – 121.92 |
| 230 KV.                       | 245                          | 210          | 210          | 230                           | 226.06 – 259.08 | 180.34 – 198.12 |

จากตารางเปรียบเทียบจะเห็นว่า NEMA. Standard จะมีการกำหนดระยะห่างการจัดวางที่มีระยะที่ยาวกว่า IEC. Standard จะเห็นว่ามาตรฐานตามรูปแบบประเทศสหรัฐฯ จะกำหนดให้มีความปลอดภัยสูงเกินกว่ามาตรฐานยุโรป ทั้งนี้ได้แสดงว่ามาตรฐานจะสูงกว่ากันในการออกแบบจริงให้พิจารณาถึงความจำเป็นของพื้นที่เป็นหลัก ถ้ามีพื้นที่เพียงพอ ก็ใช้ NEMA.Std. จะทำให้ดูมีระยะไม่แน่นมากมีความปลอดภัยสูงกว่า แต่ถ้าพื้นที่จำกัดมากก็ใช้ IEC.Std. เพราะสามารถลดพื้นที่ได้บ้างแต่หากน้อยกว่านี้ควรเลือกพิจารณาปรับเปลี่ยนระยะสูงต่ำของโครงเหล็กได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 รูปที่ 11.1 แสดงลำดับการพิจารณาการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าในสถานไฟฟ้าย่อย

## 11.4 แนะนำการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าในสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/24kV

ตาราง 11.5 แนะนำการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า

| ขั้นตอนการคำนวณ   | ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า  |
|---|---|
| 1. หาค่า S Surge Impedance ( $Z_s$ ) ของตัวนำ   | อ้างอิงการออกแบบตามมาตรฐาน IEEE std. 998-1996 โดยเลือกการป้องกันระดับที่ 2 ซึ่งสามารถเลือกตัวนำล่อฟ้าชนิดทองแดงมีพื้นที่หน้าตัด 360 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ 317.14 โอห์ม |
| 2. หาค่ากระแสฟ้าผ่า ( $I_s$ )   | $I_s = 3.46$ กิโลแอมป์  |
| 3. หาค่าระยะฟ้าผ่า (S)  | $S = 22.85$ เมตร  |
| 4. หาค่ารัศมีของพื้นที่ที่ถูกป้องกัน (r)  |   |
| 4.1 คัดที่เสา take off structure  | $r = 6.18$ เมตร   |
| 4.2 เพื่อเป็นการเพิ่มรัศมีการป้องกันให้ครอบคลุมทั้งสถานีไฟฟ้าย่อยจะติดตั้งนำล่อฟ้าที่เสาอีก | $r = 5.04$ เมตร   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บรรณานุกรม

- [1] ธิติ เอี่ยมมงคล, "การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
- [2] บัณฑิต พิทักษ์วงศ์, "โปรแกรมช่วยการออกแบบสำหรับระบบการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อย", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541
- [3] ANSI/IEEE Standard 80-1986, **Guide for Safety in AC Substation Grounding.**
- [4] ตำราประกอบการอบรมหลักสูตร Substation Equipment and Protective Reaction, บมจ.กฟผ.
- [5] Design Guide for Rural Substations, United States Department of Agriculture Rural Utilities Service, 2001
- [6] S.James, **Lightning Protection, Analysis and Design, 1984.**
- [7] **EHV substation and equipment**, N.P. Bhoumick, Bhaskar Bhattacharyya : Bhoumick, N.P., 1989.
- [8] IEEE standards Board. 998-1996., **Guide to Lightning Protection of Highvoltage Substation., 1996**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

ตาราง 1 Maximum Allowable Average Temperature of Cooling Air for Carrying Rated kVA.

| Method of Cooling Apparatus                                 | 1000 Meters<br>(3300 Feet) | 2000 Meters<br>(6600 Feet) | 3000 Meters<br>(9900 Feet) | 4000 Meters<br>(13 200 Feet) |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
|   | Degrees Celsius            |                            |                            |                              |
| Liquid-Immersed Self-Cooled                                 | 30                         | 28                         | 25                         | 23                           |
| Liquid-Immersed Forced-Air-Cooled                           | 30                         | 26                         | 23                         | 20                           |
| Liquid-Immersed Forced-Oil-Cooled<br>with Oil-to-Air Cooler | 30                         | 26                         | 23                         | 20                           |

- \* It is recommended that the average temperature of the cooling air be calculated by averaging 24 consecutive hourly readings. When the outdoor air is the cooling medium, the average of the maximum and minimum daily temperatures may be used. The value obtained in this manner is usually slightly higher, by not more than 0.3°C, than the true daily average.

ตาราง 2 Rated kVA Correction Factors for Altitudes greater than 3300 ft (1000 m).

| Types of Cooling  | Derating Factor<br>(%) |
|---|------------------------|
| Liquid-immersed air-cooled  | 0.4                    |
| Liquid-immersed water-cooled  | 0.0                    |
| Liquid-immersed forced-air-cooled                                   | 0.5                    |
| Liquid-immersed forced-liquid-cooled<br>with liquid-to-air cooler   | 0.5                    |
| Liquid-immersed forced-liquid-cooled<br>with liquid-to-water cooler | 0.0                    |

ตาราง 3 Range of Voltage and Kilovolt-Ampere Ratings for Single-Phase Transformers, 833-8333 kVA. Ref. ANSI/IEEE Std. C57.12.10-1988

| High-Voltage<br>Ratings<br>(V) | Low-Voltage Ratings (V) |            |              |           |               |
|--------------------------------|-------------------------|------------|--------------|-----------|---------------|
|                                | 480                     | 5040/8720Y | 7970/13 800Y | 14 400    | 20 920/36 230 |
| 2400/4160Y                     | 833                     | -          | -            | -         | -             |
| 4800/8320Y                     | 833                     | -          | -            | -         | -             |
| 6900/11 950Y,                  | 833, 1250               | 833-2500   | -            | -         | -             |
| 6930/12 000Y,                  | -                       | -          | -            | -         | -             |
| 7200/12 470Y,                  | -                       | -          | -            | -         | -             |
| 7620/13 200Y,                  | -                       | -          | -            | -         | -             |
| 7970/13 800Y,                  | -                       | -          | -            | -         | -             |
| 12 000, 13 200,                | -                       | -          | -            | -         | -             |
| 13 800                         | -                       | -          | -            | -         | -             |
| 23 000                         | 833, 1250               | 833-2500   | 833-2500     | -         | -             |
| 34 500                         | 833, 1250               | 833-2500   | 833-3333     | 833-3333  | -             |
| 46 000                         | 833, 1250               | 833-2500   | 833-8333     | 833-3333  | -             |
| 69 000                         | -                       | 833-2500   | 833-8333     | 833-3333  | -             |
| 115 000                        | -                       | 2500       | 2500-8333    | 2500-8333 | 2500-8333     |
| 138 000                        | -                       | 2500       | 2500-8333    | 2500-8333 | 2500-8333     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4 Range of Voltage and Kilovolt-Ampere Ratings for Three-Phase Transformers Without Load Tap Changing, 750-10,000kVA. Ref ANSI/IEEE Std. C57.12.10-1988

| High-Voltage Ratings (V) | Low-Voltage Ratings (V)                        |                           |                           |   |  |  |
|--------------------------|--|---------------------------|---------------------------|---|--|--|
|                          | 2400,2520<br>480Y/277<br>480                   | 4160Y/2400,<br>4360Y/2520 | 4800,5040,<br>8320Y/4800, | 6900,7200,7560,<br>12 407Y/7200,<br>13 090Y/7560,<br>13 200Y/7620 | 13 800,<br>12 000,<br>12 600,<br>13 200,<br>14 400 | 24 940Grd/14 000<br>34 500,<br>34 500GrdY/19 920,<br>36 230GrdY/20 920 |
|                          | Self-Cooled (OA) Kilovolt-Ampere Ratings (kVA) |                           |                           |   |  |  |
| 2400                     | 750-1500                                       | -                         | -                         | -   | -  | -  |
| 4160,4800                | 750-1500                                       | -                         | -                         | -   | -  | -  |
| 6900,7200                | 750-2500                                       | 1000-3750                 | -                         | -   | -  | -  |
| 12 000                   | 750-2500                                       | 1000-7500                 | -                         | -   | -  | -  |
| 12 470                   | -  | -                         | -                         | -   | -  | -  |
| 13 200                   | -  | -                         | -                         | -   | -  | -  |
| 13 800                   | -  | -                         | -                         | -   | -  | -  |
| 23 000                   | -  | 1000-7500                 | 1000-10 000               | 1000-10 000   | -  | -  |
| 34 500                   | -  | 1000-7500                 | 1000-10 000               | 1000-10 000   | 1000-10 000  | -  |
| 46 000                   | -  | 1500-7500                 | 1500-10 000               | 1500-10 000   | 1500-10 000  | -  |
| 69 000                   | -  | 1500-7500                 | 1500-10 000               | 1500-10 000   | 1500-10 000  | -  |
| 115 000                  | -  | 5000-7500                 | 5000-10 000               | 5000-10 000   | 5000-10 000  | 5000-10 000  |
| 138 000                  | -  | 5000-7500                 | 5000-10 000               | 5000-10 000   | 5000-10 000  | 5000-10 000  |

ตาราง 5 Range of Voltage and Kilovolt-Ampere Ratings for Three-Phase Transformers with Load Tap Changing, 3750-10 000 kVA. Ref. ANSI/IEEE Std. C57.12.10-1988

| High-Voltage Ratings (V) | Low-Voltage Ratings (V)                        |   |  |  |                    |  |
|--------------------------|--|---|--|--|--------------------|--|
|                          | 2400,2520,<br>4160Y/2400,<br>4360Y/2520        | 4800,5040,<br>8320Y/4800,<br>8720Y/5040 | 6900,7200,7560,<br>12 470Y/7200,<br>13 090Y/7560,<br>13 200Y/7620,<br>13 800Y/7970 | 13 800<br>12 000,12 600<br>13 200,14 400 | 24940Grd/<br>14000 | 24 940Grd/14 000<br>34 500,<br>34 500GrdY/19 920,<br>36 230GrdY/20 920 |
|                          | Self-Cooled (OA) Kilovolt-Ampere Ratings (kVA) |   |  |  |                    |  |
| 6900,7200                | 3750   | -                                       | -  | -  | -                  | -  |
| 12 000                   | 3750-7500                                      | -                                       | -  | -  | -                  | -  |
| 12 470                   | -  | -                                       | -  | -  | -                  | -  |
| 13 200                   | -  | -                                       | -  | -  | -                  | -  |
| 13 800                   | -  | -                                       | -  | -  | -                  | -  |
| 23 000                   | 3750-7500                                      | 3750-10 000                             | 3750-10 000  | -  | -                  | -  |
| 34 500                   | 3750-7500                                      | 3750-10 000                             | 3750-10 000  | 3750-10 000                              | -                  | -  |
| 46 000                   | 3750-7500                                      | 3750-10 000                             | 3750-10 000  | 3750-10 000                              | -                  | -  |
| 69 000                   | 3750-7500                                      | 3750-10 000                             | 3750-10 000  | 3750-10 000                              | -                  | -  |
| 115 000                  | 5000-7500                                      | 5000-10 000                             | 5000-10 000  | 5000-10 000                              | 5000-10 000        | 5000-10 000  |
| 138 000                  | 5000-7500                                      | 5000-10 000                             | 5000-10 000  | 5000-10 000                              | 5000-10 000        | 5000-10 000  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 6 Range of Voltage and Kilovolt-Ampere Ratings for Three-Phase Transformers With or Without Load Tap Changing, 12 000-60 000 kVA. Ref. ANSI/IEEE Std.

C57.12.10-1988

| High Voltage Ratings (V)                       | Low-Voltage Ratings (V)         |  |                                    |                   |  |
|--|---------------------------------|--|------------------------------------|-------------------|--|
|  | 4800,5040,8320Y/4800,8720Y/5040 | 6900,7200,7560,12 407Y/7200,13 090Y/7560,13 200Y/7620,13 800Y/7970 | 12 000,12 600,13 200,13 800,14 400 | 24 940GrdY/14 400 | 34 500,34 500GrdY/19 920,36 230GrdY/20 920 |
| Self-Cooled (OA) Kilovolt-Ampere Ratings (kVA) |                                 |  |                                    |                   |  |
| 23 000   | 12 000-15 000                   | 12 000-30 000  | -                                  | -                 | -  |
| 34 500   | 12 000-15 000                   | 12 000-30 000  | 12 000-30 000                      | -                 | -  |
| 46 000   | 12 000-15 000                   | 12 000-30 000  | 12 000-30 000                      | -                 | -  |
| 69 000   | 12 000-15 000                   | 12 000-30 000  | 12 000-30 000                      | -                 | -  |
| 115 000  | 12 000-15 000                   | 12 000-60 000  | 12 000-60 000                      | 12 000-60 000     | 12 000-60 000                              |
| 138 000  | 12 000-15 000                   | 12 000-60 000  | 12 000-60 000                      | 12 000-60 000     | 12 000-60 000                              |
| 161 000  | 12 000-15 000                   | 12 000-60 000  | 12 000-60 000                      | 12 000-60 000     | 12 000-60 000                              |
| 230 000  | 12 000-15 000                   | 12 000-60 000  | 12 000-60 000                      | 12 000-60 000     | 12 000-60 000                              |

ตาราง 7 Relationships of Nominal System Voltage to Maximum System Voltage and Basic Lightning Impulse Insulation Levels (BIL) for Systems 765 kV and Below. Ref. IEEE Std. C57.12.00-1993

| Application  | Nominal System Voltage (kV rms) | Maximum System Voltage (from ANSI C84.1-1989 [2] and ANSI C92.2-1987 [4]) (kV rms) | Basic Lightning Impulse Insulation Levels (BIL) in Common Use (kV crest) |      |      |      |
|--------------|---------------------------------|--|--|------|------|------|
| Distribution | 1.2                             |  | 30   |      |      |      |
|              | 2.5                             |  | 45   |      |      |      |
|              | 5.0                             |  | 60   |      |      |      |
|              | 8.7                             |  | 75   |      |      |      |
|              | 15.0                            |  | 95   |      |      |      |
|              | 25.0                            |  | 150  | 125  |      |      |
|              | 34.5                            |  | 200  | 150  | 125  |      |
|              | 46.0                            | 48.3   | 250  | 200  |      |      |
|              | 69.0                            | 72.5   | 350  | 250  |      |      |
|              | Power                           | 1.2  |  | 45   | 30   |      |
| 2.5          |                                 |  | 60   | 45   |      |      |
| 5.0          |                                 |  | 75   | 60   |      |      |
| 8.7          |                                 |  | 95   | 75   |      |      |
| 15.0         |                                 |  | 110  | 95   |      |      |
| 25.0         |                                 |  | 150  |      |      |      |
| 34.5         |                                 |  | 200  |      |      |      |
| 46.0         |                                 | 48.3   | 250  | 200  |      |      |
| 69.0         |                                 | 72.5   | 350  | 250  |      |      |
| 115.0        |                                 | 121.0  | 550  | 450  | 350  |      |
| 138.0        |                                 | 145.0  | 650  | 550  | 450  |      |
| 161.0        |                                 | 169.0  | 750  | 650  | 550  |      |
| 230.0        |                                 | 242.0  | 900  | 825  | 750  | 650  |
| 345.0        |                                 | 362.0  | 1175   | 1050 | 900  |      |
| 500.0        |                                 | 550.0  | 1675   | 1550 | 1425 | 1300 |
| 765.0        |                                 | 800.0  | 2050   | 1925 | 1800 |      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 8 High-Voltage Winding Insulation Levels of Single-Phase Transformers.Ref.  
ANSI/IEEE Std. C57.12.10-1988

| High-Voltage Ratings<br>(V) | Basic Impulse<br>Insulation Level<br>(kV) |
|-----------------------------|---|
| 2400/4160Y                  | 75  |
| 4800/8320Y                  | 95  |
| 6900/11 950Y                | 110                                       |
| 7200/12 470Y                | 110                                       |
| 7620/13 200Y                | 110                                       |
| 12 000                      | 110                                       |
| 13 200                      | 110                                       |
| 13 800                      | 110                                       |
| 23 000                      | 150                                       |
| 34 500                      | 200                                       |
| 46 000                      | 250                                       |
| 69 000                      | 350                                       |
| 115 000                     | 450                                       |
| 138 000                     | 550                                       |

ตาราง 9 High-Voltage Winding Insulation Levels of Three-Phase Transformers.

| High-Voltage Ratings<br>(V) | Basic Impulse Insulation Level (kV) |                       |
|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
|                             | Distribution<br>Transformers        | Power<br>Transformers |
| 2 400                       | 45                                  | 60                    |
| 4 160                       | 60                                  | 75                    |
| 4 800                       | 60                                  | 75                    |
| 6 900                       | 75                                  | 95                    |
| 7 200                       | 75                                  | 95                    |
| 12 000                      | 95                                  | 110                   |
| 13 200                      | 95                                  | 110                   |
| 13 800                      | 95                                  | 110                   |
| 23 000                      | 125                                 | 150                   |
| 34 500                      | 150                                 | 200                   |
| 46 000                      | -                                   | 250                   |
| 69 000                      | -                                   | 350                   |
| 115 000                     | -                                   | 450                   |
| 138 000                     | -                                   | 550                   |
| 161 000                     | -                                   | 650                   |
| 230 000                     | -                                   | 750                   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 10 Minimum Insulation Levels at Neutral. Ref. ANSI/IEEE Std. C57.12.00-1993

| Application           | Nominal System Voltage (kV)* | Minimum Low-Frequency Insulation Level (kV rms)                                       |  |
|-----------------------|------------------------------|---|--|
|                       |                              | Grounded Solidly or Through a Current Transformer or Through a Regulating Transformer | Grounded Through a Ground-Fault Neutralizer, or Isolated but Impulse Protected |
|                       |                              | Column 1  | Column 2   |
| Distribution or Power | 1.2                          | 10  | 10   |
|                       | 2.6                          | 15  | 15   |
|                       | 5.0                          | 19  | 19   |
|                       | 8.7                          | 26  | 26   |
|                       | 15.0                         | 26  | 26   |
|                       | 25.0                         | 26  | 34   |
|                       | 34.5                         | 26  | 50   |
|                       | 46.0                         | 34  | 70   |
|                       | 69.0                         | 34  | 95   |

\* For higher line terminal system voltages than shown above, the insulation level at the neutral shall be specified to conform with service requirements, but in no case shall be less than 34 kV.  
NOTE: When specified, Y-Y connected transformers using a common, solidly grounded neutral may use a neutral bushing selected in accordance with the requirements of the LV winding.

ตาราง 11 BILs and Percentage Impedance Voltages at Self-Cooled (OA)

Rating. Ref. ANSI/IEEE Std. C57.12.10-1988

| High-Voltage BIL (kV) | Without Load Tap Changing |                              | With Load Tap Changing       |
|-----------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                       | Low Voltage 480 V         | Low Voltage 2400 V and Above | Low Voltage 2400 V and Above |
| 60-110                | 5.75*                     | 5.5*                         | —                            |
| 150                   | 6.75                      | 6.5                          | 7.0                          |
| 200                   | 7.25                      | 7.0                          | 7.5                          |
| 250                   | 7.75                      | 7.5                          | 8.0                          |
| 350                   | —                         | 8.0                          | 8.5                          |
| 450                   | —                         | 8.5                          | 9.0                          |
| 550                   | —                         | 9.0                          | 9.5                          |
| 650                   | —                         | 9.5                          | 10.0                         |
| 750                   | —                         | 10.0                         | 10.5                         |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 12 ขนาดพิกัดของ Air circuit breaker สำหรับติดตั้งภายในอาคาร ตามมาตรฐาน IEC

| แรงดันที่<br>กำหนด<br>(kV)           | กระแสปลั๊ก (A)                             | ความสามารถขณะตัดวงจร                    |   | ความสามารถขณะ<br>ตัดวงจร (kA) (ยอด<br>คลื่น) | ความคงทนต่อ<br>กระแส 1 วินาที<br>(kA)(rms) | ความคงทนต่อแรงดัน       |                            |
|--------------------------------------|--|---|---|--|--|-------------------------|----------------------------|
|                                      |  | กำลังไฟฟ้าขณะ<br>อินเตอร์รัพท์<br>(MVA) | กระแสขณะ<br>อินเตอร์รัพท์<br>(kA) (rms) |  |  | ความถี่ต่ำ<br>(kV)(rms) | อิมพัลส์<br>(kV)(ยอดคลื่น) |
| 12                                   | 630, 1250, 2000 ,2500                      | 250                                     | 12                                      | 37   | 14.5                                       | 35                      | 75                         |
|                                      | 630, 1250, 2500                            | 250                                     | 12                                      | 37   | 14.5                                       | 50                      | 95                         |
|                                      | 630, 1250, 2000 ,2500                      | 400                                     | 19                                      | 59   | 23   | 35                      | 75                         |
|                                      | 630,1250,2500                              | 400                                     | 19                                      | 59   | 23   | 50                      | 95                         |
|                                      | 630, 1250, 2000 ,2500,<br>3000, 4000, 5000 | 500                                     | 24                                      | 74   | 29   | 35                      | 75                         |
|                                      | 630, 1250, 2500, 3000,<br>4000, 5000       | 500                                     | 24                                      | 74   | 29   | 50                      | 95                         |
|                                      | 630, 1250, 2000, 2500,<br>3000, 4000, 5000 | 600                                     | 29                                      | 90   | 34   | 35                      | 75                         |
|                                      | 630, 1250, 2500, 3000,<br>4000, 5000       | 600                                     | 29                                      | 90   | 34   | 50                      | 95                         |
|                                      | 630, 1250, 2000, 2500,<br>3000, 4000, 5000 | 750                                     | 36                                      | 110  | 43   | 35                      | 75                         |
|                                      | 630, 1250, 2500,3000,<br>4000, 5000        | 750                                     | 36                                      | 110  | 43   | 50                      | 95                         |
|                                      | 2500                                       | 1000                                    | 48                                      | 145  | 58   | 50                      | 95                         |
|                                      | 24   | 630, 1250, 2500                         | 250                                     | 6  | 20   | 7.2                     | 50                         |
| 630, 1250, 2500                      |  | 350                                     | 8                                       | 30   | 11   | 50                      | 95                         |
| 630, 1250, 2500, 3000,<br>4000, 5000 |  | 500                                     | 12                                      | 40   | 15   | 50                      | 95                         |
| 630, 1250, 2500, 3000,<br>4000, 5000 |  | 1000                                    | 24                                      | 75   | 29   | 50                      | 95                         |
| 4000, 5000                           |  |   |   |  |  |                         |                            |

ตาราง 13 ขนาดพิกัดของ Air blast circuit breaker สำหรับติดตั้งภายนอกอาคาร ตามมาตรฐาน ANSI

| แรงดันที่<br>กำหนด<br>สูงสุด kV<br>(rms) | ระดับการฉนวน                    |                               | ค่ากระแส                  |                          | เวลาทำงาน                              |  | ความสามารถตัดกระแส  |  |   |
|--|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|--|--|---|--|---|
|  | พิกัดความคงทนต่อ<br>แรงดันไฟฟ้า |                               | พิกัดกระแส<br>ต่อเนื่อง A | พิกัดกระแส<br>ลัดวงจร kA | พิกัดเวลา<br>อินเตอร์รัพท์<br>(ไซเคิล) | พิกัด<br>ตอบสนอง<br>หน่วงเวลา<br>การทริป<br>(วินาที) | กระแสขณะ<br>อินเตอร์รัพท์<br>สมมาตร<br>สูงสุด kA<br>(rms) | กระแส<br>ลัดวงจร<br>เวลาสั้น 3<br>วินาที kV<br>(rms) | พิกัดกระแส<br>โมเมนตารีที่<br>1.6 เท่าของ<br>กระแสลัด<br>วงจร kV<br>(rms) |
|  | ความถี่ต่ำ                      | อิมพัลส์<br>kV (ยอด<br>คลื่น) |                           |                          |  |  |   |  |   |
| 121                                      | 260                             | 550                           | 1600                      | 40                       | 3                                      | 3  | 40  | 40   | 64  |
|  |                                 |                               | 2000                      |                          |  |  |   |  |   |
|  |                                 |                               | 3000                      |                          |  |  |   |  |   |
| 145                                      | 310                             | 650                           | 1600                      | 40                       | 3                                      | 1  | 40  | 40   | 64  |
|  |                                 |                               | 2000                      |                          |  |  |   |  |   |
|  |                                 |                               | 3000                      |                          |  |  |   |  |   |
| 242                                      | 425                             | 900                           | 1600                      | 31.5                     | 3                                      | 1  | 31.5  | 31.5   | 50  |
|  |                                 |                               | 2000                      |                          |  |  |   |  |   |
|  |                                 |                               | 3000                      |                          |  |  |   |  |   |
|  |                                 |                               | 1600                      |                          |  |  |   |  |   |
| 2000                                     |                                 |                               |                           |                          |  |  |   |  |   |
| 3000                                     |                                 |                               |                           |                          |  |  |   |  |   |
| 362                                      | 555                             | 1300                          | 1600                      | 40                       | 2                                      | 1  | 40  | 40   | 64  |
|  |                                 |                               | 2000                      |                          |  |  |   |  |   |
|  |                                 |                               | 3000                      |                          |  |  |   |  |   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 14 ขนาดพิกัดของ Minimum oil circuit breaker สำหรับติดตั้งภายในอาคารตามมาตรฐาน IEC

| แรงดันที่กำหนด (KV) | กระแสปกติ (A)   | ความสามารถขณะตัดวงจร             |                                  | ความสามารถขณะตัดวงจร (kA) (ยอดคลื่น) | ความคงทนต่อกระแส 3 วินาที (kA)(rms) | ความคงทนต่อกระแส kA (ยอดคลื่น) | ความคงทนต่อแรงดัน    |                         |
|---------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------------|
|                     |                 | กำลังไฟฟ้าขณะอินเตอร์รัพท์ (MVA) | กระแสขณะอินเตอร์รัพท์ (kA) (rms) |                                      |                                     |                                | ความถี่ต่ำ (kV)(rms) | อิมพัลส์ (kV)(ยอดคลื่น) |
| 12                  | 400, 630, 800   | 300                              | 14.5                             | 45                                   | 18                                  | 45                             | 28                   | 75                      |
|                     | 630, 800        | 370                              | 18                               |                                      |                                     |                                |                      |                         |
|                     | 630, 800, 1250  | 520                              | 25                               |                                      |                                     |                                |                      |                         |
|                     | 1250, 1600      | 650                              | 31.5                             |                                      |                                     |                                |                      |                         |
|                     | 1250, 1600      | 750                              | 36                               | 95                                   | 37.5                                | 95                             |                      |                         |
|                     | 400, 630, 800   | 300                              | 14.5                             |                                      |                                     |                                |                      |                         |
|                     | 630, 800        | 370                              | 18                               |                                      |                                     |                                |                      |                         |
|                     | 630, 800, 1250  | 500                              | 25                               |                                      |                                     |                                |                      |                         |
| 800, 1250, 1600     | 500             | 25                               | 67                               | 26.3                                 | 67                                  |                                |                      |                         |
| 400, 630, 800       | 300             | 7.5                              |                                  |                                      |                                     |                                |                      |                         |
| 630, 800            | 400             | 10                               |                                  |                                      |                                     |                                |                      |                         |
| 630, 800            | 500             | 12.5                             |                                  |                                      |                                     |                                |                      |                         |
| 24                  | 630, 800, 1250  | 600                              | 14.5                             | 58                                   | 26.3                                | 67                             | 50                   | 125                     |
|                     | 800, 1250, 1600 | 750                              | 18                               |                                      |                                     |                                |                      |                         |
|                     | 1250, 1600      | 1000                             | 25                               |                                      |                                     |                                |                      |                         |
|                     | 800, 1250       | 500                              | 8                                |                                      |                                     |                                |                      |                         |
|                     | 800, 1250       | 750                              | 12.5                             |                                      |                                     |                                |                      |                         |
| 36                  | 800, 1250       | 500                              | 8                                | 34                                   | 17.5                                | 44                             | 70                   | 170                     |
|                     | 800, 1250       | 750                              | 12.5                             |                                      |                                     |                                |                      |                         |
|                     | 800, 1250       | 900                              | 16                               |                                      |                                     |                                |                      |                         |

ตาราง 15 ขนาดพิกัดของ Vacuum circuit breaker สำหรับติดตั้งภายในอาคารตามมาตรฐาน IEC

| แรงดันที่กำหนด (KV) | กระแสปกติ (A)               | ความสามารถขณะตัดวงจร             |                                  | ความสามารถขณะตัดวงจร (kA) (ยอดคลื่น) | เวลากระหว่างตัดวงจร (วินาที) | ความคงทนต่อแรงดัน    |                         |
|---------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|----------------------|-------------------------|
|                     |                             | กำลังไฟฟ้าขณะอินเตอร์รัพท์ (MVA) | กระแสขณะอินเตอร์รัพท์ (kA) (rms) |                                      |                              | ความถี่ต่ำ (kV)(rms) | อิมพัลส์ (kV)(ยอดคลื่น) |
| 12                  | 630, 1250, 1600             | 332                              | 16                               | 40                                   | 3                            | 28                   | 75                      |
|                     | 630, 1250, 1600, 2000       | 415                              | 20                               |                                      |                              |                      |                         |
|                     | 630, 1250, 1600, 2000, 2500 | 519                              | 25                               |                                      |                              |                      |                         |
|                     | 630, 1250, 1600, 2000, 2500 | 654                              | 31.5                             |                                      |                              |                      |                         |
|                     | 1250, 2000, 2500, 3150      | 831                              | 40                               |                                      |                              |                      |                         |
| 24                  | 630, 1250                   | 332                              | 8                                | 20                                   | 3                            | 50                   | 125                     |
|                     | 630, 1250                   | 519                              | 12.5                             |                                      |                              |                      |                         |
|                     | 630, 1250                   | 665                              | 16                               |                                      |                              |                      |                         |
|                     | 630, 1250, 2000             | 831                              | 20                               |                                      |                              |                      |                         |
|                     | 1250, 2000                  | 1039                             | 25                               |                                      |                              |                      |                         |
| 36                  | 1250, 2500                  | 997                              | 16                               | 40                                   | 3                            | 70                   | 170                     |
|                     |                             | 1558                             | 25                               |                                      |                              |                      |                         |
|                     |                             | 1964                             | 31.5                             |                                      |                              |                      |                         |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 16 ขนาดพิกัดของ Gas  $SF_6$  circuit breaker ขนาด 72.5 - 525kV สำหรับติดตั้ง  
ภายนอกอาคาร

| แรงดันที่<br>กำหนด (kV) | กระแสปกติ<br>(A)         | กระแสขณะ<br>อินเตอร์รัพท์<br>(kA)(rms) | ความสามารถ<br>ขณะต่อวงจร<br>(kA)(ยอด<br>คลื่น) | เวลาทำงาน (ms) |     |     |        | ความคงทนต่อแรงดัน       |                                |
|-------------------------|--------------------------|--|--|----------------|-----|-----|--------|-------------------------|--------------------------------|
|                         |                          |  |  | เปิด           | ถัด | ลับ | ลับซ้ำ | ความถี่ต่ำ<br>(kV)(rms) | อิมพัลส์<br>(kV)(ยอด<br>คลื่น) |
| 72.5                    | 1250, 1600,              | 31.5, 40, 50,                          | 80, 100, 125,                                  | 33             | 55  | 110 | 355    | 140                     | 325                            |
| 123                     | 2000, 2500,              | 63                                     | 160  | 33             | 58  | 130 | 328    | 230                     | 550                            |
| 245                     | 3150, 4000               | 31.5 - 63                              | 160  |                |     |     |        | 460                     | 1050                           |
| 525                     | 2000, 2500<br>3150, 4000 | 40 - 80                                | 100 - 200                                      | 22             | 40  | 110 |        | 620 - 860               | 1425 -<br>1800                 |

ตาราง 17 ตัวคูณสำหรับค่ากระแสขณะอินเตอร์รัพท์ (Interrupting Current)

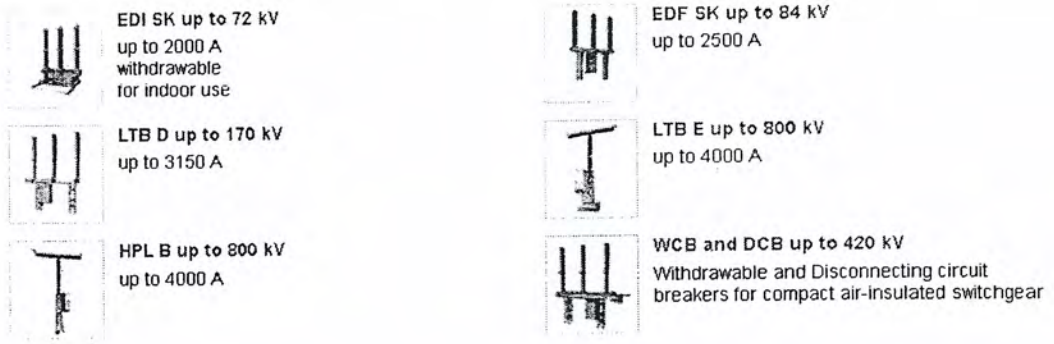
| Type   | Cycle Circuit Breaker             | Multiplying Factor |
|--|-----------------------------------|--------------------|
| General Case   | 8-cycle or slower circuit breaker | 1.0                |
|  | 5-cycle                           | 1.1                |
|  | 3-cycle                           | 1.2                |
|  | 2-cycle                           | 1.4                |
| Special Case for circuit<br>breaker at generator voltage<br>only | 8-cycle or slower circuit breaker | 1.1                |
|  | 5-cycle                           | 1.2                |
|  | 3-cycle                           | 1.3                |
|  | 2-cycle                           | 1.6                |
| Air circuit breaker rated 600<br>volt and less                   |                                   | 1.25               |

ที่มา : AIEE Switchgear committee

ตาราง 18 ตัวคูณสำหรับการหาค่ากระแสโมเมนทารี

| พิกัดแรงดันเซอร์กิตเบรกเกอร์ | Multiplying Factor |
|------------------------------|--------------------|
| มากกว่า 5 kV                 | 1.6                |
| น้อยกว่า 5 kV                | 1.6                |
| ไม่เกิน 600 V                | 1.25               |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 1 แสดง Live Tank Circuit Breaker ของบริษัท ABB

**Technical Data**

|                        |   |
|------------------------|---|
| Rated voltages         | 72.5 - 170 kV   |
| Rated current          | 3150 A  |
| Rated breaking current | 40 kA   |
| Standards              | Complies with international standards IEC and other major standards like ANSI, DIN, GOST etc. |
| Ambient temperatures   | -50°C to +50°C  |

รูป 2 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ Live Tank Circuit Breaker LTB D ของบริษัท ABB

| Typ                           |    | 3AP1 |      |      |      |      |      | 3AP2 |      |
|-------------------------------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Bemessungsspannung            | kV | 72,5 | 123  | 145  | 170  | 245  | 300  | 362  | 420  |
| Stehwechselfspannung          | kV | 140  | 230  | 275  | 325  | 460  | 460  | 520  | 610  |
| Stehblitzstoßspannung         | kV | 325  | 550  | 650  | 750  | 1050 | 1050 | 1175 | 1425 |
| Stehschaltstoßspannung        | kV | -    | -    | -    | -    | -    | 850  | 950  | 1050 |
| Bemessungsstrom bis           | A  | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 5000 | 5000 |
| Bemessungsauerschaltstrom bis | kA | 40   | 40   | 40   | 40   | 50   | 40   | 50   | 50   |

รูป 3 แสดงขนาดของ Power circuit Breaker ของบริษัท SIEMEN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 19 แสดงคุณลักษณะและสมบัติของสาย AAC

| Nominal Cross Sectional Area<br>(mm <sup>2</sup> ) | Number and approx. diameter of wire<br>(No./mm) | Approx. overall Conductor diameter<br>(mm) | Maximum Conductor resistance at 20 °C<br>(Ω.Km) | Breaking Strength<br>(Kgf) | Maximum Continuous Current Rating In Free air<br>(Ampere) | Cable Weight (approx.)<br>(Kg/Km) | Standard length<br>(m) |
|--|---|--|---|----------------------------|---|-----------------------------------|------------------------|
| 16   | 7/1.70  | 5.10                                       | 1.802   | 290                        | 110   | 44                                | 3000/D                 |
| 25   | 7/2.14  | 6.42                                       | 1.138   | 440                        | 145   | 70                                | 3000/D                 |
| 35   | 7/2.52  | 7.56                                       | 0.820   | 585                        | 180   | 95                                | 3000/D                 |
| 50   | 7/3.02  | 9.06                                       | 0.571   | 805                        | 225   | 140                               | 2500/D                 |
| 50   | 19/1.83   | 9.15                                       | 0.5757  | 890                        | 225   | 140                               | 2500/D                 |
| 70   | 19/2.15   | 10.75                                      | 0.4171  | 1,205                      | 270   | 190                               | 2500/D                 |
| 95   | 19/2.52   | 12.60                                      | 0.3036  | 1,585                      | 340   | 260                               | 2500/D                 |
| 120  | 19/2.85   | 14.25                                      | 0.2374  | 1,980                      | 390   | 330                               | 2000/D                 |
| 150  | 37/2.25   | 15.75                                      | 0.1960  | 2,570                      | 455   | 400                               | 2000/D                 |
| 185  | 37/2.52   | 17.64                                      | 0.1563  | 3,085                      | 550   | 500                               | 2000/D                 |
| 240  | 61/2.25   | 20.25                                      | 0.1192  | 4,015                      | 625   | 650                               | 1500/D                 |
| 300  | 91/2.52   | 22.68                                      | 0.0950  | 4,820                      | 710   | 850                               | 1500/D                 |
| 400  | 61/2.85   | 25.65                                      | 0.0743  | 6,025                      | 855   | 1,100                             | 1000/D                 |
| 500  | 61/3.25   | 29.25                                      | 0.0571  | 7,695                      | 990   | 1,400                             | 1000/D                 |
| 625  | 91/2.98   | 32.56                                      | 0.0463  | 9,694                      | 1,140   | 1,700                             | 500/D                  |
| 800  | 91/3.35   | 36.85                                      | 0.0361  | 12,055                     | 1,340   | 2,200                             | 500/D                  |
| 1000   | 91/3.74   | 41.14                                      | 0.0290  | 14,845                     | 1,540   | 2,800                             | 500/D                  |

ที่มา : ข้อมูลจากบริษัท Thai-Yazaki



CABLE STRUCTURE

CONDUCTOR

: Concentric stranded hard drawn aluminium wires,  
Sizes 16 mm<sup>2</sup> up to 1,000 mm<sup>2</sup>

STANDING DIRECTION REFERENCE

: Z - Stranding  
: TIS 85-2522

รูปที่ 4 แสดงภาพของ AAC และคุณสมบัติของสายของบริษัท Thai-Yazaki

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 20 แสดงคุณลักษณะและสมบัติของสาย XLPE แบบ Single Core

| Size               | Conductor Strands | Conductor Diameter Approx. | Insulation Thickness Nominal | Overall Diameter Approx. | Maximum Conductor Resistance at 20 °C | Maximum Conductor Resistance at 90 °C | Maximum Continuous Current Rating in Free air (Ampere ) | Weight Of Cable (approx.) | Standard Packing Length |
|--------------------|-------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------|-------------------------|
| (mm <sup>2</sup> ) | (mm)              | (mm)                       | (mm)                         | (mm)                     | ( $\Omega$ /km)                       | (M $\Omega$ -km)                      |   | (kg/km)                   | (m)                     |
| 1.5                | 7/0.53            | 1.59                       | 0.7                          | 3.8                      | 12.1                                  | 0.010                                 | 24  | 23                        | 500/D                   |
| 2.5                | 7/0.67            | 2.01                       | 0.8                          | 4.6                      | 7.41                                  | 0.009                                 | 33  | 34                        | 500/D                   |
| 4                  | 7/0.85            | 2.55                       | 0.8                          | 5.1                      | 4.61                                  | 0.0077                                | 44  | 49                        | 500/D                   |
| 6                  | 7/1.04            | 3.12                       | 0.8                          | 5.7                      | 3.08                                  | 0.0065                                | 57  | 70                        | 500/D                   |
| 10                 | 6                 | 3.8                        | 1.0                          | 6.6                      | 1.83                                  | 0.0050                                | 79  | 110                       | 500/D                   |
| 16                 | 6                 | 4.8                        | 1.0                          | 7.6                      | 1.15                                  | 0.0050                                | 105   | 160                       | 500/D                   |
| 25                 | 6                 | 6.0                        | 1.2                          | 9.2                      | 0.727                                 | 0.0043                                | 145   | 250                       | 500/D                   |
| 35                 | 6                 | 7.1                        | 1.2                          | 10.5                     | 0.524                                 | 0.0043                                | 180   | 340                       | 500/D                   |
| 50                 | 6                 | 8.3                        | 1.4                          | 12.0                     | 0.387                                 | 0.0035                                | 220   | 460                       | 500/D                   |
| 70                 | 12                | 9.9                        | 1.4                          | 13.5                     | 0.268                                 | 0.0035                                | 280   | 650                       | 500/D                   |
| 95                 | 15                | 11.7                       | 1.6                          | 16.0                     | 0.193                                 | 0.0035                                | 350   | 900                       | 500/D                   |
| 120                | 18                | 13.2                       | 1.6                          | 17.5                     | 0.153                                 | 0.0032                                | 405   | 1,100                     | 500/D                   |
| 150                | 18                | 14.6                       | 1.8                          | 19.0                     | 0.124                                 | 0.0032                                | 465   | 1,400                     | 500/D                   |
| 185                | 30                | 16.3                       | 2.0                          | 22                       | 0.0991                                | 0.0032                                | 540   | 1,800                     | 500/D                   |
| 240                | 34                | 18.7                       | 2.2                          | 24                       | 0.0754                                | 0.0032                                | 645   | 2,300                     | 500/D                   |
| 300                | 34                | 20.9                       | 2.4                          | 27                       | 0.0601                                | 0.0030                                | 740   | 2,900                     | 500/D                   |
| 400                | 53                | 23.5                       | 2.6                          | 30                       | 0.0470                                | 0.0028                                | 860   | 3,700                     | 500/D                   |
| 500                | 53                | 26.7                       | 2.8                          | 34                       | 0.0366                                | 0.0028                                | 1,000   | 4,700                     | 500/D                   |
| 630                | 53                | 30.3                       | 2.8                          | 36                       | 0.0283                                | 0.0025                                | 1,155   | 6,000                     | 500/D                   |

ที่มา : ข้อมูลจากบริษัท Thai-Yazaki

**CABLE STRUCTURE**NUMBER OF CORE  
CONDUCTOR

: Single Core

: Concentric stranded and compact stranded annealed copper  
Size 1.5 mm<sup>2</sup> up to 400 mm<sup>2</sup>

INSULATION

: Low smoke and zero halogen cross-linked polyethylene  
(LSOH-XLPE)

CLASSIFICATION

: Maximum conductor temperature 90 °C ,Circuit voltage not  
exceeding 1 kV

TESTING VOLTAGE

: 2.5 kV

REFERENCE STANDARD

: Based on BS 7211

SMOKE DENSITY TEST

: BS EN 50268-2 ( IEC 61034-2)

ACID GAS TEST

: BS 6383 Cat. CWZ

FLAME RETARDANT STANDARD

: BS 4066 part 1

รูป 5 แสดงภาพของ XLPE Cable และคุณสมบัติของสายของบริษัท Thai-Yazaki

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 21 Preferred Voltage Ratings for Station Class Outdoor Air Switches.

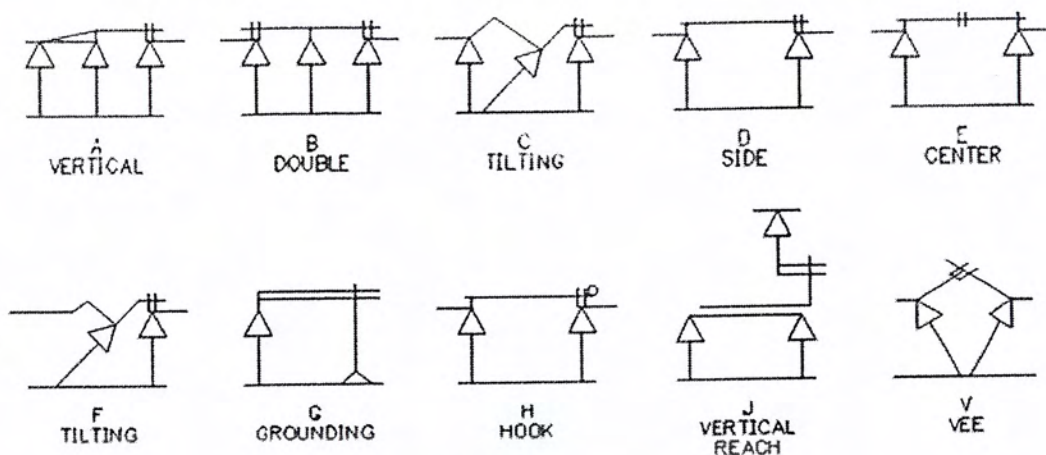
Ref. ANSI Std. C37.32-1996, Table 1

| Line Number | Rated Maximum Voltage kV rms | Rated Withstand Voltage   |                        |                | Corona and Radio Influences Test Voltages |                                      |
|-------------|------------------------------|---------------------------|------------------------|----------------|---|--------------------------------------|
|             |                              | Lightning Impulse kV peak | Power Frequency kV rms |                | Test <sup>2</sup> Voltage kV rms          | Limit of RIV <sup>2</sup> mV @ 1 MHz |
|             |                              |                           | Dry 1 Minute           | Wet 10 Seconds |   |                                      |
|             | (1)                          | (2)                       | (3)                    | (4)            | (5)                                       | (6)                                  |
| 1           | 8.25                         | 95                        | 35                     | 30             | —   | —                                    |
| 2           | 15.5                         | 110                       | 50                     | 45             | —   | —                                    |
| 3           | 25.8                         | 150                       | 70                     | 60             | —   | —                                    |
| 4           | 38.0                         | 200                       | 95                     | 80             | —   | —                                    |
| 5           | 48.3                         | 250                       | 120                    | 100            | —   | —                                    |
| 6           | 72.5                         | 250                       | 120                    | 100            | —   | —                                    |
| 7           | 72.5                         | 350 <sup>4</sup>          | 175                    | 145            | —   | —                                    |
| 8           | 121                          | 350                       | 175                    | 145            | 77  | 500                                  |
| 9           | 121                          | 450                       | 235                    | 190            | 77  | 500                                  |
| 10          | 121                          | 550 <sup>4</sup>          | 280                    | 230            | 77  | 500                                  |
| 11          | 145                          | 350                       | 175                    | 145            | 92  | 500                                  |
| 12          | 145                          | 450                       | 235                    | 190            | 92  | 500                                  |
| 13          | 145                          | 550                       | 280                    | 230            | 92  | 500                                  |
| 14          | 145                          | 650 <sup>4</sup>          | 335                    | 275            | 92  | 500                                  |
| 15          | 169                          | 450                       | 235                    | 190            | 107                                       | 500                                  |
| 16          | 169                          | 550                       | 280                    | 230            | 107                                       | 500                                  |
| 17          | 169                          | 650                       | 335                    | 275            | 107                                       | 500                                  |
| 18          | 169                          | 750 <sup>4</sup>          | 385                    | 315            | 107                                       | 500                                  |
| 19          | 242 <sup>5)</sup>            | 550                       | 280                    | 230            | 154                                       | 500                                  |
| 20          | 242 <sup>5)</sup>            | 650                       | 335                    | 275            | 154                                       | 500                                  |
| 21          | 242 <sup>5)</sup>            | 750                       | 385                    | 315            | 154                                       | 500                                  |
| 22          | 242 <sup>5)</sup>            | 900 <sup>4</sup>          | 465                    | 385            | 154                                       | 500                                  |
| 23          | 242 <sup>5)</sup>            | 1050                      | 545                    | 455            | 154                                       | 500                                  |
| 24          | 362                          | 1050                      | 545                    | 455            | 230                                       | 500                                  |
| 25          | 362                          | 1300 <sup>4</sup>         | 610                    | 525            | 230                                       | 500                                  |
| 26          | 550                          | 1550                      | 710                    | 620            | 349                                       | 500                                  |
| 27          | 550                          | 1800 <sup>4</sup>         | 810                    | 710            | 349                                       | 500                                  |
| 28          | 800                          | 2050                      | 940                    | 830            | 508                                       | 750                                  |

ตาราง 22 Preferred Switching Impulse Withstand Voltage for Station Class Outdoor Air Switches. Ref. ANSI Std. C37.32-1996, Table 2

| Line Number<br>(from table 1<br>{Table 5-38}) | Rated Maximum Voltage kV rms | Rated Lightning Impulse kV Peak | Switching Impulse Withstand Voltage kV Peak |                              |
|---|------------------------------|---------------------------------|---|------------------------------|
|   |                              |                                 | To Ground <sup>1</sup>                      | Across Open Gap <sup>2</sup> |
|   |                              |                                 | (3)   | (4)                          |
| 24  | 362                          | 1050                            | 750   | 655 + (295)                  |
| 25  | 362                          | 1300                            | 885   | 825 + (295)                  |
| 26  | 550                          | 1550                            | 1050  | 880 + (450)                  |
| 27  | 550                          | 1800                            | 1150  | 1000 + (450)                 |
| 28  | 800                          | 2050                            | 1300  | 1000 + (650)                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6 CONSTRUCTION CLASSIFICATIONS

ตาราง 23 Preferred Continuous and Withstand Currents for Station Class Outdoor Air Switches. Ref. ANSI Std. C37.32-1996, Table 3

| Line Number | Continuous Current Rating Amps (1) | Withstand Currents                        |                       |
|-------------|------------------------------------|---|-----------------------|
|             |                                    | Short-Time Withstand (Symmetrical) kA (2) | Peak Withstand kA (3) |
| 1           | 600                                | 25  | 65                    |
| 2           | 1200                               | 38  | 99                    |
| 3           | 1600                               | 44  | 114                   |
| 4           | 2000                               | 44  | 114                   |
| 5           | 2000                               | 63  | 164                   |
| 6           | 3000                               | 63  | 164                   |
| 7           | 3000                               | 75  | 195                   |
| 8           | 4000                               | 75  | 195                   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 24 Phase Spacing of Outdoor Air Switches. Ref. ANSI Std. C37.32-1996,

Table 5

| Nominal Phase-to-Phase Voltage kV | Maximum Phase-to-Phase Voltage kV | BIL kV | Minimum Metal-to-Metal for Air Switches meters (inches) | Centerline-to-Centerline Phase Spacing meters (inches) |  |                       |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------|---|--|--|-----------------------|
|                                   |                                   |        |   | Vertical Break Disconnect Switches                     | Side or Horizontal Break Disconnect Switches | All Horn Gap Switches |
| 7.5                               | 8.3                               | 95     | 0.175 (7)   | 0.457 (18)   | 0.762 (30)                                   | 0.914 (36)            |
| 14.4                              | 15.5                              | 110    | 0.305 (12)  | 0.610 (24)   | 0.762 (30)                                   | 0.914 (36)            |
| 23                                | 25.8                              | 150    | 0.381 (15)  | 0.762 (30)   | 0.914 (36)                                   | 1.22 (48)             |
| 34.5                              | 38                                | 200    | 0.457 (18)  | 0.914 (36)   | 1.22 (48)                                    | 1.52 (60)             |
| 46                                | 48.3                              | 250    | 0.533 (21)  | 1.22 (48)  | 1.52 (60)                                    | 1.83 (72)             |
| 69                                | 72.5                              | 350    | 0.787 (31)  | 1.52 (60)  | 1.83 (72)                                    | 2.13 (84)             |
| 115                               | 121                               | 550    | 1.35 (53)   | 2.13 (84)  | 2.74 (108)                                   | 3.05 (120)            |
| 138                               | 145                               | 650    | 1.60 (63)   | 2.44 (96)  | 3.35 (132)                                   | 3.66 (144)            |
| 161                               | 169                               | 750    | 1.83 (72)   | 2.74 (108)   | 3.96 (156)                                   | 4.27 (168)            |
| 230                               | 242                               | 900    | 2.26 (89)   | 3.35 (132)   | 4.87 (192)                                   | 4.87 (192)            |
| 230                               | 242                               | 1050   | 2.67 (105)  | 3.96 (156)   | 5.50 (216)                                   | 5.50 (216)            |
| 345                               | 362                               | 1050   | 2.67 (105)  | 3.96 (156)   | 5.49 (216)                                   | 5.49 (216)            |
| 345                               | 362                               | 1300   | 3.02 (119)  | 4.43 (174)   | —  | —                     |

ตาราง 25 Temperature Limitations for Air Switches. IEEE Std. C37.30-1997, Table 2

|   | Nonenclosed Indoor and Outdoor Switches   |  | Enclosed Indoor and Outdoor Switches |  |                               |
|---|---|--|--------------------------------------|--|-------------------------------|
|   | Allowable Max Temperature, $T_{max}$ (°C) | Limit of Observable Temperature Rise and Rated Current (A) (°C) (see Note 1) | Switch Part Class Designation        | Limit of Observable Temperature Rise at Rated Current, $\theta_r$ (°C) | Switch Part Class Designation |
|   | Col. 1                                    | Col. 2   | Col. 3                               | Col. 4   | Col. 5                        |
| (1) Contacts in air (see Note 2)                                    |   |  |                                      |  |                               |
| (a) Copper or copper alloy  | 75  | 32   | BO2                                  | 20   | OO3                           |
| (b) Copper or copper alloy to silver or silver alloy, or equivalent | 90  | 42   | DO4                                  | 33   | RO4                           |
| (c) Silver, silver alloy, or equivalent                             | 105                                       | 52   | FO6                                  | 43   | TO6                           |
| (d) Other (see Note 3)  | —   | —  | —                                    | —  | —                             |
| (2) Conducting mechanical joints                                    |   |  |                                      |  |                               |
| (a) Copper or aluminum  | 90  | 42   | DO4                                  | 33   | RO4                           |
| (b) Silver, silver alloy, or equivalent                             | 105                                       | 67   | FO6                                  | 57   | TO6                           |
| (c) Other (see Note 3)  | —   | —  | —                                    | —  | —                             |
| (3) Switch terminals with bolted connections                        | 90  | 42   | DO4                                  | 33   | RO4                           |
| (4) Welded or brazed joints or equivalent                           | 105                                       | 52   | FO6                                  | 43   | TO6                           |
| (5) Other current-carrying parts                                    |   |  |                                      |  |                               |
| (a) Copper or copper alloy castings                                 | 105                                       | 52   | FO6                                  | 43   | TO6                           |
| (b) Hand drawn copper parts (see Note 4)                            | 80  | 27   | CO3                                  | 25   | PO2                           |
| (c) Heat treated aluminum alloy parts                               | 105                                       | 52   | FO6                                  | 43   | TO6                           |
| (d) Woven wire flexible connectors                                  | 75  | 22   | BO2                                  | 20   | OO3                           |
| (e) Other materials (see Note 3)                                    | —   | —  | —                                    | —  | —                             |
| (6) Insulator caps and pins and bushing caps                        | 110                                       | 57   | GO7                                  | 47   | UO7                           |
| (7) Current-carrying parts in contact with insulation materials     |   |  |                                      |  |                               |
| (a) Insulation Class 90°C   | 90  | 43   | CO3                                  | 33   | PO2                           |
| (b) Insulation Class 105°C  | 105                                       | 53   | EO5                                  | 43   | SO5                           |
| (c) Insulation Class 120°C  | 120                                       | 70   | FO8                                  | 60   | VO8                           |
| (d) Insulation Class 155°C  | 155                                       | 87   | JO9                                  | 77   | WO9                           |
| (e) Insulation Class 180°C  | 180                                       | 102  | JO10                                 | 93   | XO10                          |
| (f) Insulation Class 220°C  | 220                                       | 130  | KO11                                 | 120  | YO11                          |
| (g) Oil (see Note 5)  | 90  | 43   | DO4                                  | 33   | RO4                           |
| (h) SF <sub>6</sub>   | 350                                       | 307  | —                                    | 297  | —                             |
| (8) Nonenergizable parts subjected to contact by personnel          |   |  |                                      |  |                               |
| (a) Handled by operator (see Note 6)                                | 50  | 10   | —                                    | 10   | —                             |
| (b) Accessible to operator (see Note 6)                             | 70  | 20   | —                                    | 20   | —                             |
| (c) Not accessible to operator (see Note 7)                         | —   | —  | —                                    | —  | —                             |
| (9) Entire switch in accordance with IEEE C37.30-1992               |   |  |                                      |  |                               |
| (a) Outdoor   | 85  | —  | —                                    | —  | NO1                           |
| (b) Indoor  | 85  | —  | —                                    | —  | NO1                           |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ควรแก้ไขใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 26 Phase Spacing and Ground Clearance for Station-Class Outdoor Air Switches and Bus Supports. Ref. ANSI Std. C37.32-1996,

| Line No. | Rated Max. Voltage | Rated Lightning Withstand Voltage <sup>1</sup> | Ground Clearance <sup>2</sup>  |      |             |      |         |      | Centerline-to-Centerline Phase Spacing <sup>3</sup>    |      |  |      |   |       |
|----------|--------------------|--|--|------|-------------|------|---------|------|--|------|--|------|---|-------|
|          |                    |  | Min. Metal-to-Metal Distance Disconnecting Switches, Bus Supports, and Rigid Conductors <sup>2</sup> |      | Recommended |      | Minimum |      | Vertical Break Disconnecting Switches and Bus Supports |      | Side Break (Horizontal Break) Disconnecting Switches |      | All Horn Gap Switches (Vertical and Side Break) |       |
|          |                    |  | inches   | mm   | inches      | mm   | inches  | mm   | inches   | mm   | inches   | mm   | inches  | mm    |
|          | (1)                | (2)  | (3)  |      | (4)         |      | (5)     |      | (6)  |      | (7)  |      | (8)   |       |
| 1        | 8.25               | 95   | 7  | 178  | 7.5         | 191  | 6       | 152  | 18   | 457  | 20   | 762  | 36  | 914   |
| 2        | 15.5               | 110  | 12   | 305  | 10          | 254  | 7       | 178  | 24   | 610  | 30   | 762  | 36  | 914   |
| 3        | 25.8               | 150  | 15   | 381  | 12          | 305  | 10      | 254  | 30   | 762  | 36   | 914  | 48  | 1220  |
| 4        | 38.0               | 200  | 18   | 457  | 15          | 381  | 13      | 330  | 36   | 914  | 48   | 1220 | 60  | 1520  |
| 5        | 48.3               | 250  | 21   | 533  | 18          | 457  | 17      | 432  | 48   | 1220 | 60   | 1520 | 72  | 1830  |
| 6        | 72.5               | 350  | 21   | 533  | 18          | 457  | 17      | 432  | 48   | 1220 | 60   | 1520 | 72  | 1830  |
| 7        | 72.5               | 350  | 31   | 787  | 29          | 737  | 25      | 635  | 60   | 1520 | 72   | 1830 | 84  | 2130  |
| 8        | 121                | 350  | 31   | 787  | 29          | 737  | 25      | 635  | 60   | 1520 | 72   | 1830 | 84  | 2130  |
| 9        | 121                | 450  | 44   | 1118 | 39          | 991  | 34      | 846  | 72   | 1830 | 91   | 2310 | 102   | 2620  |
| 10       | 121                | 550  | 53   | 1350 | 47          | 1193 | 42      | 1067 | 84   | 2130 | 108  | 2740 | 120   | 3050  |
| 11       | 145                | 350  | 31   | 787  | 29          | 737  | 25      | 635  | 60   | 1520 | 72   | 1830 | 84  | 2130  |
| 12       | 145                | 450  | 44   | 1118 | 39          | 991  | 34      | 846  | 72   | 1830 | 91   | 2310 | 102   | 2620  |
| 13       | 145                | 550  | 53   | 1350 | 47          | 1193 | 42      | 1067 | 84   | 2130 | 108  | 2740 | 120   | 3050  |
| 14       | 145                | 650  | 63   | 1600 | 52.5        | 1333 | 50      | 1270 | 96   | 2440 | 122  | 3100 | 144   | 3660  |
| 15       | 169                | 450  | 44   | 1118 | 39          | 991  | 34      | 846  | 72   | 1830 | 91   | 2310 | 102   | 2620  |
| 16       | 169                | 550  | 53   | 1350 | 47          | 1193 | 42      | 1067 | 84   | 2130 | 108  | 2740 | 120   | 3050  |
| 17       | 169                | 650  | 63   | 1600 | 52.5        | 1333 | 50      | 1270 | 96   | 2440 | 122  | 3100 | 144   | 3660  |
| 18       | 169                | 750  | 72   | 1830 | 61.5        | 1562 | 58      | 1473 | 108  | 2740 | 136  | 3460 | 168   | 4270  |
| 19       | 242                | 550  | 53   | 1350 | 47          | 1193 | 42      | 1067 | 84   | 2130 | 108  | 2740 | 120   | 3050  |
| 20       | 242                | 650  | 63   | 1600 | 52.5        | 1333 | 50      | 1270 | 96   | 2440 | 122  | 3100 | 144   | 3660  |
| 21       | 242                | 750  | 72   | 1830 | 61.5        | 1562 | 58      | 1473 | 108  | 2740 | 136  | 3460 | 168   | 4270  |
| 22       | 242                | 900  | 89   | 2260 | 76          | 1930 | 71      | 1803 | 132  | 3350 | 162  | 4870 | 192   | 4870  |
| 23       | 242                | 1050   | 105  | 2670 | 90.5        | 2299 | 83      | 2108 | 156  | 3960 | 216  | 5500 | 216   | 5500  |
| 24       | 362                | 1050   | 105  | 2670 | 90.5        | 2299 | 84      | 2134 | 156  | 3960 | 216  | 5500 | 216   | 5500  |
| 25       | 362                | 1300   | 119  | 3020 | 106         | 2692 | 104     | 2642 | 174  | 4430 | 240  | 6100 | 240   | 6100  |
| 26       | 550                | 1350   | See Note 5   |      | See Note 5  |      | 124     | 3150 | See Note 5   |      | See Note 5   |      | 300   | 7620  |
| 27       | 550                | 1800   | See Note 5   |      | See Note 5  |      | 144     | 3658 | See Note 5   |      | See Note 5   |      | 324   | 8230  |
| 28       | 800                | 2050   | See Note 5   |      | See Note 5  |      | 166     | 4216 | See Note 5   |      | See Note 5   |      | 600   | 15240 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 27 Grounding Switch Electrical Clearance. Ref. ANSI Std. C37.32-1996, Table 14

| Line No.                   | Rated Maximum Voltage<br>kV rms | Rated Lightning Impulse<br>Withstand Voltage<br>kV Peak | Minimum Gap –<br>Ground Switches<br>to Live Parts |      |
|----------------------------|---------------------------------|---|---|------|
|                            |                                 |   | inches  | mm   |
| (1)                        |                                 | (2)   | (3)   |      |
| INDOOR                     |                                 |   |   |      |
| 1                          | 4.8                             | 60  | 2.0   | 50.8 |
| 2                          | 8.25                            | 75  | 2.0   | 50.8 |
| 3                          | 15.0                            | 95  | 2.0   | 50.8 |
| 4                          | 15.5                            | 110   | 2.0   | 50.8 |
| 5                          | 25.8                            | 125   | 3.0   | 76.2 |
| 6                          | 38.0                            | 150   | 4.0   | 102  |
| DISTRIBUTION CLASS OUTDOOR |                                 |   |   |      |
| 7                          | 8.25                            | 75  | 2.0   | 50.8 |
| 8                          | 15.0                            | 95  | 2.0   | 50.8 |
| 9                          | 27.0                            | 125   | 3.0   | 76.2 |
| 10                         | 38.0                            | 150   | 4.0   | 102  |
| STATION CLASS OUTDOOR      |                                 |   |   |      |
| 11                         | 8.25                            | 95  | 2.0   | 50.8 |
| 12                         | 15.5                            | 110   | 2.0   | 50.8 |
| 13                         | 25.8                            | 150   | 4.0   | 102  |
| 14                         | 38.0                            | 200   | 6.0   | 152  |
| 15                         | 48.3                            | 250   | 9.5   | 241  |
| 16                         | 72.5                            | 250   | 9.5   | 241  |
| 17                         | 72.5                            | 350   | 14  | 367  |
| 18                         | 121                             | 350   | 14  | 367  |
| 19                         | 121                             | 450   | 18  | 457  |
| 20                         | 121                             | 550   | 22  | 559  |
| 21                         | 145                             | 350   | 14  | 367  |
| 22                         | 145                             | 450   | 18  | 457  |
| 23                         | 145                             | 550   | 22  | 559  |
| 24                         | 145                             | 650   | 27  | 686  |
| 25                         | 169                             | 450   | 18  | 457  |
| 26                         | 169                             | 550   | 22  | 559  |
| 27                         | 169                             | 650   | 27  | 686  |
| 28                         | 169                             | 750   | 31  | 787  |
| 29                         | 242                             | 550   | 22  | 559  |
| 30                         | 242                             | 650   | 27  | 686  |
| 31                         | 242                             | 750   | 31  | 787  |
| 32                         | 242                             | 900   | 38  | 965  |
| 33                         | 242                             | 1050  | 44  | 1118 |
| 34                         | 362                             | 1050  | 47  | 1194 |
| 35                         | 362                             | 1300  | 50  | 1270 |
| 36                         | 550                             | 1550  | 75  | 1905 |
| 37                         | 550                             | 1800  | 85  | 2159 |
| 38                         | 800                             | 2050  | 112   | 2845 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 28 ข้อมูลทางเทคนิค Disconnecting Switch แบบ Center-Break Disconnectors ชนิด  
SGF ของบริษัท Hapam

| Disconnecter   |    | SGF<br>72,5 | SGF<br>90 | SGF<br>123 | SGF<br>145 | SGF<br>170 | SGF<br>245 | SGF<br>300 | SGF<br>362 | SGF<br>420 | SGF<br>550 |
|--|----|-------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Rated voltage  | kV | 72,5        | 90        | 123        | 145        | 170        | 245        | 300        | 362        | 420        | 550        |
| Rated normal current   |    |             |           |            |            |            |            |            |            |            |            |
| - type n   | A  | 1600        | 1600      | 1600       | 1600       | 1600       | 1600       | 1600       | -          | -          | -          |
| - type p   | A  | 2500        | 2500      | 2500       | 2500       | 2500       | 2500       | 2500       | 2500       | 2500       | 2500       |
| - type pc  | A  | -           | -         | 3150       | 3150       | 3150       | 3150       | 3150       | 3150       | 3150       | 3150       |
| - type q   | A  | -           | -         | 4000       | 4000       | 4000       | 4000       | 4000       | 4000       | 4000       | 4000       |
| Rated peak<br>withstand<br>current of<br>disconnecter<br>and earthing switch |    |             |           |            |            |            |            |            |            |            |            |
| - type n   | kA | 100         | 100       | 100        | 100        | 100        | 100        | 100        | -          | -          | -          |
| - type p /pc /q  | kA | 100         | 100       | 100 /125   | 100 /125   | 100 /125   | 100 /125   | 100 /125   | 100 /125   | 100 /125   | 100 /125   |
| Rated short-time<br>withstand current<br>(rms.)                              | kA | 40          | 40        | 40 /<br>50 | 40 /<br>50 | 40 /<br>50 | 40 /<br>50 | 40 /50     | 40 /50     | 40 /50     | 40 /50     |
| Rated power-<br>frequency<br>withstand voltage 50<br>Hz,<br>1min             |    |             |           |            |            |            |            |            |            |            |            |
| - to earth and<br>between phases:  | kV | 140         | 150       | 230        | 275        | 325        | 460        | 380        | 450        | 520        | 620        |
| - across open<br>switching device:   | kV | 160         | 175       | 265        | 315        | 375        | 530        | 435        | 520        | 610        | 800        |
| Rated lightning<br>impulse<br>withstand voltage<br>1,2 / 50 µs               |    |             |           |            |            |            |            |            |            |            |            |
| - to earth and<br>between phases:  | kV | 325         | 380       | 550        | 650        | 750        | 1050       | 1050       | 1175       | 1425       | 1550       |
| - across open<br>switching device:   | kV | 375         | 440       | 630        | 750        | 860        | 1200       | 1050(+170) | 1175(+240) | 1425(+240) | 1550(+315) |

ตาราง 29 แสดงการแบ่ง class ของ instrument Transformer ตามมาตรฐานต่างๆ

| Application  | VDE<br>class | IEC<br>class | ANSI<br>class |
|--|--------------|--------------|---------------|
| Precision measurements and calibration               | 0.1          | 0.1          | 0.3           |
| Accurate power measurement, tariff metering          | 0.2          | 0.2          | 0.3           |
| Tariff metering, accurate measuring instruments      | 0.5          | 0.5          | 0.6           |
| Industrial meters : voltage, current, power, etc.    | 1            | 1            | 1.2           |
| Ammeters or voltmeter, overcurrent or voltage relays | 3            | 3.5          | 1.2           |
| Protection cores of current transformers             | 5P,10P       | 5P,10P       | C, T          |

ที่มา: Switchgear Manual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 30 แสดงพิกัด Burden ของ CT Class Metering และ Protection ตาม ANSI/IEEE Std. C57.13-1978 (สำหรับCTที่มีกระแสทุติยภูมิ 5A)

| Burden Designation† | Resistance ( $\Sigma$ ) | Inductance (mH) | Impedance ( $\Sigma$ ) | Volt-Amperes (at 5 A) | Power Factor |
|---------------------|-------------------------|-----------------|------------------------|-----------------------|--------------|
| Metering Burdens    |                         |                 |                        |                       |              |
| B-0.1               | 0.09                    | 0.116           | 0.1                    | 2.5                   | 0.9          |
| B-0.2               | 0.18                    | 0.232           | 0.2                    | 5.0                   | 0.9          |
| B-0.5               | 0.45                    | 0.580           | 0.5                    | 12.5                  | 0.9          |
| B-0.9               | 0.81                    | 1.04            | 0.9                    | 22.5                  | 0.9          |
| B-1.8               | 1.62                    | 2.08            | 1.8                    | 45.0                  | 0.9          |
| Relaying Burdens    |                         |                 |                        |                       |              |
| B-1                 | 0.5                     | 2.3             | 1.0                    | 25                    | 0.5          |
| B-2                 | 1.0                     | 4.6             | 2.0                    | 50                    | 0.5          |
| B-4                 | 2.0                     | 9.2             | 4.0                    | 100                   | 0.5          |
| B-8                 | 4.0                     | 18.4            | 8.0                    | 200                   | 0.5          |

ตาราง 31 แสดงการจำแนกประเภทของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

|  | Class            | เงื่อนไขการใช้งาน                            |
|--|------------------|--|
| Class Measuring<br>(Rate O/P 2.5, 5.0, 10, 15, 30VA) | 0.1, 0.2, 0.5, 1 | กระแสทุติยภูมิระหว่าง 25-100% ของRate Output |
|  | 0.25, 0.5        | กระแสทุติยภูมิ 5A                            |
|  | 3, 5             | กระแสทุติยภูมิระหว่าง 50-100% ของRate Output |
| Class Protection<br>(Rate O/P 10, 15, 30VA)          | 5P, 10P          | ---  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตาราง 32 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ Overcurrent Realy

#### ● Overcurrent relays

| Type                     | QH-OC1   |  | QH-OC2   |
|--------------------------|--|--|--|
| Trip system              | Shunt trip                                     |  | Current trip   |
| Rated current            | 5A   |  |  |
| Rated frequency          | 50/60Hz  |  |  |
| Inverse time-lag element | Setting range                                  | 3-3.5-4-4.5-5-6A   |  |
|                          | Time-lag setting                               | 0.5-1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-15-20-30-40-50 (16 steps)   |  |
|                          | Operate time                                   | 300% overcurrent: 10s ± 17% or less, 700% overcurrent: 1.67s ± 12% or less at min. operating current and time-lag setting = 10     |  |
|                          | Operate characteristic                         | Extremely inverse time-lag   |  |
| Instantaneous element    | Setting range                                  | 20-30-40-50-60-Lock  |  |
|                          | Operate time                                   | 200%, 0.05s or less  |  |
| Indication               | Start, time-lag elapsed, operate, power, alarm |  |  |
| Contact                  | For trip<br>QH-OC1: 1NO<br>QH-OC2: 2NC         | Making capacity<br>10A at 100V DC, 220V DC (L/R=7ms)<br>Breaking capacity<br>1A at 110V DC (L/R=7ms)<br>3.5A at 220V AC (cosφ=0.4) | Breaking capacity<br>50A at 110V AC (depending on CT burden) |
|                          | For alarm, 1NO                                 | 2A at 24V DC (max. 30W at 125V DC) (L/R=7ms)<br>2A at 100V AC (max. 220VA at 250V AC) (cosφ=0.4)                                   |  |
| Consumed VA              | 2VA (at 5A)                                    |  | 2VA (at 5A)  |
| Mass                     | 1.1kg  |  | 1.1kg  |

ที่มา : ข้อมูล Relay จากบริษัท Fuji Electric FA Component &System

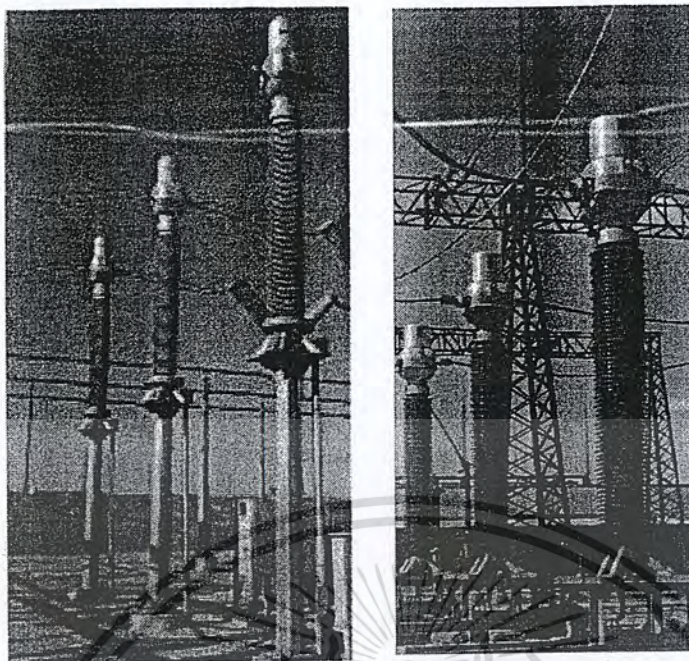
### ตาราง 33 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ Ground-fault Realy

#### ● Ground-fault relays

| Type                      | QH-GR3A                                   |   |
|---------------------------|---|---|
| Trip system               | Shunt trip, current trip                  |   |
| Operating current setting | 0.1-0.2-0.4-0.6-0.8A                      |   |
| Operating time            | 0.1 to 0.3s at 130% current setting value |   |
|                           | 0.1 to 0.2s at 400% current setting value |   |
| Indication                | Operation                                 | Magnetic inversion (manual reset)   |
|                           | Power                                     | Green LED   |
| Contact                   | For trips: 2PDT                           | Making capacity:<br>10A at 250V AC (cosφ= 0.4), 10A at 125V DC (L/R= 7ms)<br>Breaking capacity:<br>7.5A at 110V AC (max. 825VA at 250V AC) (cosφ= 0.4)<br>1.2A at 100V DC (max. 120W at 125V DC) (L/R= 7ms) |
|                           | For alarm: 1NO                            | 2A at 110V AC (max. 220VA at 250V AC)<br>2A at 24V DC (0.1A at 125V DC)   |
| Consumed VA               | 5VA (at operating)                        |   |
| Test button               | Providied                                 |   |
| Mass                      | 1.7kg                                     |   |

ที่มา : ข้อมูล Relay จากบริษัท Fuji Electric FA Component &System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 7 Current Transformer แบบ Oil filed ของบริษัท Trench

ตาราง 34 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ Current Transformer แบบ Oil-filled

| Type      | Max continuous operating voltage<br>phase to phase<br>kV | Test voltage<br>50/60 Hz<br>1 min.<br>dry/wet<br>kV | Impulse<br>withstand<br>test voltage<br>full wave<br>1.2/50 $\mu$ s<br>kV | Switching<br>impulse<br>test voltage<br>250/2500 $\mu$ s<br>wet<br>kV | Min<br>spark<br>distance<br>mm | Standard<br>creepage<br>distance<br>mm |
|-----------|--|---|---|---|--------------------------------|--|
| IOSK 72.5 | 72.5   | 140   | 325   | -   | 700                            | 1815                                   |
| IOSK 123  | 123  | 230   | 550   | -   | 1200                           | 3815                                   |
| IOSK 145  | 145  | 275   | 650   | -   | 1200                           | 3815                                   |
| IOSK 170  | 170  | 325   | 750   | -   | 1400                           | 4495                                   |
| IOSK 245  | 245  | 395   | 950   | -   | 2200                           | 6300                                   |
| IOSK 245  | 245  | 460   | 1050  | -   | 2200                           | 6300                                   |
| IOSK 300  | 300  | 460   | 1050  | 850   | 2200                           | 6300                                   |
| IOSK 362  | 362  | 570   | 1300  | 950   | 2650                           | 9955                                   |
| IOSK 420  | 420  | 630   | 1425  | 1050<br>1175  | 3200<br>3800                   | 11550                                  |
| IOSK 420  | 420  | 680   | 1550  | 1050<br>1175<br>1300  | 3200<br>3800<br>4200           | 11550                                  |
| IOSK 550  | 550  | 680   | 1550  | 1175<br>1300  | 3800<br>4200                   | 15125                                  |

ที่มา : ข้อมูล Current Transformer แบบ Oil-filled จากบริษัท Trench

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 35 Ratings for Current Transformers with One or Two Ratios. Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 7

| Single Ratio |          | Current Ratings (A)                                |   |
|--------------|----------|--|---|
|              |          | Double Ratio With Series-Parallel Primary Windings | Double Ratio with Taps in Secondary Winding |
| 10:5         | 800:5    | 25 x 50:5  | 25 / 50:5                                   |
| 15:5         | 1200:5   | 50 x 100:5   | 50 / 100:5                                  |
| 25:5         | 1500:5   | 100 x 200:5  | 100 / 200:5                                 |
| 40:5         | 2000:5   | 200 x 400:5  | 200 / 400:5                                 |
| 50:5         | 3000:5   | 400 x 800:5  | 300 / 600:5                                 |
| 75:5         | 4000:5   | 600 x 1200:5                                       | 400 / 800:5                                 |
| 100:5        | 5000:5   | 1000 x 2000:5                                      | 600 / 1200:5                                |
| 200:5        | 6000:5   | 2000 x 4000:5                                      | 1000 / 2000:5                               |
| 300:5        | 8000:5   |  | 1500 / 3000:5                               |
| 400:5        | 12 000:5 |  | 2000 / 4000:5                               |
| 600:5        |          |  |   |

ตาราง 36 Current Transformer Ratings, Multi-Ratio Type. Ref. IEEE Std. C57.13-1993,

Table 8

| Current Ratings (A) | Secondary Taps | Current Ratings (A) | Secondary Taps |
|---------------------|----------------|---------------------|----------------|
| 600:5               |                | 3000:5              |                |
| 50:5                | X2 - X3        | 300:5               | X3 - X4        |
| 100:5               | X1 - X2        | 500:5               | X4 - X5        |
| 150:5               | X1 - X3        | 800:5               | X3 - X5        |
| 200:5               | X4 - X5        | 1000:5              | X1 - X2        |
| 250:5               | X3 - X4        | 1200:5              | X2 - X3        |
| 300:5               | X2 - X4        | 1500:5              | X2 - X4        |
| 400:5               | X1 - X4        | 2000:5              | X2 - X5        |
| 450:5               | X3 - X5        | 2200:5              | X1 - X3        |
| 500:5               | X2 - X5        | 2500:5              | X1 - X4        |
| 600:5               | X1 - X5        | 3000:5              | X1 - X5        |
| 1200:5              |                | 4000:5              |                |
| 100:5               | X2 - X3        | 500:5               | X1 - X2        |
| 200:5               | X1 - X2        | 1000:5              | X3 - X4        |
| 300:5               | X1 - X3        | 1500:5              | X2 - X3        |
| 400:5               | X4 - X5        | 2000:5              | X1 - X3        |
| 500:5               | X3 - X4        | 2500:5              | X2 - X4        |
| 600:5               | X2 - X4        | 3000:5              | X1 - X4        |
| 800:5               | X1 - X4        | 3500:5              | X2 - X5        |
| 900:5               | X3 - X5        | 4000:5              | X1 - X5        |
| 1000:5              | X2 - X5        |                     |                |
| 1200:5              | X1 - X5        |                     |                |
| 2000:5              |                | 5000:5              |                |
| 300:5               | X3 - X4        | 500:5               | X2 - X3        |
| 400:5               | X1 - X2        | 1000:5              | X4 - X5        |
| 500:5               | X4 - X5        | 1500:5              | X1 - X2        |
| 800:5               | X2 - X3        | 2000:5              | X3 - X4        |
| 1100:5              | X2 - X4        | 2500:5              | X2 - X4        |
| 1200:5              | X1 - X3        | 3000:5              | X3 - X5        |
| 1500:5              | X1 - X4        | 3500:5              | X2 - X5        |
| 1600:5              | X2 - X5        | 4000:5              | X1 - X4        |
| 2000:5              | X1 - X5        | 5000:5              | X1 - X5        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 37 Standard Accuracy Class for Metering Service and Corresponding Limits of Transformer Correction Factor (0.6 to 1.0 Power Factor (Lagging) of Metered Load).

Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 6

| Metering Accuracy Class | Voltage Transformers<br>(At 90 to 100 Percent Rated Voltage) |         | Current Transformers   |         |                      |         |
|-------------------------|--|---------|------------------------|---------|----------------------|---------|
|                         | Minimum  | Maximum | At 100% Rated Current* |         | At 10% Rated Current |         |
|                         |  |         | Minimum                | Maximum | Minimum              | Maximum |
| 0.3                     | 0.997  | 1.003   | 0.997                  | 1.003   | 0.994                | 1.006   |
| 0.6                     | 0.994  | 1.006   | 0.994                  | 1.006   | 0.988                | 1.012   |
| 1.2                     | 0.988  | 1.012   | 0.988                  | 1.012   | 0.976                | 1.024   |

\* For current transformers the 100 percent rated current limit also applies at the current corresponding to the continuous thermal current rating factor.

ตาราง 38 Basic Impulse Insulation Levels and Dielectric Tests for Current Transformers with the Same Dielectric Test Requirements as Outdoor Power Circuit Breakers.\*Ref.

IEEE Std. C57.13-1993, Table 3

| Low Frequency (kV, rms) |            |           | Impulse Test 1.2 x 50 $\mu$ s Wave (kV, Crest) <sup>†</sup> |                       |                     |                     |                                    | Minimum Creep Distance |       |
|-------------------------|------------|-----------|---|-----------------------|---------------------|---------------------|------------------------------------|------------------------|-------|
| Rated max.              | 1 min. dry | 10 s wet  | Full wave withstand   | Interrupter full wave | 2 $\mu$ s withstand | 3 $\mu$ s withstand | Switching impulse insulation level | (mm)                   | (in.) |
| 121                     | 260        | 230       | 550B <sup>‡</sup>   | 412                   | 710                 | 632                 | Not req'd                          | 1780                   | 70    |
| 145                     | 310        | 275       | 650B  | 488                   | 838                 | 748                 | Not req'd                          | 2130                   | 84    |
| 169                     | 365        | 315       | 750B  | 552                   | 968                 | 862                 | Not req'd                          | 2490                   | 93    |
| 242                     | 425        | 350       | 900B  | 675                   | 1160                | 1040                | Not req'd                          | 3560                   | 140   |
| 362                     | 555        | Not req'd | 1300B   | 975                   | 1680                | 1500                | 825                                | 5310                   | 209   |
| 550                     | 860        | Not req'd | 1800B   | 1350                  | 2320                | 2070                | 1175                               | 8080                   | 318   |
| 800                     | 960        | Not req'd | 2050B   | 1540                  | 2640                | 2360                | 1425                               | 11200                  | 442   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 39 Limits of Temperature Rise.\* Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 4

| Type of Instrument | 30°C Ambient                         |   | 55°C Ambient                         |  |
|--------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|--|
|                    | Average Winding Temperature Rise     | Hottest-Spot Winding Temperature Rise (°C)† | Average Winding Temperature Rise     | Hottest-Spot Winding Temperature Rise (°C) |
|                    | Determined by Resistance Method (°C) |   | Determined by Resistance Method (°C) |  |
| Transformer        |                                      |   |                                      |  |
| 55°C Rise          | 55‡                                  | 65  | 30                                   | 40   |
| 65°C Rise          | 65‡                                  | 80  | 40                                   | 55   |
| 80°C Rise Dry-Type | 80                                   | 110   | 55                                   | 85   |

\* Temperature rise of current transformers that are a part of high-voltage power circuit breakers or power transformers shall be in accord with ANSI C37.04-1979 or IEEE C57.12.00-1993, respectively.

† Temperature rise of other metallic parts shall not exceed these values.

‡ Temperature rise at the top of the oil in sealed transformers shall not exceed these values.

ตาราง 40 Basic Impulse Insulation Levels and Dielectric Tests Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 2

| Maximum System Voltage (kV) | Nominal System Voltage (kV) | BIL and Full Wave Crest (kV) * | Chopped Wave Minimum Time to Crest to Flashover (kV) & (µs) | Power Frequency Applied Voltage Test (kV rms) | Wet 60 Hz 10 s Withstand (kV rms)** | Minimum Creepage Distance (in.) & (mm) |
|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---|---|-------------------------------------|--|
| .66                         | .6                          | 10                             | 12  | 4   | —                                   | —                                      |
| 1.2                         | 1.2                         | 30                             | 36  | 1.5   | 10                                  | 6‡                                     |
| 2.75                        | 2.4                         | 45                             | 54  | 1.5   | 15                                  | 13‡                                    |
| 5.6                         | 5                           | 60                             | 69  | 1.5   | 19                                  | 20‡                                    |
| 9.52                        | 8.7                         | 75                             | 88  | 1.6   | 26                                  | 24‡                                    |
| 15.5                        | 15                          | 95                             | 110   | 1.8   | 34                                  | 30‡                                    |
| 15.5                        | 15                          | 110                            | 130   | 2   | 34                                  | 34                                     |
| 25.5                        | 25                          | 125                            | 145   | 2.25  | 40                                  | 36‡                                    |
| 25.5                        | 25                          | 150                            | 175   | 3   | 50                                  | 50                                     |
| 36.5                        | 34.5                        | 200                            | 230   | 3   | 70                                  | 70                                     |
| 48.3                        | 46                          | 250                            | 290   | 3   | 95                                  | 95                                     |
| 72.5                        | 69                          | 350                            | 400   | 3   | 140                                 | 140                                    |
| 121                         | 115                         | 450                            | 520   | 3   | 185                                 | 185                                    |
| 121                         | 115                         | 550                            | 630   | 3   | 230                                 | 230                                    |
| 145                         | 138                         | 650                            | 750   | 3   | 275                                 | 275                                    |
| 169                         | 161                         | 750                            | 865   | 3   | 325                                 | 315                                    |
| 242                         | 230                         | 900                            | 1035  | 3   | 395                                 | 350                                    |
| 242                         | 230                         | 1050                           | 1210  | 3   | 460                                 | 445                                    |
| 362                         | 345                         | 1300                           | 1500  | 3   | 575                                 | —                                      |
| 550                         | 500                         | 1675                           | 1925  | 3   | 750                                 | —                                      |
| 550                         | 500                         | 1800                           | 2070  | 3   | 800                                 | —                                      |
| 800                         | 765                         | 2050                           | 2360  | 3   | 920                                 | —                                      |

\* The selection of the lower BIL for a given nominal system voltage for a marked ratio in Tables 5-73 through 5-77 also reduces other requirements as tabulated above. The acceptability of these reduced requirements should be evaluated for the specific instrument transformer design and application.

\*\* For test procedures, see IEEE Std. 21-1976.

‡ These values are requirements for distribution transformer bushings in IEEE C57.12.00-1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 41 แสดงค่า Rate Burden ของ PT ตามมาตรฐาน ANSI/IEEE C57.13-1978 ของ PT(60Hz)

| Characteristics on Standard Burdens* |              |              | Characteristics on 120 V Basis |                |                        | Characteristics on 69.3 V Basis |                |                        |
|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------------------------|----------------|------------------------|---------------------------------|----------------|------------------------|
| Designation                          | Volt-Amperes | Power Factor | Resistance ( $\Omega$ )        | Inductance (H) | Impedance ( $\Omega$ ) | Resistance ( $\Omega$ )         | Inductance (H) | Impedance ( $\Omega$ ) |
| W                                    | 12.5         | 0.10         | 115.2                          | 3.04           | 1152                   | 38.4                            | 1.01           | 384                    |
| X                                    | 25           | 0.70         | 403.2                          | 1.09           | 576                    | 134.4                           | 0.364          | 192                    |
| M                                    | 35           | 0.20         | 82.3                           | 1.07           | 411                    | 27.4                            | 0.356          | 137                    |
| Y                                    | 75           | 0.85         | 163.2                          | 0.268          | 192                    | 54.4                            | 0.0894         | 64                     |
| Z                                    | 200          | 0.85         | 61.2                           | 0.101          | 72                     | 20.4                            | 0.0335         | 24                     |
| ZZ                                   | 400          | 0.85         | 30.6                           | 0.0503         | 36                     | 10.2                            | 0.0168         | 12                     |

\* These burden designations have no significance except at 60 Hz.

ตาราง 42 Ratings and Characteristics of Group 1 Voltage Transformers. Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 10

| Rated Primary Voltage for Rated Voltage Line-to-Line (V) | Marked Ratio | Basic Impulse Insulation Level (kV Crest) |
|--|--------------|---|
| 120 for 208Y   | 1:1          | 10  |
| 240 for 416Y   | 2:1          | 10  |
| 300 for 520Y   | 2.5:1        | 10  |
| 120 for 208Y   | 1:1          | 30  |
| 240 for 416Y   | 2:1          | 30  |
| 300 for 520 T  | 2.5:1        | 30  |
| 480 for 832Y   | 4:1          | 30  |
| 600 for 1040Y  | 5:1          | 30  |
| 2400 for 4160Y   | 20:1         | 60  |
| 4200 for 7280Y   | 35:1         | 75  |
| 4800 for 8320Y   | 40:1         | 75  |
| 7200 for 12 470Y   | 60:1         | 110 or 95                                 |
| 8400 for 14 560Y   | 70:1         | 110 or 95                                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 12 Ratings and Characteristics of Group 2 Voltage Transformers. Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 11.

| Rated Primary Voltage for<br>Rated Voltage Line-to-Line<br>(V) | Marked<br>Ratio | Basic Impulse<br>Insulation Level<br>(kV Crest) |
|--|-----------------|---|
| 120 for 120Y   | 1:1             | 10  |
| 240 for 240Y   | 2:1             | 10  |
| 300 for 300Y   | 2.5:1           | 10  |
| 480 for 480Y   | 4:1             | 10  |
| 600 for 600Y   | 5:1             | 10  |
| 2400 for 2400Y   | 20:1            | 45  |
| 4800 for 4800Y   | 40:1            | 60  |
| 7200 for 7200Y   | 60:1            | 75  |
| 12 000 for 12 000Y   | 100:1           | 110 or 95                                       |
| 14 400 for 14 400Y   | 120:1           | 110 or 95                                       |
| 24 000 for 24 000Y   | 200:1           | 150 or 125                                      |
| 34 500 for 34 500Y   | 300:1           | 200 or 150                                      |
| 46 000 or 46 000Y  | 400:1           | 250   |
| 69 000 for 69 000Y   | 600:1           | 350   |

ตาราง 44 Ratings and Characteristics of Group 3 Outdoor Voltage Transformers. Ref. IEEE Std. C57.13-1993, Table 12

| Rated Voltage<br>(V)   | Marked<br>Ratio           | Basic Impulse<br>Insulation Level<br>(kV Crest) |
|------------------------|---------------------------|---|
| 24 940 Grd Y/14 400    | 120/200 and 120/200:1     | 150 or 125                                      |
| 34 500 Grd Y/20 125    | 175/300 and 175/300:1     | 200   |
| 46 000 Grd Y/27 600    | 240/400 and 240/400:1     | 250   |
| 69 000 Grd Y/40 250    | 350/600 and 350/600:1     | 350   |
| 115 000 Grd Y/69 000   | 600/1000 and 600/1000:1   | 550 or 450                                      |
| 138 000 Grd Y/80 500   | 700/1200 and 700/1200:1   | 650 or 550                                      |
| 161 000 Grd Y/92 000   | 800/1400 and 800/1400:1   | 750 or 650                                      |
| 230 000 Grd Y/138 000  | 1200/2000 and 1200/2000:1 | 1050 or 900                                     |
| 345 000 Grd Y/207 000* | 1800/3000 and 1800/3000:1 | 1300 or 1175                                    |
| 500 000 Grd Y/287 500* | 2500/4500 and 2500/4500:1 | 1800 or 1675                                    |
| 750 000 Grd Y/431 250* | 3750/6250 and 3750/6250:1 | 2050  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 45 Ratings and Characteristics of Group 4 Indoor Voltage Transformers. Ref.

IEEE Std. C57.13-1993, Table 13

| Rated Primary Voltage for<br>Rated Voltage Line-to-Line<br>(V)           | Marked<br>Ratio | Basic Impulse<br>insulation Level<br>(kV Crest) |
|--|-----------------|---|
| Group 4A: For Operation at Approximately<br>100 Percent of Rated Voltage |                 |   |
| 4160 Grd Y/2400  | 20:1            | 60  |
| 7200 Grd Y/4200  | 35:1            | 75  |
| 8320 Grd Y/4800  | 40:1            | 75  |
| 12 470 Grd Y/7200  | 60:1            | 110 or 95                                       |
| 14 560 Grd Y/8400  | 70:1            | 110 or 95                                       |
| Group 4B: For Operation at Approximately<br>58 Percent of Rated Voltage  |                 |   |
| 4160 Grd Y/4200  | 35:1            | 60  |
| 4800 Grd Y/4800  | 40:1            | 60  |
| 7200 Grd Y/7200  | 60:1            | 75  |
| 12 000 Grd Y/12 000  | 100:1           | 110 or 95                                       |
| 14 400 Grd Y/14 400  | 120:1           | 110 or 95                                       |

ตาราง 46 Ratings and Characteristics of Group 5 Outdoor Voltage Transformers. Ref.

IEEE Std. C57.13-1993, Table 14

| Rated Primary Voltage for<br>Rated Voltage Line-to-Line<br>(V) | Marked<br>Ratio | Basic Impulse<br>Insulation Level<br>(kV Crest) |
|--|-----------------|---|
| 7200 for 12 470 Gnd Y  | 60:1            | 110   |
| 8400 for 14 560 Gnd Y  | 70:1            | 110   |
| 12 000 for 20 800 Gnd Y  | 100:1           | 150 or 125                                      |
| 14 400 for 25 000 Gnd Y  | 120:1           | 150 or 125                                      |
| 20 125 for 34 500 Gnd Y  | 175:1           | 200 or 150                                      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 8 Capacitor Voltage Transformer (115kV) ของบริษัท ABB

ตาราง 47 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ Capacitor Voltage transformer (115kV)

|  |                              |
|--|------------------------------|
| System voltages:                           | 72 - 800 kV                  |
| Insulation level:                          | up to 680/1550 (975/2100) kV |
| <b>Rated voltage factors:</b>              |                              |
| Isolated neutral:                          | 1.2 continuously and 1.9/8h  |
| Directly earthed neutral:                  | 1.2 continuously and 1.5/30s |
| <b>Rated burdens and accuracy classes:</b> |                              |
| IEC 0.2/0.5/1.0                            | up to 120/400/400 VA         |
| IEEE 0.3/0.6/1.2                           | up to Z/ZZ/ZZZ               |

ที่มา : บริษัท ABB



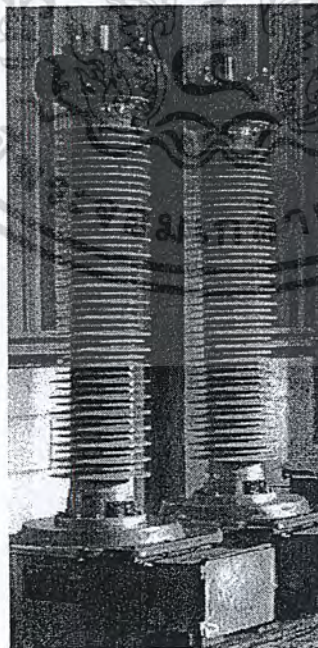
รูป 9 ANSI Indoor/Outdoor Metering/Protection Transformer Medium Voltage  
ของบริษัท ABB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 48 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ ANSI Indoor/Outdoor Metering/Protection Transformer  
Medium Voltage

| Primary Voltage       | Secondary Voltage | Winding Ratio   | Thermal Rating (VA) | Rated Voltage Factor | Frequency (Hz) | Style Number     |                  |                  |
|-----------------------|-------------------|-----------------|---------------------|----------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
|                       |                   |                 |                     |                      |                | Stud Terminal    | Double Secondary | Clamp Terminal   |
| MZZ-15 (two bushings) |                   |                 |                     |                      |                |                  |                  |                  |
|                       |                   |                 |                     |                      |                | Single Secondary | Double Secondary | Single Secondary |
| 12000/20800Y          | 120               | 100:1           | 3000                | 1.1                  | 60             | 7525A81G01       | 7526A47G02       | 7525A82G01       |
| 14400/24940Y          | 120               | 120 & 120:1     | 3000                | 1.1                  | 60             | 7525A81G02       | -                | 7525A82G02       |
| 14400/24940Y          | 120               | 120:1           | 3000                | 1.1                  | 60             | -                | 7526A47G03       | -                |
| 14400/24940Y          | 72                | 200:1           | 1500                | 1.1                  | 60             | 7525A81G10       | -                | -                |
| 14400/24940Y          | 72                | 200:1           | 3000                | 1.1                  | 60             | 7525A81G27       | -                | -                |
| 14400/24940Y          | 72                | 200 & 200:1     | 3000                | 1.1                  | 60             | -                | 7526A47G09       | -                |
| 15600/15600Y          | 120               | 130:1           | 3000                | 1.1                  | 60             | 7525A81G12       | -                | -                |
| 16000/18000Y          | 120               | 133.33:1        | 3000/1500           | 1.1                  | 60             | 7525A81G19       | -                | -                |
| 18000/18000Y          | 120               | 150 & 150:1     | 3000                | 1.1                  | 60             | 7525A81G03       | 7526A47G04       | 7525A82G03       |
| 19200/19200Y          | 120               | 160:1           | 3000                | 1.1                  | 60             | 7525A81G14       | -                | -                |
| 20000/20000Y          | 120               | 166.67:1        | 3000                | 1.1                  | 60             | 7525A81G05       | -                | -                |
| 20000/20000Y          | 100               | 200:1           | 1750/1000           | 1.1                  | 60             | 7525A81G28       | -                | -                |
| 20000/20000Y          | 100               | 200 & 200:1     | 1750                | 1.1                  | 50             | 7525A81G16       | 7526A47G07       | -                |
| 21000/21000Y          | 120               | 175:1           | 3000                | 1.1                  | 60             | 7525A81G21       | -                | -                |
| 21000/21000Y          | 100               | 210:1           | 3000/1500           | 1.1                  | 50             | 7525A81G20       | -                | -                |
| 21600/21600Y          | 120               | 180:1           | 3000                | 1.1                  | 60             | 7525A81G07       | -                | -                |
| 22000/22000Y          | 120               | 183.3 & 183.3:1 | 3000                | 1.1                  | 60             | -                | 7526A47G06       | -                |
| 22000/22000Y          | 120               | 183.3 & 183.3:1 | 3000                | 1.1                  | 60             | 7525A81G13       | 7526A47G01       | -                |
| 22000/22000Y          | 115               | 191.3:1         | 3000                | 1.1                  | 60             | 7525A81G17       | -                | -                |
| 22800/22800Y          | 120               | 190:1           | 3000                | 1.1                  | 60             | 7525A81G08       | -                | -                |
| 23000/23000Y          | 120               | 191.66:1        | 3000                | 1.1                  | 60             | 7525A81G29       | -                | -                |
| 23000/23000Y          | 115               | 200:1           | 2250                | 1.1                  | 50             | 7525A81G09       | -                | -                |
| 24000/24000Y          | 120               | 200 & 200:1     | 1750                | 1.1                  | 50             | 7525A81G18       | -                | -                |
| 24000/24000Y          | 120               | 200:1           | 3000                | 1.1                  | 60             | 7525A81G04       | 7526A47G05       | 7525A82G04       |
| 24000/24000Y          | 110               | 216.67:1        | 1750                | 1.1                  | 60             | 7525A81G24       | -                | -                |

ที่มา : บริษัท ABB



รูป 10 Capacitor Voltage Transformer (72.5kV~800kV) สำหรับการติดตั้งภายนอก ของ  
บริษัท Trench

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 49 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ Capacitor Voltage Transformer(72.5kV~800kV)

| Type     | ELECTRICAL CHARACTERISTICS |                        |                 |           |                        |                 |            |            | OVERALL DIMENSIONS AND WEIGHTS |       |       |       |
|----------|----------------------------|------------------------|-----------------|-----------|------------------------|-----------------|------------|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|
|          | Rated capacitance          | Highest system voltage | Test voltages   |           | Rated primary voltages | Maximum burdens |            |            | Creepage distance              |       |       |       |
|          |                            |                        | Power frequency | UWL       |                        | 0.2             | 0.5        | 1          | Standard                       | Long  | H (") | Total |
|          | pF                         | kV (r.m.s.)            | kV (r.m.s.)     | kV (peak) | kV                     | VA              |            |            | mm                             |       |       |       |
|          |                            |                        |                 |           |                        |                 |            |            |                                |       |       |       |
| TCVT 72  | 12000<br>24000             | 72.5                   | 140             | 325       | 60√3<br>66√3           | 75<br>150       | 200<br>300 | 400<br>600 | 1813                           | 2248  | 1530  | 195   |
| TCVT 123 | 8000<br>16000              | 123                    | 230             | 550       | 110√3<br>115√3         | 75<br>150       | 250<br>350 | 500<br>700 | 3075                           | 3815  | 1830  | 215   |
| TCVT 145 | 4000<br>12000              | 145                    | 275             | 650       | 130√3<br>132√3         | 50<br>100       | 150<br>300 | 300<br>600 | 3625                           | 4495  | 2025  | 225   |
| TCVT 170 | 4000<br>10000              | 170                    | 325             | 750       | 150√3                  | 50<br>100       | 150<br>250 | 500<br>500 | 4250                           | 5270  | 2240  | 240   |
| TCVT 245 | 4000<br>8000               | 245                    | 460             | 1050      | 220√3<br>230√3         | 75<br>150       | 200<br>350 | 400<br>700 | 6125                           | 7595  | 2805  | 275   |
| TCVT 362 | 4000<br>8000               | 362                    | 510             | 1175      | 330√3                  | 100<br>150      | 250<br>350 | 500<br>700 | 9050                           | 11222 | 3650  | 360   |
| TCVT 420 | 4000<br>8000               | 420                    | 630             | 1425      | 380√3<br>400√3         | 100<br>150      | 300<br>350 | 600<br>700 | 10500                          | 13020 | 4285  | 415   |
| TCVT 550 | 4000<br>8000               | 525 (550)              | 680             | 1550      | 500√3                  | 150<br>200      | 350<br>450 | 700<br>800 | 13125                          | 16275 | 5000  | 430   |
| TCVT 800 | Data supplied on request   |                        |                 |           |                        |                 |            |            |                                |       |       |       |

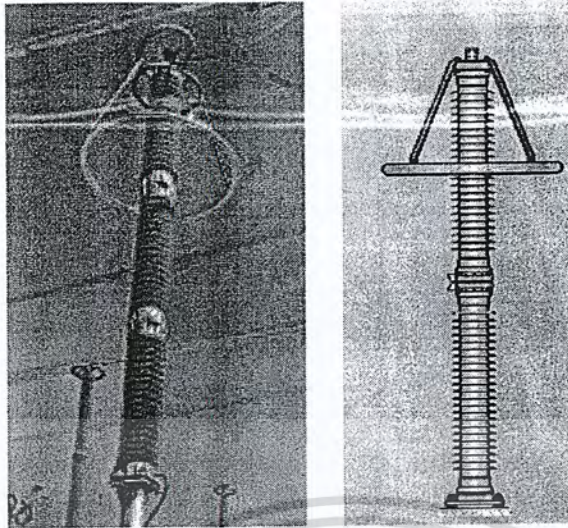
ที่มา : บริษัท Trench

ตาราง 50 แสดงค่า  $U_r$  เมื่อเทียบกับค่า Nominal System voltage ของ Arrester

| Nominal system voltage(kV) | Phase arrester(kV)<br>$U_r$<br>for $C_E = 1.4$ | Phase arrester(kV)<br>$U_r$<br>for $C_E = \sqrt{3}$ | Neutral arrester(kV)<br>$U_r$<br>for $C_E = 1.4$ | Neutral arrester(kV)<br>$U_r$<br>for $C_E = \sqrt{3}$ |
|----------------------------|--|---|--|---|
| 6                          | 6  | 9   | -  | -   |
| 10                         | 12   | 15  | -  | -   |
| 20                         | 21   | 30  | -  | -   |
| 30                         | 30   | 45  | -  | -   |
| 66                         | 60   | 90  | -  | -   |
| 110                        | 96   | 150   | 72   | 90  |
| 138                        | 120  | -   | 84   | -   |
| 220                        | 192  | -   | 90   | -   |
| 345                        | 276  | -   | 132  | -   |
| 380                        | 330  | -   | 150  | -   |
| 500                        | 420  | -   | 192  | -   |

 $C_E = 1.4$  สำหรับระบบที่มีการต่อลงดิน $C_E = \sqrt{3}$  สำหรับระบบที่ไม่มีการต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก-11 Surge Arrester Class 3EQ ของบริษัท SIEMEN

ตาราง 51 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ Surge arrester Class3EQ

| Duty cycle voltage | MCOV | TOV capability | Protective level          |        |                       |      |       |      |       |       |                        |       |      |                     | Catalog number |
|--------------------|------|----------------|---------------------------|--------|-----------------------|------|-------|------|-------|-------|------------------------|-------|------|---------------------|----------------|
|                    |      |                | Maximum discharge voltage |        |                       |      |       |      |       |       |                        |       |      |                     |                |
|                    |      |                | for 0.1 s                 |        | for 8/20 μs (impulse) |      |       |      |       |       | for 45/90 μs (impulse) |       |      |                     |                |
| [kV]               | [kV] | [kV]           | [kV]                      | 1.5 kA | 3 kA                  | 5 kA | 10 kA | 5 kA | 20 kA | 10 kA | 500 A                  | 10 kA | 2 kA |                     |                |
| 30                 | 24.4 | 38             | 87.5                      | 67.6   | 70.8                  | 73.5 | 79.5  | 85.1 | 89.0  | 102   | 61.2                   | 63.6  | 66.8 | 3EQ1 030-1PB21-4NH5 |                |
| 36                 | 29.0 | 45             | 105                       | 81.1   | 84.9                  | 88.7 | 95.4  | 102  | 107   | 122   | 73.5                   | 76.3  | 80.1 | 3EQ1 036-1PB21-4NH5 |                |
| 39                 | 31.5 | 49             | 113                       | 87.6   | 91.7                  | 95.8 | 103   | 110  | 115   | 132   | 79.3                   | 82.4  | 86.5 | 3EQ1 039-1PB21-4NH5 |                |
| 45                 | 36.5 | 57             | 119                       | 92.9   | 97.2                  | 102  | 108   | 114  | 120   | 136   | 86.4                   | 88.6  | 92.9 | 3EQ1 045-2PB31-4NH5 |                |
| 48                 | 39   | 61             | 127                       | 98.5   | 104                   | 109  | 115   | 122  | 128   | 145   | 92.0                   | 94.3  | 98.9 | 3EQ1 048-2PB31-4NH5 |                |
| 54                 | 42   | 66             | 143                       | 112    | 117                   | 122  | 130   | 138  | 144   | 164   | 104                    | 107   | 112  | 3EQ1 054-2PB31-4NH5 |                |
| 60                 | 48   | 75             | 158                       | 124    | 130                   | 135  | 144   | 153  | 160   | 181   | 115                    | 118   | 124  | 3EQ1 060-2PB31-4NH5 |                |
| 72                 | 57   | 89             | 190                       | 149    | 156                   | 163  | 173   | 183  | 192   | 219   | 138                    | 142   | 149  | 3EQ1 072-2PB31-4NH5 |                |
| 90                 | 70   | 109            | 238                       | 186    | 194                   | 203  | 216   | 229  | 240   | 272   | 173                    | 177   | 186  | 3EQ1 090-2PE31-4NH5 |                |
| 96                 | 76   | 119            | 253                       | 198    | 207                   | 216  | 230   | 244  | 255   | 290   | 184                    | 189   | 198  | 3EQ1 096-2PE31-4NH5 |                |
| 108                | 84   | 131            | 265                       | 223    | 233                   | 243  | 259   | 275  | 287   | 326   | 207                    | 212   | 223  | 3EQ1 108-2PJ31-4NH5 |                |
| 111                | 88   | 137            | 293                       | 229    | 239                   | 250  | 266   | 282  | 295   | 335   | 213                    | 218   | 229  | 3EQ1 111-2PJ31-4NH5 |                |
| 120                | 98   | 153            | 325                       | 254    | 266                   | 277  | 295   | 313  | 327   | 372   | 236                    | 242   | 254  | 3EQ1 120-2PJ31-4NH5 |                |
| 132                | 106  | 165            | 349                       | 273    | 285                   | 299  | 317   | 336  | 352   | 399   | 254                    | 260   | 273  | 3EQ1 132-2PP31-4NH5 |                |
| 144                | 115  | 179            | 381                       | 298    | 311                   | 325  | 346   | 367  | 384   | 436   | 277                    | 284   | 298  | 3EQ1 144-2PP31-4NH5 |                |

ที่มา : บริษัท SIEMEN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก-12 แสดงโครงสร้างของ Surge Arrester รุ่น PEXLIM Q ของบริษัท ABB

ตาราง 52 แสดงข้อมูลของ Surge Arrester รุ่น PEXLIM Q

| Max. system voltage | Rated voltage     | Max. continuous operating voltage <sup>1</sup> |                   | TOV capability <sup>2</sup> |                   | Max. residual voltage with current wave |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|---------------------|-------------------|--|-------------------|-----------------------------|-------------------|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                     |                   | as per IEC                                     | as per ANSI/IEEE  | 1 s                         | 10 s              | 30/80 μs                                |                    | 8/20 μs            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|                     |                   |  |                   |                             |                   | 0.5 kA                                  | 1 kA               | 2 kA               | 5 kA               | 10 kA              | 20 kA              | 40 kA              |                    |                    |                    |                    |
| U <sub>m</sub>      | U <sub>r</sub>    | U <sub>c</sub>                                 | MCOV              |                             |                   |   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| kV <sub>rms</sub>   | kV <sub>rms</sub> | kV <sub>rms</sub>                              | kV <sub>rms</sub> | kV <sub>rms</sub>           | kV <sub>rms</sub> | kV <sub>peak</sub>                      | kV <sub>peak</sub> | kV <sub>peak</sub> | kV <sub>peak</sub> | kV <sub>peak</sub> | kV <sub>peak</sub> | kV <sub>peak</sub> | kV <sub>peak</sub> | kV <sub>peak</sub> | kV <sub>peak</sub> | kV <sub>peak</sub> |
| 24 <sup>3</sup>     | 24                | 19.2   | 19.4              | 27.6                        | 28.4              | 46.1                                    | 47.6               | 49.5               | 53.6               | 56.4               | 62.1               | 63.4               |                    |                    |                    |                    |
| 36 <sup>3</sup>     | 30                | 24.0   | 24.4              | 34.5                        | 35.0              | 57.6                                    | 59.5               | 61.9               | 67.0               | 70.5               | 77.6               | 78.8               |                    |                    |                    |                    |
|                     | 36                | 28.8   | 29.0              | 41.4                        | 39.6              | 69.2                                    | 71.4               | 74.2               | 80.4               | 84.6               | 92.1               | 105                |                    |                    |                    |                    |
| 52                  | 42                | 34   | 34.0              | 48.3                        | 46.2              | 80.7                                    | 83.3               | 86.5               | 93.9               | 98.7               | 106                | 122                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 48                | 36   | 39.0              | 55.2                        | 52.6              | 92.2                                    | 95.1               | 98.9               | 106                | 113                | 125                | 139                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 51                | 41   | 41.3              | 58.6                        | 56.1              | 99.0                                    | 102                | 105                | 114                | 120                | 132                | 146                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 64                | 49   | 49.0              | 62.1                        | 59.4              | 104                                     | 107                | 112                | 121                | 127                | 140                | 157                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 60                | 48   | 48.0              | 69.0                        | 66.0              | 116                                     | 119                | 124                | 134                | 141                | 156                | 174                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 72                | 58   | 58.0              | 82.8                        | 79.2              | 139                                     | 143                | 149                | 161                | 170                | 187                | 209                |                    |                    |                    |                    |
| 72                  | 54                | 43   | 43.0              | 62.1                        | 59.4              | 104                                     | 107                | 112                | 121                | 127                | 140                | 157                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 60                | 48   | 48.0              | 69.0                        | 66.0              | 116                                     | 119                | 124                | 134                | 141                | 156                | 174                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 66                | 53   | 53.4              | 75.9                        | 72.6              | 127                                     | 131                | 136                | 148                | 156                | 171                | 191                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 72                | 58   | 58.0              | 82.8                        | 79.2              | 139                                     | 143                | 149                | 161                | 170                | 187                | 209                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 75                | 60   | 60.7              | 86.2                        | 82.5              | 144                                     | 149                | 155                | 168                | 177                | 194                | 217                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 78                | 62   | 63.1              | 89.7                        | 85.8              | 150                                     | 155                | 161                | 175                | 184                | 202                | 226                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 81                | 65   | 65.6              | 93.1                        | 89.1              | 156                                     | 161                | 167                | 181                | 191                | 210                | 235                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 84                | 67   | 68.0              | 96.6                        | 92.4              | 162                                     | 167                | 173                | 188                | 198                | 218                | 243                |                    |                    |                    |                    |
| 100                 | 75                | 59   | 60.7              | 86.2                        | 82.5              | 144                                     | 149                | 155                | 168                | 177                | 194                | 217                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 78                | 61   | 63.1              | 89.7                        | 85.8              | 150                                     | 155                | 161                | 175                | 184                | 202                | 226                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 84                | 65   | 66.0              | 96.6                        | 92.4              | 162                                     | 167                | 173                | 188                | 198                | 218                | 243                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 90                | 69   | 72.0              | 103                         | 99.0              | 173                                     | 179                | 186                | 201                | 212                | 233                | 261                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 96                | 74   | 77.0              | 110                         | 105               | 185                                     | 191                | 198                | 215                | 226                | 249                | 278                |                    |                    |                    |                    |
| 123                 | 90                | 72   | 72.0              | 103                         | 99.0              | 173                                     | 179                | 186                | 201                | 212                | 233                | 261                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 96                | 77   | 77.0              | 110                         | 105               | 185                                     | 191                | 198                | 215                | 226                | 249                | 278                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 102               | 78   | 82.8              | 117                         | 112               | 196                                     | 203                | 210                | 225                | 240                | 264                | 295                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 108               | 78   | 84.0              | 124                         | 118               | 208                                     | 214                | 223                | 242                | 254                | 280                | 313                |                    |                    |                    |                    |
|                     | 120               | 78   | 88.0              | 136                         | 132               | 231                                     | 238                | 248                | 268                | 282                | 311                | 347                |                    |                    |                    |                    |

ที่มา : บริษัท ABB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 53 Protective Characteristics of Gapped Silicon-Carbide Distribution Arresters. Ref. ANSI/IEEE C62.2-1987, Table A3.

| Voltage Rating of Arrester (kV rms) | Impulse Sparkover Voltage                  |                      |                   |                      |                   |                                       | Discharge Voltage for 8/20- $\mu$ s Discharge Current Wave |                                       |   |   |  |
|-------------------------------------|--|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|---|---|--|
|                                     | Rate of Rise of Test Voltage (kV/ $\mu$ s) | Front-of-Wave        |                   | 1.2/50 $\mu$ s       |                   | kV Crest for 1500 A (Range of Maxima) | kV Crest for 3000 A (Range of Maxima)                      | kV Crest for 5000 A (Range of Maxima) | kV Crest for 10 000 A (Range of Maxima) | kV Crest for 20 000 A (Range of Maxima) |  |
|                                     |  | Without External Gap | With External Gap | Without External Gap | With External Gap |                                       |  |                                       |   |   |  |
| 3                                   | 25   | 14-25                | 24-38             | 12-22                | 24-37             | 8-10                                  | 8.6-11.3   | 10-12.4                               | 11.5-13.8                               | 13.5-15.7                               |  |
| 6                                   | 50   | 27-55                | 45-57             | 23-33                | 35-55             | 16-20                                 | 17-23  | 20-24                                 | 22.5-26                                 | 25-30                                   |  |
| 9                                   | 75   | 39-48                | 60-76             | 34-45                | 48-65             | 24-30                                 | 25-34  | 29-36.5                               | 32.5-41                                 | 36-52                                   |  |
| 10                                  | 83.2                                       | 40-48                | 62-76             | 35-49                | 48-67             | 25-30                                 | 27.5-34  | 29.5-37                               | 32.5-44                                 | 36-52                                   |  |
| 12                                  | 100  | 49-60                | 73-96             | 44-57                | 59-85             | 32-40                                 | 34-46  | 39-48                                 | 43-53                                   | 49-61.5                                 |  |
| 15                                  | 125  | 47-75                | 80-115            | 49-65                | 69-100            | 40-50                                 | 42-55  | 39-60                                 | 54-65.5                                 | 60-76                                   |  |
| 18                                  | 150  | 55-90                | 96-123            | 58-76                | 79-118            | 48-60                                 | 51-66  | 46-72                                 | 65-78                                   | 71-91                                   |  |
| 21                                  | 175  | 63-90                | 110-139           | 66-78                | -123              | 56-70                                 | 59-75  | 68-80.5                               | 73-90                                   | 82-103                                  |  |
| 27                                  | 225  | 79-102               | -                 | 75-98                | -                 | 70-80                                 | 76-86  | 82-94                                 | 90-105                                  | 99-121                                  |  |
| 30                                  | 250  | 86-114               | -                 | 81-100               | -                 | 76-89                                 | 84-97  | 91-105                                | 100-116                                 | 111-134                                 |  |

ตาราง 54 Protective Characteristics of Gapped Silicon-Carbide Intermediate Valve Arresters. Ref. ANSI/IEEE C62.2-1987, Table A2

| Voltage Rating of Arrester (kV rms) | Impulse Sparkover Voltage                  |                      |                   |                      | Switching Surge Sparkover Voltage (kV Crest (Range of Maxima)) | Discharge Voltage for 8/20- $\mu$ s Discharge Current Wave |                                       |                                       |   |   |                   |
|-------------------------------------|--|----------------------|-------------------|----------------------|--|--|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---|-------------------|
|                                     | Rate of Rise of Test Voltage (kV/ $\mu$ s) | Front-of-Wave        |                   | 1.2/50- $\mu$ s      |  | kV Crest for 1500 A (Range of Maxima)                      | kV Crest for 3000 A (Range of Maxima) | kV Crest for 5000 A (Range of Maxima) | kV Crest for 10 000 A (Range of Maxima) | kV Crest for 20 000 A (Range of Maxima) |                   |
|                                     |  | Without External Gap | With External Gap | Without External Gap |  |  |                                       |                                       |   |   | With External Gap |
| 3                                   | 25   | 11-12                | 21-12             | -                    | 5.2-7.5  | 6-8  | 6.6-9                                 | 7.5-10                                | 8.7-12                                  |   |                   |
| 6                                   | 50   | 21-21                | 19-19             | -                    | 10.4-13.5  | 11.9-14  | 13.2-15.5                             | 15-17.5                               | 17.4-20                                 |   |                   |
| 9                                   | 75   | 31-33                | 27.5-32           | -                    | 15.6-21  | 17.9-23  | 19.8-25                               | 22.5-28                               | 26.1-31                                 |   |                   |
| 12                                  | 100  | 38-42                | 35.5-37           | -                    | 20.8-27  | 23.8-29  | 26.4-32                               | 30-34                                 | 34.8-37.5                               |   |                   |
| 15                                  | 125  | 47-51                | 43.5-46.5         | -                    | 25.9-34  | 29.7-36.5  | 32.9-39.5                             | 37.5-43                               | 43.5-47.5                               |   |                   |
| 21                                  | 175  | 67-73                | 58-64             | -                    | 36.3-47.5  | 41.6-51  | 46.1-56                               | 52.5-60                               | 60.9-66                                 |   |                   |
| 24                                  | 200  | 75-78                | 66-75             | -                    | 41.5-54  | 47.6-58  | 52.7-64                               | 60-68                                 | 69.6-75                                 |   |                   |
| 30                                  | 250  | 91-97                | 81-91             | -                    | 51.8-68  | 59.4-73  | 65.8-79                               | 75-86                                 | 87-95                                   |   |                   |
| 36                                  | 300  | 108-116              | 95-103            | -                    | 62.2-82  | 71.3-87  | 79-95                                 | 90-102                                | 104-113                                 |   |                   |
| 39                                  | 325  | 116-126              | 102-110           | -                    | 67.4-91  | 77.3-97  | 85.5-106                              | 97.5-114                              | 112-126                                 |   |                   |
| 48                                  | 400  | 142-154              | 121-132           | -                    | 83-109   | 95-116   | 105-127                               | 120-136                               | 139-150                                 |   |                   |
| 60                                  | 500  | 166-190              | 147-155           | 185-206              | 104-136  | 119-145  | 131-159                               | 150-171                               | 174-189                                 |   |                   |
| 72                                  | 600  | 201-230              | 171-191           | 219-245              | 124-163  | 143-174  | 158-191                               | 180-204                               | 209-225                                 |   |                   |
| 90                                  | 750  | 250-283              | 223-233           | 274-304              | 155-204  | 178-218  | 197-239                               | 225-256                               | 261-282                                 |   |                   |
| 96                                  | 800  | 268-300              | 236-250           | 292-323              | 166-217  | 190-232  | 211-254                               | 240-273                               | 278-300                                 |   |                   |
| 108                                 | 900  | 283-315              | 258-265           | 328-362              | 187-244  | 214-261  | 237-286                               | 270-307                               | 313-338                                 |   |                   |
| 120                                 | 1000                                       | 299-370              | 276-295           | 351-400              | 207-272  | 238-290  | 263-319                               | 300-328                               | 348-380                                 |   |                   |

ตาราง 55 Protective Characteristics of Gapped Silicon-Carbide Intermediate Valve Arresters. Ref. ANSI/IEEE C62.2-1987, Table A2

| Voltage Rating of Arrester (kV rms) | Impulse Sparkover Voltage                  |                      |                   |                      | Switching Surge Sparkover Voltage (kV Crest (Range of Maxima)) | Discharge Voltage for 8/20- $\mu$ s Discharge Current Wave |                                       |                                       |   |   |                   |
|-------------------------------------|--|----------------------|-------------------|----------------------|--|--|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---|-------------------|
|                                     | Rate of Rise of Test Voltage (kV/ $\mu$ s) | Front-of-Wave        |                   | 1.2/50- $\mu$ s      |  | kV Crest for 1500 A (Range of Maxima)                      | kV Crest for 3000 A (Range of Maxima) | kV Crest for 5000 A (Range of Maxima) | kV Crest for 10 000 A (Range of Maxima) | kV Crest for 20 000 A (Range of Maxima) |                   |
|                                     |  | Without External Gap | With External Gap | Without External Gap |  |  |                                       |                                       |   |   | With External Gap |
| 3                                   | 25   | 11-12                | 21-12             | -                    | 5.2-7.5  | 6-8  | 6.6-9                                 | 7.5-10                                | 8.7-12                                  |   |                   |
| 6                                   | 50   | 21-21                | 19-19             | -                    | 10.4-13.5  | 11.9-14  | 13.2-15.5                             | 15-17.5                               | 17.4-20                                 |   |                   |
| 9                                   | 75   | 31-33                | 27.5-32           | -                    | 15.6-21  | 17.9-23  | 19.8-25                               | 22.5-28                               | 26.1-31                                 |   |                   |
| 12                                  | 100  | 38-42                | 35.5-37           | -                    | 20.8-27  | 23.8-29  | 26.4-32                               | 30-34                                 | 34.8-37.5                               |   |                   |
| 15                                  | 125  | 47-51                | 43.5-46.5         | -                    | 25.9-34  | 29.7-36.5  | 32.9-39.5                             | 37.5-43                               | 43.5-47.5                               |   |                   |
| 21                                  | 175  | 67-73                | 58-64             | -                    | 36.3-47.5  | 41.6-51  | 46.1-56                               | 52.5-60                               | 60.9-66                                 |   |                   |
| 24                                  | 200  | 75-78                | 66-75             | -                    | 41.5-54  | 47.6-58  | 52.7-64                               | 60-68                                 | 69.6-75                                 |   |                   |
| 30                                  | 250  | 91-97                | 81-91             | -                    | 51.8-68  | 59.4-73  | 65.8-79                               | 75-86                                 | 87-95                                   |   |                   |
| 36                                  | 300  | 108-116              | 95-103            | -                    | 62.2-82  | 71.3-87  | 79-95                                 | 90-102                                | 104-113                                 |   |                   |
| 39                                  | 325  | 116-126              | 102-110           | -                    | 67.4-91  | 77.3-97  | 85.5-106                              | 97.5-114                              | 112-126                                 |   |                   |
| 48                                  | 400  | 142-154              | 121-132           | -                    | 83-109   | 95-116   | 105-127                               | 120-136                               | 139-150                                 |   |                   |
| 60                                  | 500  | 166-190              | 147-155           | 185-206              | 104-136  | 119-145  | 131-159                               | 150-171                               | 174-189                                 |   |                   |
| 72                                  | 600  | 201-230              | 171-191           | 219-245              | 124-163  | 143-174  | 158-191                               | 180-204                               | 209-225                                 |   |                   |
| 90                                  | 750  | 250-283              | 223-233           | 274-304              | 155-204  | 178-218  | 197-239                               | 225-256                               | 261-282                                 |   |                   |
| 96                                  | 800  | 268-300              | 236-250           | 292-323              | 166-217  | 190-232  | 211-254                               | 240-273                               | 278-300                                 |   |                   |
| 108                                 | 900  | 283-315              | 258-265           | 328-362              | 187-244  | 214-261  | 237-286                               | 270-307                               | 313-338                                 |   |                   |
| 120                                 | 1000                                       | 299-370              | 276-295           | 351-400              | 207-272  | 238-290  | 263-319                               | 300-328                               | 348-380                                 |   |                   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 56 Protective Characteristics of Gapped Silicon-Carbide Station Arresters. Ref. ANSI/IEEE C62.2-1987, Table A1

| Voltage Rating of Arrester (kV rms) | Temporary Sparkover Voltage       |                            |                             | Switching Surge Spikes Voltage (Range of Maxima) | Discharge Voltage for 8/20-μs Discharge Current Wave |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|                                     | Front-of-Wave                     |                            | 1.2/50-μs (Range of Maxima) |  | kV Crest for 1500A (Range of Maxima)                 | kV Crest for 3000A (Range of Maxima) | kV Crest for 5000A (Range of Maxima) | kV Crest for 1000A (Range of Maxima) | kV Crest for 2000A (Range of Maxima) | kV Crest for 4000A (Range of Maxima) |
|                                     | Rate of Rise Test Voltage (kV/μs) | kV Crest (Range of Maxima) |                             |  |  |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 3                                   | 25                                | 10-18                      | 10-14                       | -  | 4.7-6  | 5.3-6.5                              | 6.7                                  | 6.7-7.5                              | 7.7-8.3                              | 9.2                                  |
| 6                                   | 50                                | 19-28                      | 16-23                       | -  | 9.2-11   | 10-12                                | 11.9-13                              | 13.4-14.3                            | 15.3-16.5                            | 18.5                                 |
| 9                                   | 75                                | 28.5-38                    | 24-31                       | -  | 13.9-17  | 16-18                                | 17.8-19                              | 20.2-21.5                            | 22.9-24.5                            | 28                                   |
| 12                                  | 100                               | 36-48                      | 32-41                       | -  | 18.5-22  | 21.3-24                              | 23.5-25.5                            | 26.7-28.5                            | 30.1-32.1                            | 37                                   |
| 15                                  | 125                               | 45-57                      | 40-51                       | -  | 23.1-27.5  | 26.6-30                              | 29.5-32                              | 33.4-36                              | 38.2-40                              | 46                                   |
| 21                                  | 175                               | 63-76                      | 54-68                       | -  | 32.3-38.5  | 37.2-42                              | 41.4-45                              | 46.8-50                              | 53.4-55.5                            | 65                                   |
| 24                                  | 200                               | 71-86                      | 62-77                       | -  | 36.9-44  | 42.6-48                              | 47.5-51                              | 53.4-57                              | 61-63.5                              | 74                                   |
| 30                                  | 250                               | 89-105                     | 77-93                       | -  | 46.1-55  | 53.1-60                              | 59.64                                | 66.9-72                              | 76.3-79                              | 92.5                                 |
| 36                                  | 300                               | 107-118                    | 92-108                      | -  | 55.2-66  | 63.7-72                              | 70.5-76                              | 80.85                                | 91.5-94.5                            | 111                                  |
| 39                                  | 325                               | 115-125                    | 100-114                     | -  | 60-71.5  | 69-78                                | 76.5-82.5                            | 86.5-92                              | 99.1-102                             | 120                                  |
| 48                                  | 400                               | 143-148                    | 122-122                     | -  | 73.8-88  | 84.9-96                              | 94-102                               | 106-114                              | 122-126                              | 148                                  |
| 60                                  | 500                               | 170-190                    | 141-165                     | 126-153  | 95-109   | 110-120                              | 118-130                              | 132-143                              | 150-158                              | 185                                  |
| 72                                  | 600                               | 204-226                    | 169-190                     | 162-178  | 114-131  | 130-144                              | 141-155                              | 159-170                              | 180-189                              | 222                                  |
| 90                                  | 750                               | 254-275                    | 210-235                     | 205-215  | 142-163  | 162-180                              | 176-194                              | 199-213                              | 225-237                              | 277                                  |
| 96                                  | 800                               | 270-295                    | 218-245                     | 218-225  | 151-174  | 173-192                              | 188-218                              | 212-227                              | 240-255                              | 296                                  |
| 108                                 | 900                               | 304-325                    | 245-270                     | 245-250  | 170-196  | 194-216                              | 212-245                              | 238-256                              | 270-284                              | 333                                  |
| 120                                 | 1000                              | 338-360                    | 272-300                     | 272-275  | 188-218  | 216-240                              | 235-272                              | 268-285                              | 300-319                              | 370                                  |
| 144                                 | 1200                              | 400-430                    | 326-346                     | 325-326  | 226-262  | 260-288                              | 282-311                              | 318-342                              | 360-379                              | 444                                  |
| 168                                 | 1400                              | 460-525                    | 380-404                     | 380-381  | 263-305  | 303-336                              | 329-362                              | 371-399                              | 420-442                              | 517                                  |
| 180                                 | 1500                              | 490-565                    | 400-450                     | 400-410  | 281-327  | 324-360                              | 353-388                              | 397-427                              | 450-495                              | 554                                  |
| 192                                 | 1600                              | 520-600                    | 427-460                     | 427-435  | 300-348  | 346-384                              | 376-414                              | 424-455                              | 480-505                              | 591                                  |
| 240                                 | 2000                              | 620-735                    | 535-577                     | 533-545  | 374-436  | 432-480                              | 470-518                              | 530-570                              | 605-630                              | 739                                  |
| 258                                 | 2000                              | 760-790                    | 575-620                     | 573-585  | 402-438  | 465-474                              | 505-515                              | 569-575                              | 650-666                              | 795                                  |
| 276                                 | 2000                              | 805-840                    | 615-664                     | 612-630  | 429-468  | 496-507                              | 540-570                              | 609-615                              | 690-714                              | 850                                  |
| 294                                 | 2000                              | 875-885                    | 653-675                     | 653-675  | 458-472  | 528-532                              | 576-595                              | 653-653                              | 735-758                              | 906                                  |
| 312                                 | 2000                              | 924-935                    | 690-750                     | 693-710  | 485-530  | 562-574                              | 611-620                              | 688-693                              | 780-805                              | 974-961                              |
| 372                                 | 2000                              | 1078-1100                  | 870-890                     | 790-830  | 552-610  | 655-680                              | 726-738                              | 809-826                              | 932-955                              | 1136-1145                            |
| 396                                 | 2000                              | 1140-1176                  | 925-950                     | 840-855  | 599-672  | 697-726                              | 751-810                              | 851-880                              | 990-1015                             | 1109-1226                            |
| 420                                 | 2000                              | 1200-1250                  | 980-1005                    | 890-940  | 634-713  | 739-770                              | 794-785                              | 881-900                              | 1010-1070                            | 1176-1294                            |
| 444                                 | 2000                              | 1265-1320                  | 1035-1055                   | 940-990  | 670-753  | 781-814                              | 866-875                              | 965-977                              | 1110-1150                            | 1243-1358                            |
| 468                                 | 2000                              | 1326-1390                  | 1090-1110                   | 997-1045   | 707-794  | 823-860                              | 913-930                              | 1018-1040                            | 1170-1200                            | 1310-1441                            |
| 492                                 | 2000                              | 1385-1425                  | 1140-1165                   | 1045-1090  | 742-830  | 865-925                              | 958-1000                             | 1070-1115                            | 1232-1290                            | 1500-1515                            |
| 540                                 | 2000                              | 1515-1555                  | 1276-1280                   | 1145-1200  | 814-890  | 940-990                              | 1032-1070                            | 1173-1195                            | 1350-1390                            | 1646-1665                            |
| 576                                 | 2000                              | 1616-1665                  | 1359-1380                   | 1225-1285  | 868-950  | 1012-1060                            | 1122-1150                            | 1251-1285                            | 1440-1480                            | 1755-1780                            |
| 612                                 | 2000                              | 1700-1765                  | 1440-1480                   | 1300-1370  | 924-1010   | 1076-1130                            | 1195-1229                            | 1320-1360                            | 1531-1580                            | 1865-1885                            |
| 648                                 | 2000                              | 1790-1865                  | 1525-1570                   | 1380-1445  | 977-1070   | 1138-1190                            | 1261-1290                            | 1461-1440                            | 1619-1670                            | 1974-1996                            |
| 684                                 | 2000                              | 1880-1960                  | 1610-1680                   | 1455-1525  | 1031-1130  | 1192-1260                            | 1331-1360                            | 1499-1520                            | 1709-1765                            | 2063-2107                            |

ตาราง 57 Metal Oxide Station- and Intermediate-Class Arrester Characteristics. Ref. IEEE C62.22-1991, Table 3

| Steady-State Operation              |                              | Station Class               |  |  |                          | Durability Characteristics (IEEE Std C62.22-1991 [9]) |                                     |  |                             |
|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|--|--------------------------|---|-------------------------------------|--|-----------------------------|
| System Voltage and Arrester Ratings |                              | Protective Levels           |  |  |                          | High-Current Withstand Crest (Amperes)                | Transmission Line Discharge (Miles) | Pressure Relief (A rms) (Symmetrical) (NOTE 2) |                             |
| Maximum System Voltage L-L (kV rms) | Minimum MCOV Rating (kV rms) | Duty Cycle Ratings (kV rms) | Range of Industry Maximum Per Unit—Crest of MCOV | 0.5 μs FOW Discharge Voltage (DV) (NOTE 1) | 8/20 μs wave DV (NOTE 1) |   |                                     |  | Switching Surge—DV (NOTE 2) |
| 4.37                                | 2.52                         | 2.55                        | 5-   | 2.32-2.48                                  | 2.10-2.20                | 1.70-1.85   | 65 000                              | 150  | 40 000-65 000               |
| 6.72                                | 5.04                         | 5.1                         | 5-9  | 2.32-2.48                                  | 1.97-2.23                | 1.70-1.85   | 65 000                              | 150  | 40 000-65 000               |
| 13.1                                | 4.56                         | 7.65                        | 9-12   | 2.32-2.48                                  | 1.79-2.23                | 1.70-1.85   | 65 000                              | 150  | 40 000-65 000               |
| 13.9                                | 8.00                         | 7.65                        | 9-15   | 2.32-2.48                                  | 1.97-2.23                | 1.70-1.85   | 65 000                              | 150  | 40 000-65 000               |
| 14.5                                | 8.57                         | 8.4                         | 10-15  | 2.32-2.48                                  | 1.97-2.23                | 1.70-1.85   | 65 000                              | 150  | 40 000-65 000               |
| 26.2                                | 15.12                        | 15.3                        | 18-27  | 2.32-2.48                                  | 1.97-2.23                | 1.70-1.85   | 65 000                              | 150  | 40 000-65 000               |
| 26.2                                | 20.92                        | 22                          | 27-36  | 2.43-2.48                                  | 1.97-2.23                | 1.70-1.85   | 65 000                              | 150  | 40 000-65 000               |
| 48.3                                | 27.89                        | 29                          | 36-48  | 2.43-2.48                                  | 1.97-2.23                | 1.70-1.85   | 65 000                              | 150  | 40 000-65 000               |
| 72.5                                | 41.86                        | 42                          | 54-72  | 2.19-2.40                                  | 1.97-2.18                | 1.64-1.84   | 65 000                              | 150  | 40 000-65 000               |
| 121                                 | 69.86                        | 70                          | 90-120   | 2.19-2.40                                  | 1.97-2.18                | 1.64-1.84   | 65 000                              | 150  | 40 000-65 000               |
| 145                                 | 83.72                        | 84                          | 104-144  | 2.19-2.39                                  | 1.97-2.17                | 1.64-1.84   | 65 000                              | 150  | 40 000-65 000               |
| 169                                 | 97.57                        | 98                          | 120-172  | 2.19-2.39                                  | 1.97-2.17                | 1.64-1.84   | 65 000                              | 175  | 40 000-65 000               |
| 242                                 | 139.72                       | 140                         | 172-240  | 2.19-2.36                                  | 1.97-2.17                | 1.64-1.84   | 65 000                              | 200  | 40 000-65 000               |
| 362                                 | 209.09                       | 209                         | 258-312  | 2.19-2.36                                  | 1.97-2.18                | 1.64-1.84   | 65 000                              | 200  | 40 000-65 000               |
| 550                                 | 317.54                       | 318                         | 396-564  | 2.01-2.25                                  | 2.01-2.25                | 1.71-1.85   | 65 000                              | 200  | 40 000-65 000               |
| 800                                 | 461.88                       | 462                         | 576-612  | 2.01-2.25                                  | 2.01-2.25                | 1.71-1.85   | 65 000                              | 200  | 40 000-65 000               |
|                                     |                              | Intermediate Class          |  |  |                          |   |                                     |  |                             |
| 4.37-169                            | 2.52-97.67                   | 2.8-9.8                     | 3-144  | 2.38-2.85                                  | 2.26-2.55                | 1.80-2.10   | 65 000                              | 100  | 16100(NOTE 3)               |

\* Voltage range A, ANSI C84.1-1989 [1].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

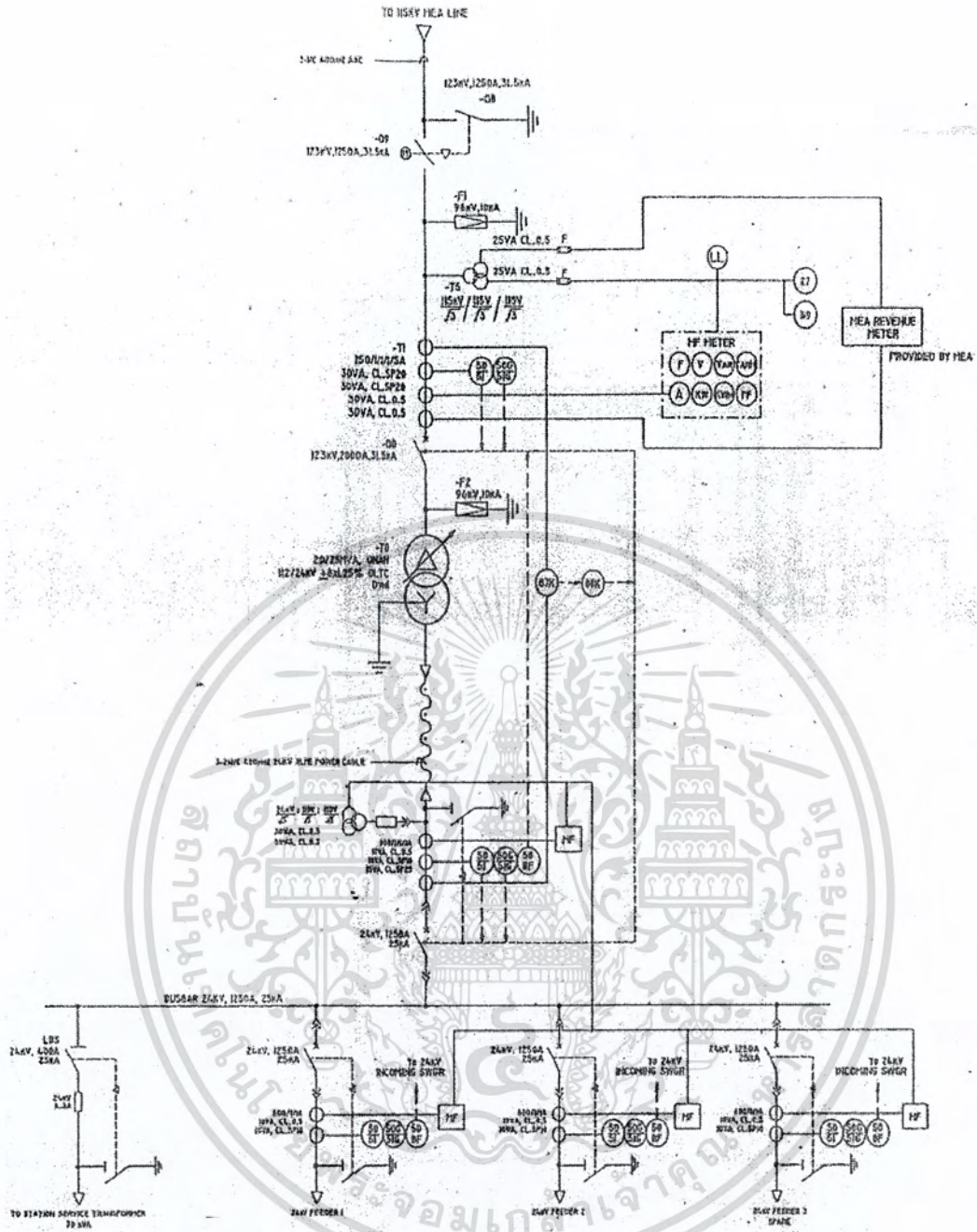
ตาราง 58 Metal Oxide Arrester Ratings in (kV) rms.Ref. IEEE C62.11-1993, Table 1.

| Duty-Cycle Voltage | MCOV  | Duty-Cycle Voltage | MCOV |
|--------------------|-------|--------------------|------|
| 3                  | 2.55  | 132                | 106  |
| 6                  | 5.10  | 144                | 115  |
| 9                  | 7.65  | 168                | 131  |
| 10                 | 8.40  | 172                | 140  |
| 12                 | 10.20 | 180                | 144  |
| 15                 | 12.70 | 192                | 152  |
| 18                 | 15.30 | 228                | 180  |
| 21                 | 17.00 | 240                | 190  |
| 24                 | 19.50 | 258                | 209  |
| 27                 | 22.00 | 264                | 212  |
| 30                 | 24.40 | 276                | 220  |
| 36                 | 29.00 | 288                | 230  |
| 39                 | 31.50 | 294                | 235  |
| 45                 | 36.50 | 312                | 245  |
| 48                 | 39.00 | 396                | 318  |
| 54                 | 42.00 | 420                | 335  |
| 60                 | 48.00 | 444                | 353  |
| 72                 | 57.00 | 468                | 372  |
| 90                 | 70.00 | 492                | 392  |
| 96                 | 76.00 | 540                | 428  |
| 108                | 84.00 | 564                | 448  |
| 120                | 98.00 | 576                | 462  |
|                    |       | 588                | 470  |
|                    |       | 612                | 485  |

ตาราง 59 Rated Insulation Levels of Metal-Clad Switchgear

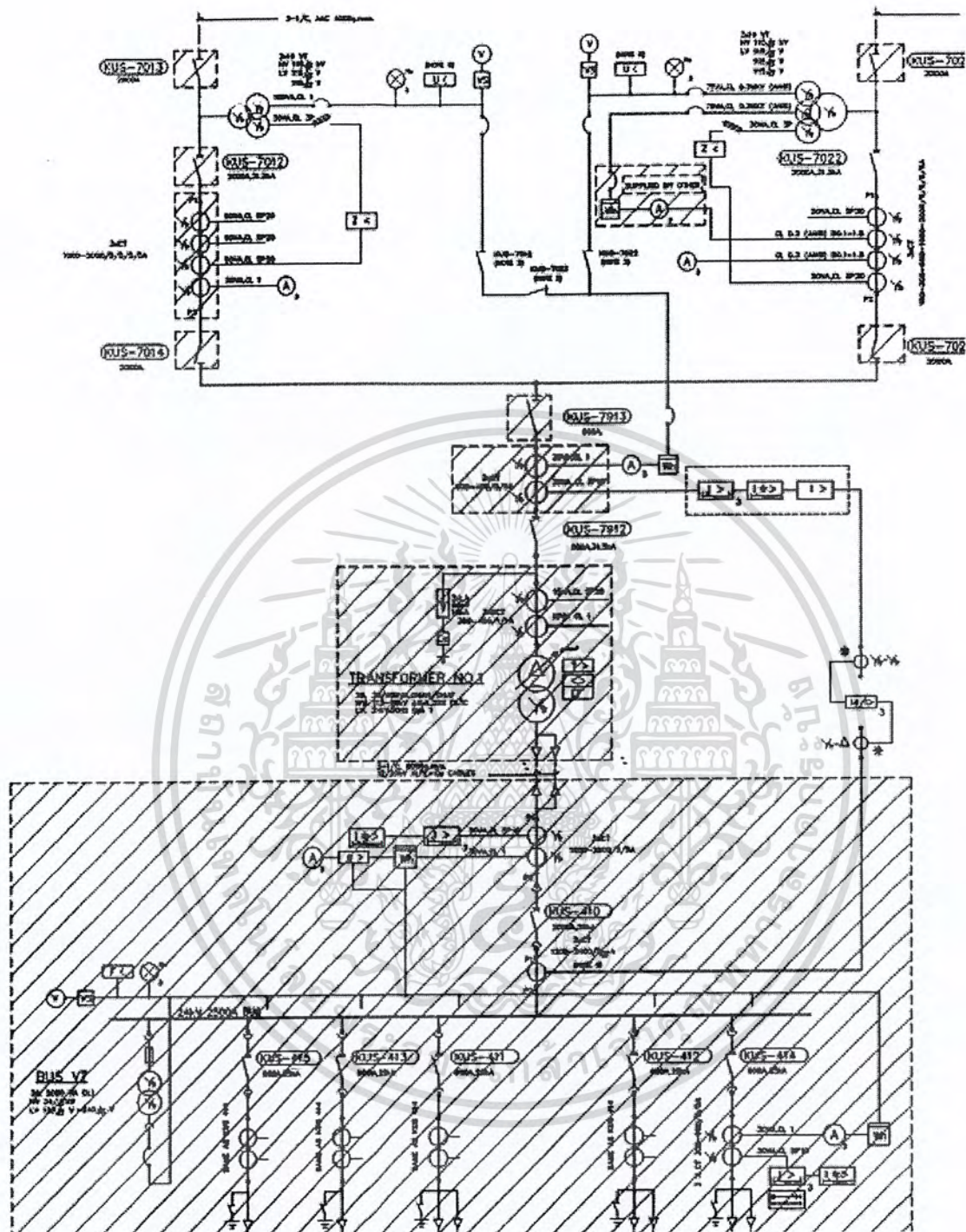
| Rated Nominal Voltage (rms) | 60 Hz, 1 Min Withstand | BIL    |
|-----------------------------|------------------------|--------|
| 4.16 kV                     | 19 kV                  | 60 kV  |
| 7.2 kV                      | 36 kV                  | 95 kV  |
| 13.8 kV                     | 36 kV                  | 95 kV  |
| 25.0 kV                     | 60 kV                  | 125 kV |
| 34.5 kV                     | 80 kV                  | 150 kV |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก-13 One line diagram ของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ออกแบบโดยบริษัท SIEMEN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก-14 One line diagram ของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ออกแบบโดย MEA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 60 Power Switching Equipment NEMA Std. SG6

| NEMA Power Switching Equipment Standard SG 6 |            |                              |        |           |        |                |        |           |        |
|--|------------|------------------------------|--------|-----------|--------|----------------|--------|-----------|--------|
| Voltage System                               |            | Rigid Bus Support and        |        |           |        |                |        |           |        |
| Operating Voltage<br>kV.                     | BIL<br>KV. | Disconnecting Switch Spacing |        |           |        |                |        |           |        |
|  |            | Phase to Ground              |        |           |        | Phase to Phase |        |           |        |
|  |            | Minimum                      |        | Standard  |        | Minimum        |        | Standard  |        |
|  |            | Ft & Inch                    | cm.    | Ft & Inch | cm.    | Ft & Inch      | cm.    | Ft & Inch | cm.    |
| 15   | 110        | 7"                           | 17.76  | 12"       | 30.48  | 12"            | 30.48  | 21"       | 53.34  |
| 23   | 150        | 10"                          | 25.4   | 15"       | 38.1   | 15"            | 38.1   | 24"       | 60.96  |
| 34.5   | 200        | 13"                          | 33.02  | 18"       | 45.72  | 18"            | 45.72  | 2' 3"     | 68.58  |
| 46   | 250        | 17"                          | 43.18  | 24"       | 60.96  | 21"            | 53.34  | 2' 9"     | 83.82  |
| 57   | 350        | 2' 1"                        | 63.5   | 2' 6"     | 76.2   | 2' 7"          | 78.74  | 3' 6"     | 106.68 |
| 69   | 350        | 2' 1"                        | 63.5   | 2' 6"     | 76.2   | 2' 7"          | 78.74  | 3' 6"     | 106.68 |
| 115  | 550        | 3' 6"                        | 106.68 | 4' 0"     | 121.92 | 4' 5"          | 134.62 | 5' 6"     | 167.64 |
| 138  | 550        | 3' 6"                        | 106.68 | 4' 0"     | 121.92 | 4' 5"          | 134.62 | 5' 6"     | 167.64 |
| 161  | 650        | 4' 2"                        | 127    | 5' 0"     | 152.4  | 5' 2"          | 157.48 | 6' 0"     | 182.88 |
| 230  | 900        | 5' 11"                       | 180.34 | 5' 6"     | 198.12 | 7' 5"          | 226.06 | 8' 6"     | 259.08 |
| 297  | 1050       | 6' 11"                       | 210.82 | 7' 6"     | 238.6  | 8' 9"          | 267    | 10' 0"    | 304.8  |
| 345  | 1175       | 7' 10"                       | 230.76 | 8' 6"     | 259.08 | 9' 5"          | 287.02 | 10' 6"    | 320.04 |

ตาราง 61 BILs and Percentage Impedance Voltages at Self-Cooled (OA) Rating. Ref. ANSI/IEEE Std. C57.12.10-1988, Table 10 and Section 4.6. Reproduced with permission of the National Electrical Manufacturers Association(NEMA).

| High-Voltage BIL<br>(kV) | Without Load Tap Changing |                                       | With Load Tap Changing             |                                    |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|                          | Low Voltage<br>480 V      | Low Voltage<br>2400 V<br>and<br>Above | Low Voltage<br>2400 V<br>and Above | Low Voltage<br>2400 V<br>and Above |
| 60-110                   | 5.75*                     | 5.5*                                  | —                                  | —                                  |
| 150                      | 6.75                      | 6.5                                   | 7.0                                | 7.0                                |
| 200                      | 7.25                      | 7.0                                   | 7.5                                | 7.5                                |
| 250                      | 7.75                      | 7.5                                   | 8.0                                | 8.0                                |
| 350                      | —                         | 8.0                                   | 8.5                                | 8.5                                |
| 450                      | —                         | 8.5                                   | 9.0                                | 9.0                                |
| 550                      | —                         | 9.0                                   | 9.5                                | 9.5                                |
| 650                      | —                         | 9.5                                   | 10.0                               | 10.0                               |
| 750                      | —                         | 10.0                                  | 10.5                               | 10.5                               |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตาราง 62 ราคาอุปกรณ์ของบริษัท SIEMEN

| Equipment                               | Spec   | Manufacturer  | Amount | Cost(Baht) |
|---|--|---------------|--------|------------|
| Switchgear(24kV)                        | 1250A 25kA/1s Air  | SIEMEN        | 1Set   | 3,186,140  |
| Disconnecting Switch                    | 1250A  | COELME        | 1Set   | 431,940    |
| Power transformer                       | 3Ø 20/25MVA ONAN,ONAF  | DAIHEN        | 1Set   | 11,358,220 |
| Power Circuit breaker ( $SF_6$ )        | 123kV,2000A,31.5kA Live tank   | SIEMEN (3AP1) | 1Set   | 689,720    |
| Circuit breaker ( $SF_6$ Withdraw able) | 1250A, 25kA  | SIEMEN        | 1Set   |            |
| Voltage transformer                     | Inductive  | Trench        |        | 571,650    |
| Current transformer                     | Free standing  | Trench        |        | 558,030    |
| Wire (24kV)                             | XLPE 24kV Power Cable<br>6-1/c XLPE 400sq.mm (Ampacity 840A)         | -             |        | 137,080    |
| Wire (115kV)                            | AAC Standard Conductor[TIS 85-2522]AAC 3-1/c 400sq.mm(Ampacity 855A) | -             |        |            |
| Surge arrestor                          | 96kV, 10kA   | SIEMEN        | 6Sets  | 266,760    |

### ตาราง 63 ราคาอุปกรณ์ของ MEA

| Equipment                        | Spec   | Manufacturer | Amount | Cost(Baht) |
|----------------------------------|--|--------------|--------|------------|
| Switchgear(24kV)                 | 1250A 31.5kA/3s Air  | ABB          | 1Set   | 370,000    |
| Disconnecting Switch             | 600A   | Hapam        | 1Set   | 400,000    |
| Power transformer                | 3Ø 115-69kV 20/25MVA<br>ONAN,ONAF                                    | ABB          | 1Set   | 19,000,000 |
| Power Circuit breaker ( $SF_6$ ) | 600A   | ABB          | 1Set   | 730,000    |
| Voltage transformer (115kV)      | Inductive  | ABB          |        | 610,000    |
| Current transformer(115kV)       | 300-400/5/5A   | trench       | 1Set   | 770,000    |
| Wire (24kV)                      | XLPE 24kV Power Cable<br>6-1/c XLPE 400sq.mm (Ampacity 840A)         | -            |        |            |
| Wire (115kV)                     | AAC Standard Conductor[TIS 85-2522]AAC 3-1/c 400sq.mm(Ampacity 855A) | -            |        |            |
| Surge arrestor                   | 96kV, 10kA   | ABB          | 3Sets  | 310,000    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

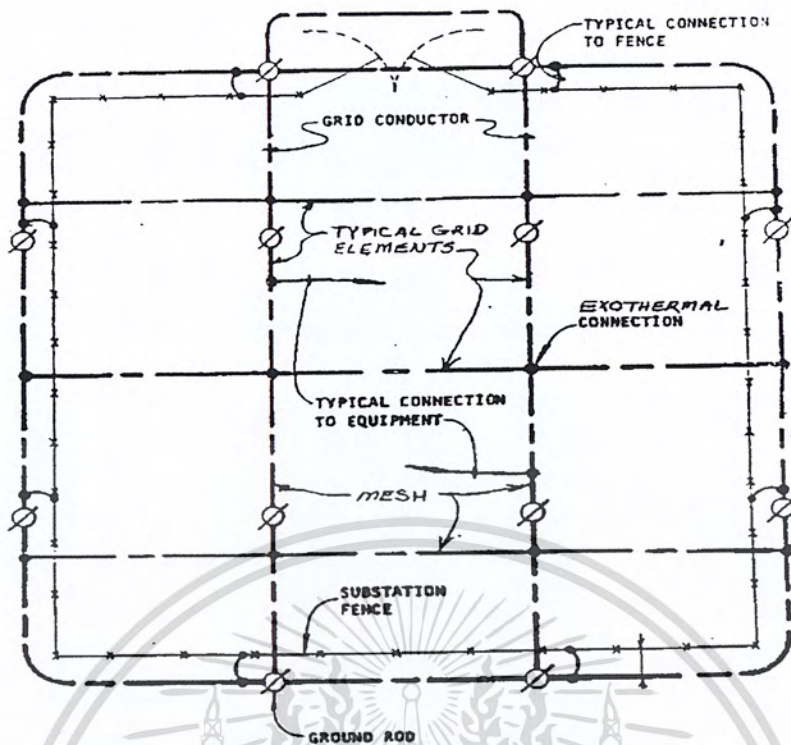
ตาราง ข-1 ค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้คำนวณ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 80

| Description                                 | Material<br>Conductivity<br>(%) | $\alpha_r$<br>Factor<br>@ 20 °C | K<br>(1/ $\alpha_0$ )<br>@ 0 °C | Fusing<br>Temperature<br>( °C) | $\rho_r$<br>@ 20 °C<br>( $\mu\Omega/cm$ ) | TCAP Factor<br>Effective Value<br>( $J/cm^2/°C$ ) |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---|---|
| Standard<br>Annealed<br>Soft Copper<br>Wire | 100.0                           | 0.00393                         | 234                             | 1083                           | 1.7241                                    | 3.422   |
| Commercial<br>Hard Drawn<br>Copper Wire     | 97.0                            | 0.00381                         | 242                             | 1084                           | 1.7774                                    | 3.422   |
| Copper-Clad<br>Steel Core<br>Wire           | 40.0                            | 0.00398                         | 245                             | 1084/<br>1300                  | 4.397                                     | 3.846   |
| Copper-Clad<br>Steel Core<br>Wire           | 30.0                            | 0.00398                         | 245                             | 1084/<br>1300                  | 5.862                                     | 3.846   |
| Commercial EC<br>Aluminum<br>Wire           | 61.0                            | 0.00403                         | 228                             | 657                            | 2.862                                     | 2.556   |
| Aluminum Alloy<br>Wire 5005                 | 53.5                            | 0.00353                         | 263                             | 660                            | 3.2226                                    | 2.598   |

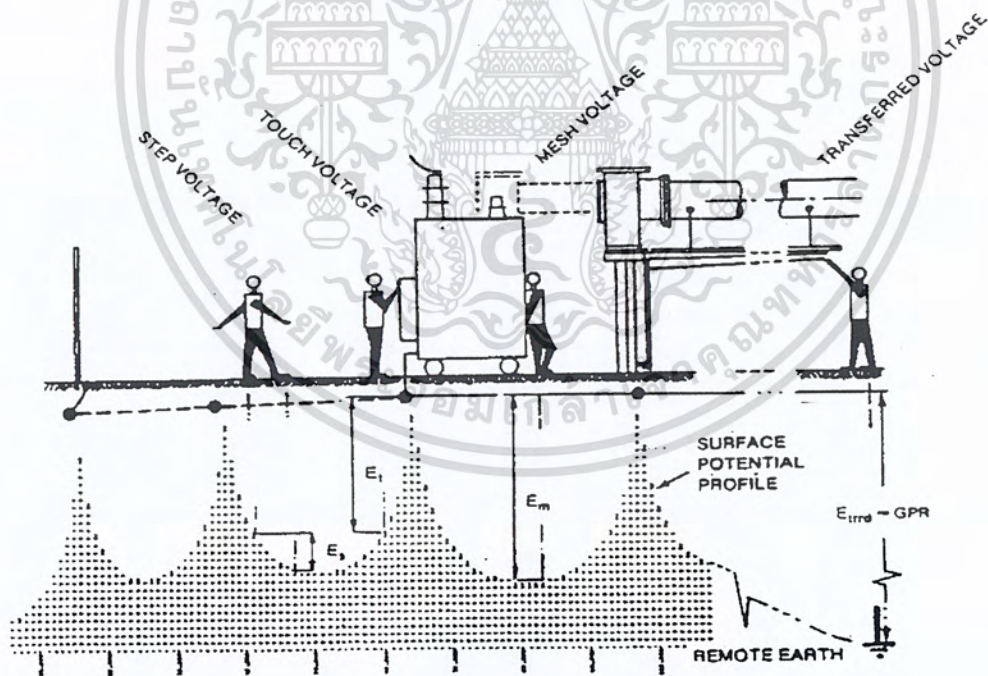
ตาราง ข-1 Typical Conductor Size IEEE 80

| Copper Conductor<br>Size (AWG or MCM) | Cross Sectional Area<br>Circular MILS | Diameter |                    |
|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|--------------------|
|                                       |                                       | Inches   | 10 <sup>-3</sup> m |
| 3                                     | 52,620                                | 0.260    | 6.60               |
| 2                                     | 66,360                                | 0.292    | 7.42               |
| 1                                     | 83,690                                | 0.332    | 8.43               |
| 1/0                                   | 105,600                               | 0.373    | 9.47               |
| 2/0                                   | 133,100                               | 0.419    | 10.64              |
| 3/0                                   | 167,800                               | 0.470    | 11.94              |
| 4/0                                   | 211,600                               | 0.528    | 13.41              |
| 250                                   | 250,000                               | 0.575    | 14.61              |
| 300                                   | 300,000                               | 0.630    | 16.00              |
| 350                                   | 350,000                               | 0.681    | 17.30              |
| 400                                   | 400,000                               | 0.728    | 18.49              |
| 450                                   | 450,000                               | 0.772    | 19.61              |
| 500                                   | 500,000                               | 0.813    | 20.65              |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

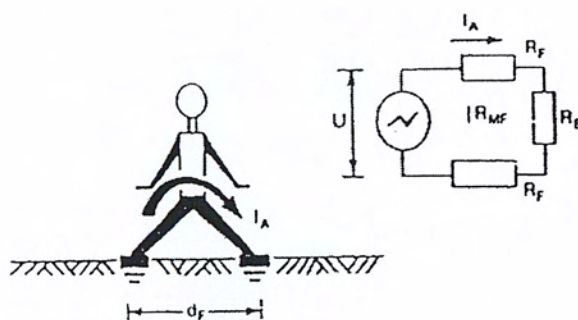


รูป ข-1 แสดงคุณลักษณะและสมบัติของสาย AAC

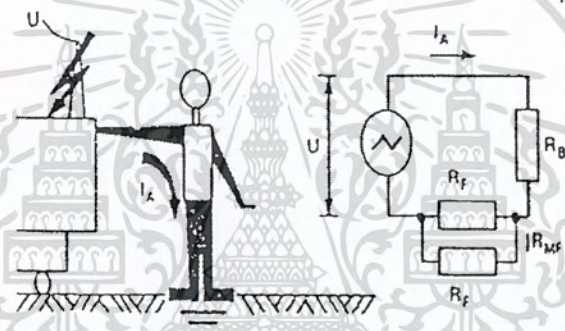


รูป ข-2 แสดงสภาวะการเกิดช็อกเมื่อเกิดลัดวงจรลงดิน

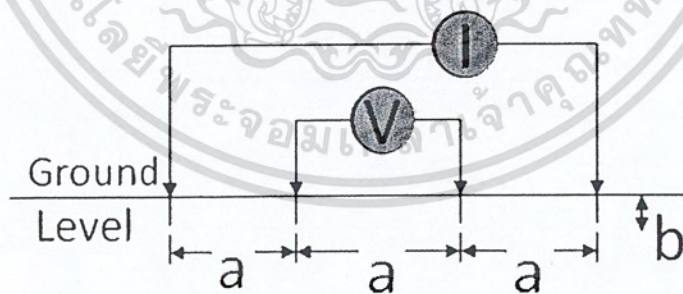
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข-3 แสดงภาพจำลองกระแสไหลระหว่างเท้าถึงเท้าเนื่องจากศักดาไฟฟ้าระหว่างก้าว



รูป ข-4 แสดงภาพจำลองกระแสไหลระหว่างมือถึงเท้าเนื่องจากศักดาไฟฟ้าสัมผัส



รูป ข-5 แสดงแสดงวิธีการต่อวงจรวัดความต้านทานของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค.

| Minimum Clearances and Protective Barrier Clearance in Power Installation<br>With Rated Voltage above 1 KV. (DIN VDE 0101) |                                  |  |   |               |
|--|----------------------------------|--|---|---------------|
| In the area off 52 kV. <math>\langle U_m \rangle < 300 \text{ kV.}</math>  |                                  |  |   |               |
| Nominal Voltage<br>$U_n$   | Maximum Voltage<br>For apparatus | Rate Lightning<br>Impulse with stand<br>Voltage 1.2/50 $\mu\text{s}$ | Min. Clearances(mm.)<br>Phase to phase<br>Conductor / Earth |               |
|  |                                  |  | KV.   | ( $U_m$ ) KV. |
| 3  | 3.6                              | 20<br>40   | 60  | 120           |
|  |                                  |  | 60  | 120           |
| 6  | 7.2                              | 60<br>75   | 90  | 120           |
|  |                                  |  | 120   | 120           |
| 10   | 12                               | 60<br>75   | 90  | 150           |
|  |                                  |  | 120   | 150           |
| 15   | 17.5                             | 75<br>95   | 120   | 160           |
|  |                                  |  | 160   | 160           |
| 20   | 24                               | 95<br>125  | 160   | 220           |
|  |                                  |  | 220   | 270           |
| 30   | 36                               | 147<br>170   | 270   | 320           |
|  |                                  |  | 320   | 360           |
| 36   | 41.5                             | 170<br>200   | 320   | 360           |
|  |                                  |  | 360   | 480           |
| 45   | 52                               | 250  | 480   |               |
| 66   | 72.5                             | 325  | 630   |               |
| 70   | 82.5                             | 380  | 750   |               |
| 110  | 123                              | 450<br>550   | 900   | 1100          |
|  |                                  |  | 1100  | 1300          |
| 132  | 145                              | 450<br>550<br>650  | 900   | 1100          |
|  |                                  |  | 1100  | 1300          |
|  |                                  |  | 1300  | 1500          |
| 150  | 170                              | 550<br>650<br>750  | 1100  | 1300          |
|  |                                  |  | 1300  | 1500          |
|  |                                  |  | 1500  |               |

ตาราง ค-1 กำหนดระยะปลอดภัยทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC Standard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2 กำหนดระยะปลอดภัยทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน NEMA Standard

| NEMA Power Switching Equipment Standard SG 6 |         |                              |        |           |        |                |        |           |        |
|--|---------|------------------------------|--------|-----------|--------|----------------|--------|-----------|--------|
| Voltage System                               |         | Rigid Bus Support and        |        |           |        |                |        |           |        |
| Operating Voltage kV.                        | BIL KV. | Disconnecting Switch Spacing |        |           |        |                |        |           |        |
|  |         | Phase to Ground              |        |           |        | Phase to Phase |        |           |        |
|  |         | Minimum                      |        | Standard  |        | Minimum        |        | Standard  |        |
|  |         | Ft & Inch                    | cm.    | Ft & Inch | cm.    | Ft & Inch      | cm.    | Ft & Inch | cm.    |
| 15   | 110     | 7"                           | 17.76  | 12"       | 30.48  | 12"            | 30.48  | 21"       | 53.34  |
| 23   | 150     | 10"                          | 25.4   | 15"       | 38.1   | 15"            | 38.1   | 24"       | 60.96  |
| 34.5   | 200     | 13"                          | 33.02  | 18"       | 45.72  | 18"            | 45.72  | 2' 3"     | 68.58  |
| 46   | 250     | 17"                          | 43.18  | 24"       | 60.96  | 21"            | 53.34  | 2' 9"     | 83.82  |
| 57   | 350     | 2' 1"                        | 63.5   | 2' 6"     | 76.2   | 2' 7"          | 78.74  | 3' 6"     | 106.68 |
| 69   | 350     | 2' 1"                        | 63.5   | 2' 6"     | 76.2   | 2' 7"          | 78.74  | 3' 6"     | 106.68 |
| 115  | 550     | 3' 6"                        | 106.68 | 4' 0"     | 121.92 | 4' 5"          | 134.62 | 5' 6"     | 167.64 |
| 138  | 550     | 3' 6"                        | 106.68 | 4' 0"     | 121.92 | 4' 5"          | 134.62 | 5' 6"     | 167.64 |
| 161  | 650     | 4' 2"                        | 127    | 5' 0"     | 152.4  | 5' 2"          | 157.48 | 6' 0"     | 182.88 |
| 230  | 900     | 5' 11"                       | 180.34 | 5' 6"     | 198.12 | 7' 5"          | 226.06 | 8' 6"     | 259.08 |
| 297  | 1050    | 6' 11"                       | 210.82 | 7' 6"     | 228.6  | 8' 9"          | 226.7  | 10' 0"    | 304.8  |
| 345  | 1175    | 7' 10"                       | 230.76 | 8' 6"     | 259.08 | 9' 5"          | 287.02 | 10' 6"    | 320.04 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง.

ตาราง ง-1 แสดงขนาดกระแสไฟฟ้าผ่าที่แปรผันตามค่า BIL  
(IEEE Std. 998-1996)

| BIL Class (kV) | Stoke Current Magnitude (kA) |
|----------------|------------------------------|
| 110            | 0.73                         |
| 150            | 1.00                         |
| 200            | 1.33                         |
| 250            | 1.67                         |
| 350            | 2.33                         |
| 550            | 3.67                         |
| 660            | 4.33                         |
| 750            | 5.00                         |
| 900            | 6.00                         |
| 1050           | 7.00                         |
| 1300           | 8.67                         |
| 1400           | 9.33                         |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง-2 แสดง Guild of conductor for Lightning Protection (IEEE Std. 998-1996)

| Recommend<br>Parameter<br><br>Voltage Level | BIL (kV) | H (m) | Diameter (mm) |
|---|----------|-------|---------------|
| 500 kV                                      | 1800     | 16.76 | 114.3         |
| 230 kV                                      | 900      | 13.47 | 126.4         |
| 115 kV                                      | 550      | 11.80 | 135.4         |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง-3 แสดงการจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าตามระดับการป้องกัน

| ระดับ<br>การ<br>ป้องกัน | กระแส<br>สูงสุด<br>(kA) | วิธีป้องกัน                         |                           |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
|                         |                         | วิธีทรงกลม<br>กลิ้ง<br>รัศมี (เมตร) | วิธีตาข่าย<br>ขนาด (เมตร) |
| 1                       | 2.9                     | 20                                  | 5                         |
| 2                       | 5.4                     | 30                                  | 10                        |
| 3                       | 10.1                    | 45                                  | 15                        |
| 4                       | 15.7                    | 60                                  | 20                        |

ตาราง ง-4 แสดงระยะเฉลี่ยระหว่างตัวนำลงดินตามระดับการป้องกัน

| ระดับการป้องกัน | ระยะเฉลี่ย (เมตร) |
|-----------------|-------------------|
| 1               | 10                |
| 2               | 15                |
| 3               | 20                |
| 4               | 25                |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง-5 แสดงวัสดุระบบป้องกันฟ้าผ่าและสภาวะการใช้

| วัสดุ               | สภาพที่ใช้งาน             |                           |               | การผูกרון             |                                   |                            |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------|
|                     | ในอากาศ                   | ในดิน                     | ใน<br>คอนกรีต | ทนทานต่อ              | เพิ่มขึ้นโดย                      | อิเล็กทรอนิกส์<br>ไลชิสกับ |
| ทองแดง              | ตัน<br>ดีเกลือว<br>เคลือบ | ตัน<br>ดีเกลือว<br>เคลือบ | ตัน           | กับวัสดุ<br>หลายอย่าง | คลอไรด์<br>เข้มข้น<br>สารอินทรีย์ | -                          |
| เหล็กชุบ<br>สังกะสี | ตัน<br>ดีเกลือว           | ตัน                       | ตัน           | ดีแม่ในดิน<br>กรด     | -                                 | ทองแดง                     |
| เหล็กไร้<br>สนิม    | ตัน<br>ดีเกลือว           | ตัน                       | -             | กับวัสดุ<br>หลายอย่าง | น้ำที่มี<br>สารละลาย<br>คลอไรด์   | -                          |
| อลูมิเนียม          | ตัน<br>ดีเกลือว           | -                         | -             | -                     | ตัวทำ<br>ปฏิกิริยา<br>ต่าง        | ทองแดง                     |
| ตะกั่ว              | ตัน<br>เคลือบ             | ตัน<br>เคลือบ             | -             | ซัลเฟตเข้ม<br>ขัน     | ดินกรด                            | ทองแดง                     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นาย รัฐศาสตร์ ภาวะโคตร

เกิดวันที่ 17 กันยายน 2531

การศึกษาระดับมัธยม: โรงเรียนบ้านไผ่ ข.ก. 5 จังหวัดขอนแก่น (2001-2006)

การศึกษาระดับปริญญาตรี: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2007-2010)

ฝึกงาน: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย น้ำพอง จ.ขอนแก่น



นาย วรดิษฐ์ เล้าเหล็กพลี

เกิดวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2532

การศึกษาระดับมัธยม: โรงเรียนลำปางกัลยาณี จ.ลำปาง (2001-2006)

การศึกษาระดับปริญญาตรี: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2007-2010)

ฝึกงาน: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แม่เมาะ จ.ลำปาง



นาย วิศรุต ตีร์เดชา

เกิดวันที่ 8 มีนาคม 2532

การศึกษาระดับมัธยม: โรงเรียนสิงห์สมุทร จ.ชลบุรี (2001-2006)

การศึกษาระดับปริญญาตรี: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2007-2010)

ฝึกงาน: บริษัท ABB จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้