

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



ปีการศึกษา 2542

## การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าในตำแหน่งที่เหมาะสมในระบบแรงดันไฟฟ้าระดับปานกลาง OPTIMAL LOCATION IN SURGE ARRESTER INSTALLATION IN MEDIUM VOLTAGE



โดย

นายยุทธนา ปลายพรรณพร

นายศิริชัย จันทน์หอม

นายอรรถพล ภมรพล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ร.ท.  
ร.ท. 3557  
2542

รศ. มณฑล ทิลาจินดาไกรฤกษ์  
อาจารย์ เซาว์ ชมภูอินไหว

เลขหม.....  
เลขทะเบียน..... 36997  
วัน, เดือน, ปี 10 ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2542


ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าในตำแหน่งที่เหมาะสมในระบบแรงดันไฟฟ้าระดับปานกลาง

ผู้จัดทำ

- 
1. นายยุทธนา ปลายพรรณพร
  2. นายศิริชัย จันทน์หอม
  3. นายอรรถพล ภมรพล

  
(รศ. มณฑล สีสัจจินดาไกรฤกษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

  
(อาจารย์ เชาว์ ชมภูอินไหว)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าในตำแหน่งที่เหมาะสมในระบบแรงดันไฟฟ้าระดับปานกลาง

นายยุทธนา	ลายพรรณพร	
นายศิริชัย	จันทน์หอม	
นายอรรถพล	ภมรพล	
รศ. มลชล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์เชาว์	ชมภูอินไหว	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2542		

### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติและการทำงานของกับดักฟ้าผ่าเพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษา ไปทำการคำนวณหาระยะทางระหว่างขั้วของกับดักฟ้าผ่ากับขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบแรงดันไฟฟ้าระดับปานกลาง มาประกอบการพิจารณาหาตำแหน่งติดตั้งกับดักฟ้าผ่าในตำแหน่งที่เหมาะสม โดยนำกรณีศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลง อันเนื่องมาจากแรงดันเกินที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่ามาพิจารณา เพราะหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่จะได้รับผลกระทบเป็นอันดับแรกจากผลของฟ้าผ่า ดังนั้นในการเลือกจุดติดตั้งที่เหมาะสมจึงเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับหม้อแปลง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าและมีราคาสูง

**OPTIMAL LOCATION IN SURGE ARRESTER INSTALLATION IN MEDIUM VOLTAGE**

**Yutthana Laipunpon**

**Sirichai Chanhom**

**Atthapol Pamopol**

**Assoc. Prof. Monthon Leelachindakaleak Adviser**

**Lecturer Chow Chompoo-inwai Adviser**

1999

**ABSTRACT**

This thesis study about properties and physical characteristic of surge arrester. Transformer effective due to surge voltage from lightning stroke be analyze in this study case. Optimal location between surge arrester and transformer be calculate.

The result of this study ;Optimal location. Increasing the transformer protective efficiency from lightning stroke.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1. บทนำ	1
บทที่ 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	2
2.1 แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	2
2.2 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	5
2.3 ทฤษฎีคลื่นจร	9
2.4 การนำเมทัลออกไซด์ไปใช้งาน	21
2.5 การทำนายความชันหน้าคลื่นจากแรงดันสูงเกินชั่วขณะในระบบ	25
2.6 โปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transient Program)	30
บทที่ 3. การออกแบบโปรแกรมและการใช้งาน	33
3.1 การเลือกใช้กับดักฟ้าผ่าและขนาดช่วงทำงานต่อเนื่อง	33
3.2 โปรแกรมการคำนวณหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสม ในการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	40
3.3 จำนวนและรายงานผล	44
บทที่ 4. การคำนวณโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ และผลการทดลอง	46
4.1 การใช้โปรแกรมคำนวณหาขนาดระยะติดตั้งของกับดักฟ้าผ่า และหาค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง	46
4.2 การใช้โปรแกรมวิเคราะห์ตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม ที่ออกแบบและผลการทดลองและวิเคราะห์เปรียบเทียบ	51
บทที่ 5. บทวิจารณ์และสรุป	63
5.1 บทวิจารณ์	63
5.2 บทสรุป	64

ภาคผนวก  
กิตติกรรมประกาศ  
เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2-1 แสดงลักษณะแรงดันเกินตามมาตรฐาน IEC	4
รูปที่ 2-2 แสดงสายตีเกลียว 2 เส้นที่มีจำนวนสายย่อยไม่เท่ากัน	6
รูปที่ 2-3 ลักษณะการวางสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากำลังแบบ 3 เหลี่ยม	8
รูปที่ 2-4 คุณสมบัติแบบรวมกลุ่มของสายส่ง	10
รูปที่ 2-5 แสดงลักษณะคลื่นจรบนสายส่ง ปลายสายเปิด	16
รูปที่ 2-6 แสดงลักษณะการสะท้อนของรูปคลื่น	19
รูปที่ 2-7 แสดงลักษณะรูปทรงของเมทัลลอกไซค์	21
รูปที่ 2-8 กราฟเซมิล็อก ( Semi-Logarithmic ) แสดงคุณลักษณะ โวลต์กับกระแส	21
รูปที่ 2-9 แสดงลักษณะกระแสที่เกิดขึ้น เมื่อมีแรงดันเกินจากฟ้าผ่า	22
รูปที่ 2-10 การสูญเสียกำลังไฟฟ้าของเมทัลลอกไซค์และความร้อนที่เกิดในตัวเมทัลลอกไซค์	23
รูปที่ 2-11 ค่าความคงทน	24
รูปที่ 2-12 แรงดันสูงเกินเนื่องจากฟ้าผ่าลงบนสายส่งเหนือศีรษะ	25
รูปที่ 2-13 แสดงระดับแรงดันป้องกัน	29
รูปที่ 2-14 วงจรเสมือนของการต่อ	29
รูปที่ 3-1 แสดงแรงดันสูงเกินชั่วขณะที่สายส่งและ E	38
รูปที่ 3-2 ส่วนของโปรแกรมการคำนวณหลัก	40
รูปที่ 3-3 แรงดันระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	41
รูปที่ 3-4 เลือกขนาดกระแส และกำหนดชนิดสายตัวนำ	41
รูปที่ 3-5 กำหนดลักษณะการวางสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	42
รูปที่ 3-6 ค่าแฟกเตอร์สายดิน	42
รูปที่ 3-7 เลือกค่าความคงทน	43
รูปที่ 3-8 เลือกค่าความคงทนแรงดันชั่วขณะของฉนวน	43
รูปที่ 3-9 ช่องใส่ค่า BIL	44
รูปที่ 3-10 ส่วนควบคุมการคำนวณ และรายงานผล	44
รูปที่ 3-11 เลือกค่า MCOV สำหรับกับดักฟ้าผ่า	45
รูปที่ 3-12 รายงานค่าความยาวที่เหมาะสมในการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-1 แสดงการกำหนดค่าแรงดันของระบบ	47
รูปที่ 4-2 แสดงการเลือกค่าความคงทนของกัปดักฟ้าผ่า	47
รูปที่ 4-3 แสดงการเลือกค่าแฟกเตอร์สายดิน	47
รูปที่ 4-4 แสดงการเลือกค่าความคงทนของกัปดักฟ้าผ่า	48
รูปที่ 4-5 แสดงการเลือกรูปแบบการวางสาย	48
รูปที่ 4-6 แสดงการกำหนดค่าระดับแรงดันเกินชั่วขณะที่อุปกรณ์สามารถทนได้	48
รูปที่ 4-7 แสดงการกำหนดค่าระยะห่างของสายตัวนำแต่ละเฟส	49
รูปที่ 4-8 แสดงส่วนประกอบของวงจรวิเคราะห์	51
รูปที่ 4-9 แสดงการกำหนดค่าแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	52
รูปที่ 4-10 แสดงการกำหนดค่าของแหล่งจ่ายสัญญาณกระแสฟ้าผ่า	52
รูปที่ 4-11 แสดงการกำหนดค่าของกัปดักฟ้าผ่า	53
รูปที่ 4-12 แสดงการกำหนดค่าสายส่งพลังงานไฟฟ้า	53
รูปที่ 4-13 แสดงการกำหนดค่าสายส่งพลังงานไฟฟ้าแบบพายน	53
รูปที่ 4-14 แสดงค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายในสถานะปกติ	54
รูปที่ 4-15 แสดงค่าแรงดันที่ปลายสายส่งในสถานะปกติ	54
รูปที่ 4-16 แสดงค่ากระแสรั่วไหลผ่านกัปดักฟ้าผ่าในขณะที่ยังไม่ทำงาน	55
รูปที่ 4-17 แสดงค่าของสัญญาณกระแสฟ้าผ่า 10 kA 1.2/50 $\mu$ s	55
รูปที่ 4-18 แสดงค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายและด้านปลายสายในสถานะมีสัญญาณฟ้าผ่า	56
รูปที่ 4-19 แสดงค่ากระแสที่ไหลผ่านกัปดักฟ้าผ่าในสถานะทำงาน	56
รูปที่ 4-20 แสดงแรงดันด้านปลายสายขณะเกิดฟ้าผ่าในช่วงแรก	57
รูปที่ 4-21 แสดงค่าแรงดันด้านปลายสายเมื่อเปลี่ยนระยะติดตั้งกัปดักฟ้าผ่า	62

## VII

### สารบัญญัตราสาร

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ค่าความชันที่คาดว่าจะเป็นไปได้จากแรงดันสูงเกินจากฟ้าผ่า ในระบบสถานีส่งจ่ายแรงดันขนาดกลาง	26
ตารางที่ 3-1 ระดับการฉนวนพื้นฐานแรงดันชั่วขณะ ระดับการป้องกัน ที่เหมาะสมของกับดักฟ้าผ่าด้วย $U_p = 4$ p.u.	37
ตารางที่ 4-1 แสดงค่าต่างๆ ที่ได้จาก โปรแกรมโดยการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์	50
ตารางที่ 4-2 แสดงค่าแรงดันที่ปลายสายที่ได้มาจาก โปรแกรมวิเคราะห์ เมื่อปลายสายเปิด ไม่มีการต่อของหม้อแปลงไฟฟ้า, $C = 0$ F	58
ตารางที่ 4-3 แสดงค่าแรงดันที่ปลายสายที่ได้มาจาก โปรแกรมวิเคราะห์ เมื่อปลายสายปิด โดยต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ากับระบบและหม้อแปลงมีค่า $C = 0.5$ nF	58
ตารางที่ 4-4 แสดงค่าแรงดันที่ปลายสายที่ได้มาจาก โปรแกรมวิเคราะห์ เมื่อปลายสายปิด โดยต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ากับระบบและหม้อแปลงมีค่า $C = 1.0$ nF	59
ตารางที่ 4-5 แสดงค่าแรงดันที่ปลายสายที่ได้มาจาก โปรแกรมวิเคราะห์ เมื่อปลายสายปิด โดยต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ากับระบบและหม้อแปลงมีค่า $C = 1.5$ nF	59
ตารางที่ 4-6 แสดงค่าแรงดันที่ปลายสายที่ได้มาจาก โปรแกรมวิเคราะห์ เมื่อปลายสายปิด โดยต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ากับระบบและหม้อแปลงมีค่า $C = 2.0$ nF	60
ตารางที่ 4-7 แสดงค่าแรงดันปลายสายเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	61

## บทที่ 1

### บทนำ

ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สถานะแรงดันเกิน (over voltage) ที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายด้วยสาเหตุจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า (lightning stroke) และการเปิด-ปิด สวิตช์ตัดตอน (switching) ในระบบมีผลทำให้อุปกรณ์ในระบบเสียหาย สถานะแรงดันเกินในระบบที่รุนแรงที่สุดและทำความเสียหายกับอุปกรณ์มากที่สุด รวมถึงลดทอนความเชื่อถือได้ (reliability) ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าคือแรงดันเกินที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ซึ่งมีค่าสูงกว่า 10 เปรอร์ยูนิต แรงดันที่สูงมาก ๆ นี้สามารถทำความเสียหายให้กับอุปกรณ์ในระบบส่ง และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในระบบส่งจ่ายโดยส่วนมากมีราคาสูง อาทิเช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เมื่ออุปกรณ์เสียหายผู้บริโภคร และผู้ประกอบการจะได้รับผลกระทบกระเทือนตามไปด้วย กับดักฟ้าผ่า (lightning arrester หรือ surge arrester) เป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกจากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลของกับดักฟ้าผ่า การใช้งานกับดักฟ้าผ่าได้อย่างมีประสิทธิภาพในการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ การออกแบบติดตั้งอย่างถูกต้องเหมาะสมมีส่วนช่วยให้ทำงานได้อย่างถูกต้อง การออกแบบจะต้องคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าในระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระดับปานกลาง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

ในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีปรากฏการณ์ที่เป็นอันตรายต่อระบบอย่างหนึ่งคือ การเกิดแรงดันเกินในระบบ (Over-voltage) ซึ่งอาจจะมีสาเหตุเนื่องจากการเกิดฟ้าผ่าส่งผลให้เกิดแรงดันเกินหรือเกิดจากการเปิด-ปิด สวิตช์ในระบบ แรงดันเกินที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าแรงดันเสิร์จ (Surge Voltage) ซึ่งแรงดันที่มีค่าสูงมากในระยะเวลาสั้นๆจะเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ในระบบส่ง เช่น หม้อแปลง, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรืออุปกรณ์อื่นๆในระบบ

การเกิดแรงดันเกินที่เกิดจากการเปิด-ปิดสวิตช์โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 2 เท่าของพิกัดแรงดันซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อระบบส่งมากนักแต่แรงดันสูงเกินจากการเกิดฟ้าผ่าจะทำอันตรายกับระบบส่งขนาดของแรงดันสูงเป็นล้าน โวลต์เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่ง โดยตรงทำให้ลูกถ้วยเกิดการวาวไฟตามผิว ถ้าแรงดันฟ้าผ่าไหลเข้าสู่หม้อแปลงจะทำให้เกิดความเสียหายของฉนวนภายในหม้อแปลง การป้องกันแรงดันเกินมีหลายวิธีเป็นต้นว่าการใช้สายดินชิงอากาศ (Over Head Ground Wire) และการใช้กับดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester) สำหรับอุปกรณ์ในโรงจักรและสถานีไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายแรงดันสูงจะใช้ทั้ง 2 วิธีแต่ในระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาดกลางซึ่งมีแรงดันอยู่ในย่าน 1 ถึง 45 กิโลโวลต์ การใช้สายดินชิงอากาศไม่มีผลต่อการป้องกันฟ้าผ่ามากนัก เนื่องจากระยะห่างหรือระยะความปลอดภัย ระหว่างสายดินชิงอากาศกับสายตัวนำมีระยะน้อยมาก เมื่อเกิดฟ้าผ่าโดยตรงลงบนสายส่งอีกทั้งการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในกรณี ที่ฟ้าผ่าลงในบริเวณใกล้เคียงแนวสายส่งซึ่งไม่สามารถป้องกันได้ด้วยสายดินชิงอากาศแต่เหตุดังกล่าวสามารถป้องกันได้โดยใช้กับดักฟ้าผ่าโดยปกติขนาดแรงดันเกินจะถูกกำหนดให้เป็นค่าต่อหนึ่งหน่วย (per unit ; p.u. ) สามารถหาได้จากสมการ

$$1 \text{ p.u.} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_m \quad (2.1)$$

### 2.1.1 แรงดันเกินภายนอก

การส่งพลังงานไฟฟ้าตราบเท่าทุกวันนี้ อาจกล่าวได้ว่าส่วนใหญ่เป็นแบบสายจึงในอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายส่งแรงสูงพิเศษ (EHV) ผ่านสวิตช์ตัดตอน หม้อแปลงไฟฟ้า และอุปกรณ์อื่นๆในสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย ซึ่งติดตั้งอยู่กลางแจ้ง นั้นหมายความว่าอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในระบบสายส่งนี้มีโอกาสที่จะถูกฟ้าผ่าได้ สายฟ้าที่ผ่าลงโดยตรงบนสายส่งหรือผ่าลงบริเวณใกล้เคียงหรือแม้แต่มีก้อนเมฆที่มีประจุมาก ๆ แล้วเกิดดิซชาร์จระหว่างก้อนเมฆเหนือสายส่ง จะทำให้เกิดแรงดันเกิดขึ้นบนสายแรงสูง แรงดันเกินนี้สามารถคำนวณได้ถ้าหากทราบรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า โดยอาศัยหลักการคิดคำนวณตามทฤษฎีของคลื่นจร (Traveling wave theory) และทฤษฎีการคำนวณวงจร RLC รูปลักษณะรูปคลื่นแรงดันเกินภายนอกหรือแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (lightning impulse voltage) นี้จะมีช่วงหน้าคลื่น หมายถึงช่วงเวลาที่เราเริ่มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่ายอดนั้นสั้นมาก คือ อยู่ในช่วง 1 ถึง 2 ไมโครวินาที และช่วงหางคลื่น คือ แรงดันลดลงครึ่งหนึ่งของค่ายอดในช่วงเวลาประมาณ 40 ถึง 60 ไมโครวินาที

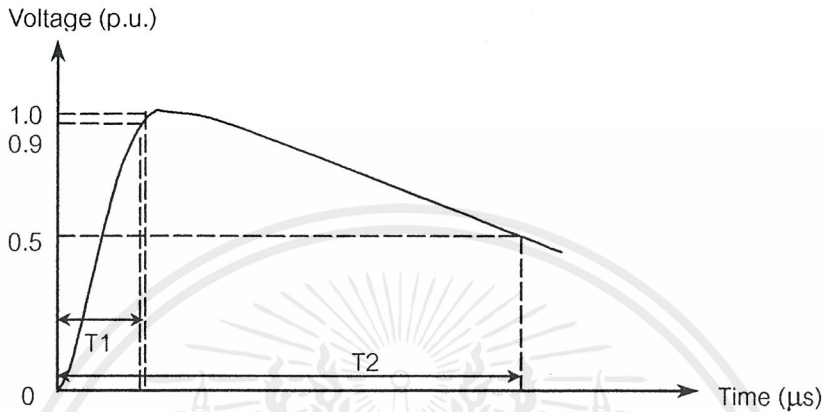
#### แรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Over Voltage ; TOV)

เกิดขึ้นในสภาวะที่มีการปลดโหลดออกจากระบบและเกิดจากการลัดวงจรลงดินในระบบ ทำให้เกิดความถี่ออสซิลเลต ที่อยู่ในช่วงระยะเวลา 0.1 วินาที ไปจนถึงหลายๆชั่วโมงโดยปกติทั่วไปแล้ว แรงดันเกินแบบนี้มีค่าไม่เกิน  $\sqrt{3}$  เปรอร์ยูนิต และไม่มีอันตรายกับระบบส่งจ่าย

#### แรงดันเกินจากฟ้าผ่า (Lightning Over Voltage)

แรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่าที่มีค่ายอดคลื่นสูงมาก ช่วงเวลาที่เกิดชั่วขณะเป็นไมโครวินาที มีค่ายอดคลื่นสูงมาก ประมาณ 10 เปรอร์ยูนิต หรือมากกว่านั้น และเป็นอันตรายกับระบบส่งจ่ายอย่างมาก จำเป็นที่จะต้องรีบกำจัดออกจากระบบเพื่อป้องกันอุปกรณ์ในระบบส่งจ่าย

โดยทั่วไปการบอกขนาดของแรงดันเกินจะบอกด้วยตัวเลข 2 ตัว อยู่ในหน่วยของเวลาซึ่งเขียนอยู่ในรูป T1/T2 (T1 ; ช่วงเวลาด้านขึ้น , T2 ; ช่วงเวลาด้านลง)



รูปที่ 2-1 แสดงลักษณะแรงดันเกินตามมาตรฐาน IEC (International Electrotechnical Commission) Lightning Surge 1.2/50  $\mu$ s และ Switching Surge 250/2500  $\mu$ s

จากวิวัฒนาการคิดค้นและประดิษฐ์อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินจากฟ้าผ่าทำให้มีกับดักฟ้าผ่าหลายแบบ ใช้งานได้ดีขึ้นและในปัจจุบันนิยมใช้แบบกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป (Gapless Arrester) ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ ซิลิคอนคาร์ไบด์รีซิสเตอร์ (Silicon Carbide resister ; SiC) , ซิงค์ออกไซด์รีซิสเตอร์ ( Zinc Oxide resister ; ZnO )

### 2.1.2 แรงดันเกินภายใน

สาเหตุที่เกิดแรงดันเกินภายใน อาจเนื่องมาจากการทำงานของสวิตช์โดยผู้ปฏิบัติงานหรือทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อเกิดความบกพร่องขึ้น แรงดันเกินดังกล่าวเกิดจากการทำงานของสวิตช์ เรียกว่าแรงดันสวิตช์ซึ่งเสิร์จ (switching surge) หรืออิมพัลส์แบบสวิตช์ซึ่ง (switching impulse) หรือเกิดจากการลัดวงจรเนื่องจากความบกพร่องของฉนวน หรือเกิดจากแรงดันเกินภายนอก คือ แรงดันฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดสปาร์คหรือวบไฟตามผิวฉนวนภายนอกที่มีความสกปรก เปียกฝน ขึ้นด้วยหมอกน้ำค้าง หรือเกิดลัดวงจรเนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอม หรือเกิดจากวงจรรีโซแนนซ์ เพราะค่าคาปาซิแตนซ์และอินดักแตนซ์ในสายส่ง รูปลักษณะของคลื่นแรงดันเกินภายในนี้จะซ้ำกว่าแรงดันเกินภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ ช่วงหน้าคลื่นจะอยู่ในช่วง 100 ถึง 300 ไมโครวินาที และช่วงหางคลื่นอยู่ในช่วง 2,000 ถึง 3,000 ไมโครวินาที แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งเสิร์จนี้จะไม่มีความหมาย ต่อการทดสอบระดับการฉนวนที่ใช้กับระบบแรงดันต่ำกว่า 300 กิโลโวลต์ แต่ที่ระบบแรงดันสูงกว่า 300 กิโลโวลต์ การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตช์จะมีความหมายมากขึ้นเมื่อเทียบกับแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า

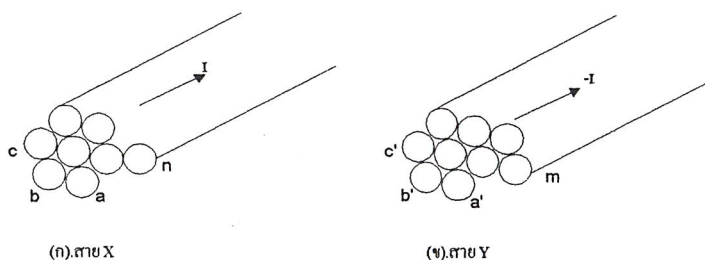
### แรงดันเกินที่เกิดจากการ เปิด-ปิดสวิตช์ (Switching Over Voltage)

เกิดขึ้นจากการทำการเปิด-ปิดสวิตช์ในระบบส่งจ่าย ในช่วงขณะเปิด-ปิดจะส่งผลให้เกิดความถี่สูงหลายกิโลเฮิร์ตซ์ ขึ้นกับความถี่มูลฐาน(Fundamental Frequency ;  $f_0$ ) ช่วงเวลาหน้าคลื่น 250 ถึง 2,500 ไมโครวินาที และขนาดแรงดันเกินมีค่าสูงประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์

## 2.2 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

### 2.2.1 การหาค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ในการหาค่าความเหนี่ยวนำของสายตีเกลียว 2 เส้น ที่มีกระแสไหลในสายเท่ากัน จะต้องเริ่มต้นจากการหาฟลักซ์คัลลิ่งที่สาย แต่ในกรณีนี้จะถือว่ากระแสที่ไหลในแต่ละสายย่อยของสายตีเกลียวมีค่าเฉลี่ยสายละเท่าๆกัน สมมุติว่าสาย X มีสายย่อย  $n$  เส้น และสาย Y มีสายย่อย  $m$  เส้น ดังแสดงในรูปที่ 2-2 ถ้ากระแสไหลในสายเท่ากับ  $I$  แอมแปร์ กระแสที่ไหลในสายย่อย X มีค่า  $I/n$  และกระแสที่ไหลกลับในสายย่อย Y มีค่า  $-I/n$



รูปที่ 2-2 แสดงสายตีเกลียว 2 เส้นที่มีจำนวนสายย่อยไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาฟลักซ์คั่งของสายย่อย a หาได้จากสมการ

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \frac{I}{n} \left[ \ln \frac{1}{r'} + \ln \frac{1}{D_{ab}} + \ln \frac{1}{D_{ac}} + \dots + \ln \frac{1}{D_{an}} \right]$$

$$- 2 \times 10^{-7} \frac{I}{m} \left[ \ln \frac{1}{D_{aa'}} + \ln \frac{1}{D_{ab'}} + \ln \frac{1}{D_{ac'}} + \dots + \ln \frac{1}{D_{an}} \right] \quad (2.2)$$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{\sqrt[m]{D_{aa'} D_{ab'} D_{ac'} \dots D_{am}}}{\sqrt[n]{r' D_{ab} D_{ac} \dots D_{an}}} \quad (2.3)$$

และความเหนี่ยวนำของสายย่อย a จะหาได้ดังนี้

$$L_a = \frac{\lambda_a}{I/n} = \frac{n \lambda_a}{I} \quad (2.4)$$

$$L_a = 2n \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[m]{D_{aa'} D_{ab'} D_{ac'} \dots D_{am}}}{\sqrt[n]{r' D_{ab} D_{ac} \dots D_{an}}} \quad (2.5)$$

ในการทำงานเดียวกันก็อาจพิสูจน์ได้ว่า

$$L_b = \frac{\lambda_b}{I/n} = \frac{n \lambda_b}{I} \quad (2.6)$$

$$L_b = 2n \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[m]{D_{ba'} D_{bb'} D_{bc'} \dots D_{bm}}}{\sqrt[n]{r' D_{ba} D_{bc} \dots D_{bn}}} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อหาค่าเฉลี่ยของความเหนี่ยวนำในสาย X จะได้ดังนี้

$$L_{av} = \frac{L_a + L_b + L_c + \dots L_n}{n} \quad (2.8)$$

เนื่องจากสาย X ประกอบด้วยสายย่อยที่ขนานกัน  $n$  เส้น จึงทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรวม  $L_x$  ลดลงจากค่าความเหนี่ยวนำเฉลี่ย  $L_{av}$  อยู่  $n$  เท่า นั่นคือ

$$L_x = \frac{L_{av}}{n} = \frac{L_a + L_b + L_c + \dots L_n}{n^2} \quad (2.9)$$

แทนค่าความเหนี่ยวนำของสายย่อย  $L_a, L_b, \dots,$  และ  $L_n$  ลงในสมการที่ (2.9) จะได้

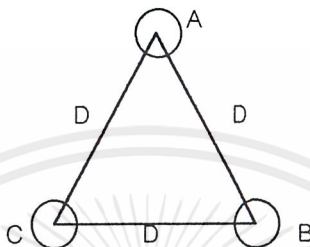
$$\begin{aligned} L_x &= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt{mn} \sqrt{(D_{aa}, D_{ab}, \dots, D_{am})(D_{ba}, D_{bb}, \dots, D_{bm}) \dots (D_{na}, D_{nb}, \dots, D_{nm})}}{n^2 \sqrt{(D_{aa}, D_{ab}, \dots, D_{am})(D_{ba}, D_{bb}, \dots, D_{bm}) \dots (D_{na}, D_{nb}, \dots, D_{nm})}} \\ &= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} \end{aligned} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $D_m$  = ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างสายเชิงเรขาคณิต (mutual GMD)

$D_s$  = ระยะห่างเฉลี่ยภายในสายเชิงเรขาคณิต (self GMD)

## 2.2.2 การหาค่าความจุไฟฟ้า

ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการวางสายที่เป็นรูปสามเหลี่ยม หรือ แนวนอน มีค่าระยะห่าง =  $D$  และรัศมี =  $r$



รูปที่ 2-3 ลักษณะการวางสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสามเหลี่ยม

การหาค่าความต่างศักย์  $V_{an}$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ q_a \ln \frac{1}{r} + q_b \ln \frac{1}{D} + q_c \ln \frac{1}{D} \right] \\
 &= \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ q_a \ln \frac{1}{r} + (q_b + q_c) \ln \frac{1}{D} \right] \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

เนื่องจาก  $q_a + q_b + q_c = 0$

ดังนั้น  $q_b + q_c = -q_a$

แทนค่า  $q_b + q_c$  ลงในสมการจะได้

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ q_a \ln \frac{1}{r} - q_a \ln \frac{1}{D} \right] \\
 &= \frac{q_a}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D}{r} \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

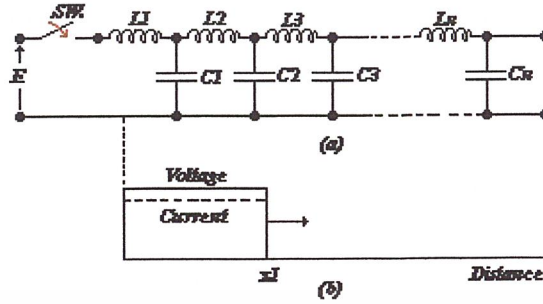
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจุไฟฟ้าต่อเฟส จะหาได้จาก

$$\begin{aligned}
 C_{an} &= \frac{q_a}{V_{an}} \\
 &= \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{D}{r}} \\
 &= \frac{0.0388}{\log \frac{D}{r}}
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

### 2.3 ทฤษฎีคลื่นจร

สายส่งมีบทบาทมากมายในการศึกษาทางวิศวกรรมไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วสายส่งจะใช้ในการส่งสัญญาณความถี่ต่างๆ เพื่อการสื่อสารและพลังงานไฟฟ้า โดยปกติแล้วสายส่งไฟฟ้าจะมีความยาวไม่เกิน 500 กิโลเมตร สายส่งที่ใช้อยู่ในระบบโครงข่ายวงจรไฟฟ้า จะมีค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นในสนามแม่เหล็กรอบสายไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าระหว่างสายค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้า ที่กระจายอยู่ที่สายส่งจะมีผลน้อยมากกับกระแสไฟฟ้าที่แปรตามเวลาในระบบโครงข่าย เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์สายส่ง เราจะแทนด้วยคอยด์ความเหนี่ยวนำ และคอนเดนเซอร์ค่าความจุไฟฟ้า แบบรวมกลุ่ม (Lumped inductance & Lumped Capacitance) เพราะว่าพารามิเตอร์ในการกระจายมีความสัมพันธ์กับการพิจารณาระบบ ซึ่งจำเป็นมากในการพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้า ของสายส่ง ในขณะที่เกิดภาวะทรานเซียนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ จะไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสายส่งที่มีระยะทางไกลมาก



รูปที่ 2-4 คุณสมบัติแบบรวมกลุ่มของสายส่ง

หากแทนคุณลักษณะของสายส่งด้วยค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าโดยไม่คิดค่าความต้านทาน ดังในรูปที่ 2-4(a) จากรูปเมื่อเปิดสวิตช์ แรงดันจากแหล่งจ่ายจะถูกส่งไปยังปลายของสายส่งโดยทันที กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ส่งต่อไปยัง  $C_1$  ซึ่งจะเริ่มอัดประจุไฟฟ้า จนกระทั่งแรงดันตกคร่อมมีค่าเท่ากับ  $E$  ก็จะเริ่มปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน  $L_2$  ไปยังตัว  $C_2$  ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องไปจนถึงปลายสาย ในช่วงแรกที่  $C_1$  เริ่มอัดประจุนั้นจะทำให้เกิดการเดินทางของคลื่นแรงดันที่สายด้วยความเร็วค่าหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2-4(b) ขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ไปข้างหน้า นั้น จะยังไม่มีกระแสอัดประจุไฟฟ้า โดยคลื่นจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้ายังจุด  $x$  จนแรงดันมีค่าเท่ากับ  $E$  คลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะเดินทางไปพร้อมกัน ในขณะที่กระแสไหลผ่าน  $L_1$  และ  $C_1$  จะได้รับการอัดประจุไฟฟ้าคลื่นกระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ตามสายส่งพร้อมกับคลื่นแรงดันไฟฟ้า โดยจะมีความแตกต่างกันเพียงแค่อุปกรณ์เท่านั้นในกรณีที่มีพลังงานเท่ากัน

เพื่อให้ง่ายในการพิจารณาองค์ประกอบอิมพีแดนซ์การกระจาย จะให้สายตัวนำโลหะ มีค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้า เป็นแบบรวมกลุ่มที่มีค่าจำกัด และไม่คิดผลที่ไม่สามารถแยกออกได้ขององค์ประกอบอิมพีแดนซ์แบบรวมกลุ่ม ดังนั้นเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสจะไหลผ่าน  $L_1$  แบบไม่ต่อเนื่องไปยัง  $C_1$  จนแรงดันมีค่าเท่ากับ  $E$  แต่ในความเป็นจริงสายส่งจะมีค่าความสูญเสียและขนาดองค์ประกอบแบบรวมกลุ่ม (Lumpiness) แตกต่างไปจากคุณสมบัติในอุดมคติ

### 2.3.1 สัตว์แรงดันและกระแสไฟฟ้า

คลื่นที่เกิดขึ้นที่สายเป็นคลื่นที่แยกออกมาจาก คลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกันด้วยความเร็วค่าหนึ่ง มีความสัมพันธ์กันกับองค์ประกอบคุณสมบัติของสายถ้าให้  $C$  คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความจุไฟฟ้าของสายต่อหน่วยความยาว แล้วจะได้ค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้สร้างแรงดันหนึ่งหน่วยความยาวเท่ากับ  $CE$  ความเร็วคลื่นบนสายคือ  $v$  ดังนั้นเราจะต้องอัดประจุไฟฟ้าด้วยความเร็ว  $v$  ในทุกๆวินาที เพราะฉะนั้นจะมีค่าประจุไฟฟ้าเท่ากับ  $CEv$  คือค่ากระแสไฟฟ้า

$$I = CEv \quad (2.14)$$

$$\frac{E}{I} = \frac{1}{Cv} \quad \text{หรือ} \quad \frac{I}{E} = Cv \quad (2.15)$$

เมื่อ  $v$  คือความเร็วในการแพร่กระจาย

คลื่นจรบนสายส่งเกิดจากพลังงานที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของสายเราสามารถหาความเร็วของรูปคลื่นได้เมื่อคลื่นเดินทางได้ระยะทางเท่ากับ  $x$  จะมีค่าความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ  $Cx$  พลังงานไฟฟ้าสถิตในส่วนนี้คือ  $\frac{1}{2}Cx E^2$  และมีกระแสไฟฟ้าเท่ากับ  $I$  ในเวลาที่เท่ากัน ถ้าให้  $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาวค่าความเหนี่ยวนำรวมที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าคือ  $Lx$  และพลังงานแม่เหล็กของสายส่งส่วนนี้จะเท่ากับ  $\frac{1}{2}Cx E^2$  เวลาที่คลื่นเดินทางระยะ  $x$  คือ  $t$  ดังนั้นคลื่นจะมีความเร็วในการเดินทาง  $v = \frac{x}{t}$  ซึ่งเกิดจากพลังงาน  $EIt$  ดังนั้น

$$EIt = \frac{1}{2}Cx E^2 + \frac{1}{2}LxI^2 \quad (2.16)$$

เมื่อหารด้วย  $t$  ทั้งสองข้างจะได้

$$EI = \frac{1}{2}CvE^2 + \frac{1}{2}LvI^2 \quad (2.17)$$

ดังนั้นเราสามารถหาความเร็ว ของคลื่นเดินทางได้จาก นั่นคือ

$$v = \frac{2EI}{CE^2 + LI^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{2 EI}{C \frac{E}{I} + L \frac{I}{E}} \quad (2.18)$$

เมื่อกำจัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าออกจะได้

$$v = \frac{2}{\frac{1}{v} + LCv} \quad (2.19)$$

$$v^2 = \frac{1}{LC}$$

หรือ 
$$v = \pm \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.20)$$

จะเห็นว่าความเร็วในการแพร่กระจายของคลื่น จะหาได้จากค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้า โดยไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของคลื่นที่ส่ง เครื่องหมาย บวกหรือลบนั้นแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น โดยรากที่สองนั้นแสดงให้เห็นว่ามีทิศทางที่เป็นไปได้ทั้งบวกและลบ ที่ความเร็วเท่ากัน โดยปกติสายส่งจะมีความเร็วในการแพร่กระจายคลื่นเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยเกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ของความถี่สูง) การเดินทางของพลังงานบนสายส่งมีลักษณะ เช่นเดียวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายตัวนำโลหะ

การคำนวณหาความเร็วคลื่นบนสายส่ง เราจะสมมติให้สายตัวนำมีลักษณะเป็นท่อโลหะ กลวง วางซ้อนอยู่กับสายตัวนำที่เป็นเคเบิลคิดเป็น 1 เฟส หาค่าความจุได้จาก

$$C = \frac{\pi \epsilon_0}{d} \quad (F/m) \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$r$	คือ รัศมีของสาย	.....เมตร
	$d$	คือ รัศมีภายในของสาย	.....เมตร
	$\epsilon_0$	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	$= 8.854 \times 10^{-12}$ .....F/m

และค่าความเหนี่ยวนำของสายกับท่อโลหะหาได้จาก

$$L = \frac{\mu_o}{\pi} \ln \frac{d}{r} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\mu_o$  ความซึมซาบสัมพัทธ์แม่เหล็กของสายและเมื่อแทนค่านี้ลงในสมการ จะได้ความเร็วเท่ากับ

$$LC = \mu_o \epsilon_o \quad \text{หรือ} \quad v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_o \mu_o}} \quad (2.23)$$

ซึ่งเป็นความเร็วของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศ คลื่นนี้โดยทั่วไปจะขนานกับสายส่งถ้าไม่คิดสนามแม่เหล็กภายในความเร็วในการแพร่กระจายคลื่นบนสาย แบบเปิดจะมีความเร็ว น้อยมากในสูญญากาศในทางอุดมคติแล้วทุกรูปคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลง ความเร็วในการแพร่กระจายคลื่นจะเปลี่ยนไปด้วย ในกรณีที่สายส่งมีความซึมซาบแม่เหล็กมากกว่าหนึ่งความเร็วจะลดลงถ้าวัสดุไดอิเล็กตริก ระหว่างตัวนำมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมากกว่าสูญญากาศค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งมีผลทำให้ความเร็วลดลง ไม่ว่าสายเคเบิลนั้นจะเป็นของแข็งหรือของเหลว ตัวอย่างเช่น ในสายเคเบิลมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก คือ  $k\epsilon_o$  ซึ่ง  $k$  มีค่าประมาณ 3 ถึง 5 หรืออาจมากกว่านั้น ดังนั้นความเร็วคลื่นที่เดินทางจะลดลง โดยตัวประกอบของ  $\frac{1}{\sqrt{k}}$  จะเห็นได้ว่าความเร็วจะช้าลงไปกว่าครึ่ง สำหรับสายที่ใช้อากาศเป็นฉนวน

### 2.3.2 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

จากสมการ แสดงอัตราส่วนของแรงดันกับกระแสไฟฟ้า ในเทอมของความเร็วในการแพร่กระจายคลื่น และเมื่อความเร็วของคลื่นคือ คุณลักษณะของสายส่ง ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับรูปคลื่น นั่นคืออัตราส่วนของ  $E$  กับ  $I$  ซึ่งเรียกว่า อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ของสายส่งหรือ เสรีจอร์อิมพีแดนซ์ของสายส่งซึ่งแทนด้วย  $Z_0$  จากสมการ เมื่อกำจัด  $v$  ออกจะได้

$$Z_0 = \frac{E}{I} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.24)$$

เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายไปยังปลายขั้วของสายส่งระยะไกล ด้วยกระแสไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้า จะทำให้ได้ค่าความต้านทานในวงจร โคนสมมุติให้ไม่มีความสูญเสียและเกิดคลื่นที่ไม่ต่อเนื่องบนสาย

คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของสายส่งที่ควรคำนึงถึง คือพลังงานไฟฟ้าที่ความยาวสายเท่ากัน จะมีค่าเท่ากับ โดยพลังงานทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน

$$LI^2 = CE^2 \quad (2.25)$$

แต่พลังงานแม่เหล็กในหน่วยความยาวของสาย คือ  $\frac{1}{2}LI^2$  และพลังงานไฟฟ้าที่ความยาวสายเท่ากันจะต้องมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{2}CE^2$  โดยพลังงานทั้งสองจะต้องมีค่าเท่ากัน

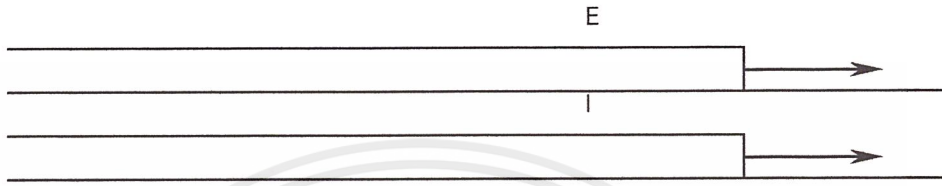
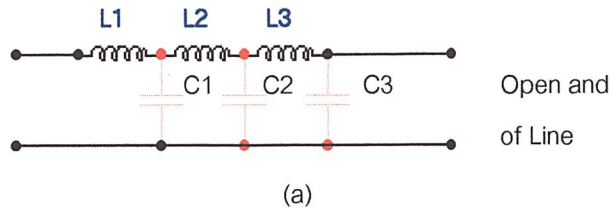
### 2.3.3 พฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นที่ปลายสาย

ชนิดของการเกิดคลื่นที่ไม่มีความสม่ำเสมอ ซึ่งมีความแตกต่างกันชัดเจน ในลักษณะที่เป็นอิมพีแดนซ์ โดยสามารถเห็นพฤติกรรมของคลื่นได้เป็นอย่างดี ในกรณีที่ปลายสายถูกัดวงจร กับกรณีปลายสายเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 การสะท้อนกรณีปลายสายเปิด

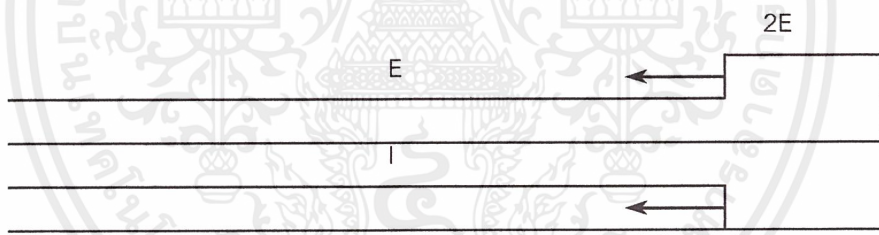
การแพร่กระจายจะถูกจำกัดด้วยการเดินทางของคลื่นอย่างต่อเนื่องโดยไม่คิดค่าความสูญเสียของพลังงานตลอดช่วงความยาวของสายส่งที่พิจารณา ในรูปที่ 2-5 แสดงลักษณะของคลื่นจรที่เกิดขึ้นจะราบเรียบถ้าค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้ามีค่าไม่รู้จำกัด รูปที่ 2-5(b) แสดงคลื่นสัญญาณที่สม่ำเสมอของคลื่นแรงดันและคลื่นกระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกับที่ปลายสาย โดย  $L_2$  จะจ่ายกระแสไฟฟ้า แต่  $L_3$  จะไม่จ่าย  $C_2$  จะเริ่มอัดประจุจนมีค่าเท่ากับ  $E$  แรงดันที่ตกคร่อม  $C_2$  จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน  $L_3$  โดยทันที จนมีค่าเท่ากับ  $L_2$  และแรงดันของ  $C_2$  จะเท่ากับ  $E$  คลื่นพลังงานชั่วขณะจะมาถึงปลายสาย ดังรูปที่ (c) ในเวลานี้ ค่าความจุไฟฟ้าทุกตัวจะมีค่าเท่ากับ  $E$  และค่าความเหนี่ยวนำ ทุกตัวจะส่งกระแสไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับ  $I$  อย่างไม่ต่อเนื่อง  $L_3$  จะส่งกระแสไฟฟ้าไปยัง  $C_3$  เมื่อไม่มีความเหนี่ยวนำตัวต่อไป  $C_3$  จะเกิดการอัดประจุไฟฟ้าเกิน โดยที่  $L_3$  จะไม่มีการหยุดส่งกระแสไฟฟ้าจนกระทั่งหมดพลังงานแม่เหล็ก  $L_3$  จะขับกระแสอย่างต่อเนื่องไปที่  $C_3$  จนแรงดันตกคร่อม ตัวมันมีค่าเป็นสองเท่าหรือเท่ากับ  $2E$  กระแสไฟฟ้าจะหยุดไหลโดยสามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ (d) จะเห็นได้ว่ามีแรงดันตกคร่อม  $C_3$  เท่ากับ  $2E$  และกระแสไฟฟ้าที่  $L_3$  จะเป็นศูนย์



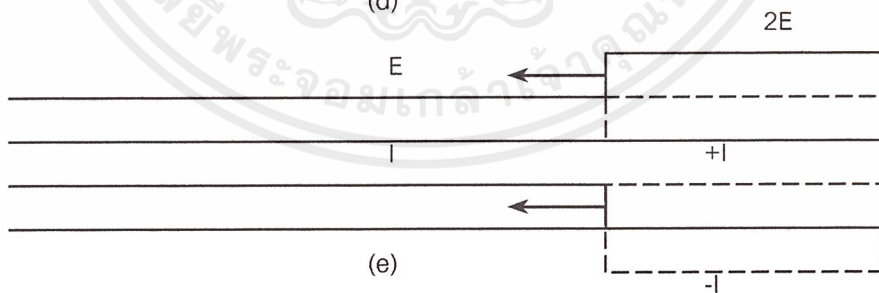
(b)



(c)



(d)



(e)

รูปที่ 2-5 แสดงลักษณะคลื่นจรบนสายส่งที่ปลายสายเปิด

เมื่อ  $L_3$  มีการส่งผ่านกระแสไฟฟ้ากระแสทั้งหมดจะได้รับมาจาก  $L_2$  และส่งไปยัง  $C_2$  ทำให้มีค่าแรงดันเป็นสองเท่าและกระแสไฟฟ้าที่  $L_2$  จะมีค่าเป็นศูนย์ตลอดเวลาแรงดันไฟฟ้าจะเท่ากับปลายทั้งสองของ  $L_3$  และ  $C_3$  จะเกิดการอัดประจุไฟฟ้าเกิน โดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ แสดงได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 2-5(e) นั่นคือแรงดันตกคร่อม  $C_2$  และ  $C_3$  จะมีค่าเท่ากับ  $2E$  และกระแสไฟฟ้าใน  $L_2$  และ  $L_3$  จะเป็นศูนย์ ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างนี้ ต่อเนื่องกันไปจากขวาไปซ้าย เป็นปรากฏการณ์เมื่อคลื่นจรไปถึงปลายสายที่เปิด คลื่นจรจะสะท้อนจากปลายสายและดำเนินไปในทิศทางตรงข้าม ดังเส้นประ ที่แสดงในรูปที่ 2-5(e) เป็นคลื่นของแรงดันที่เดินทางไปทางซ้ายด้วยค่าแรงดันเท่ากับ  $E$  แต่การสะท้อนของคลื่นกระแสจะเป็นลบ  $-I$  ซึ่งเมื่อรวมกับกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดคลื่นแล้วจะมีค่าเป็นศูนย์ หน้าคลื่นกระแสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-5(e) ซึ่งมีทิศทางไปทางซ้ายตรงข้ามกับการไหลของกระแสไฟฟ้าปกติ ที่จะไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า ไปยังปลายสายเปิดมีลักษณะราบเรียบ หลังจากเกิดการสะท้อนขึ้นในส่วนของสาย ด้วยต่อเนื่องในการส่งกระแสไฟฟ้า นี่คือการแพร่กระจายของหน้าคลื่นกระแสซึ่งไม่ใช่กระแสไฟฟ้าจริง เพราะมีทิศทางตรงข้าม เมื่อคลื่นเกิดการสะท้อน

ความเป็นไปได้ของคลื่นสะท้อน ขึ้นอยู่กับสมการอนุพันธ์สายส่ง แม้ว่าไม่สามารถแสดงได้อย่างชัดเจน เช่น ลักษณะของคลื่นสะท้อนที่จะเดินทางจากขวาไปซ้าย ตามฟังก์ชัน  $(x + vt)$  เหมือนกับสมการ นั่นคือความเร็ว  $-v$  มีลักษณะเป็นลบของรากที่สองของสมการ แต่เมื่อความเร็วเป็นลบในสมการ และเมื่อแทน  $-\frac{1}{\sqrt{LC}}$  ลงใน  $+\frac{1}{\sqrt{LC}}$  เครื่องหมายของอัตราส่วนแรงดันและกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง คลื่นสะท้อนจะเดินทางจากขวาไปซ้ายดังนั้น

$$\frac{e}{i} = -\sqrt{\frac{L}{C}} \tag{2.26}$$

เครื่องหมายลบนั้นคือกระแสไฟฟ้าจะไหลจากขวาไปซ้ายดังนั้นกระแสไฟฟ้าบวกก็จะไหลจากซ้ายไปขวาเท่านั้น ถ้าแรงดันไฟฟ้าบวกเกิดขึ้นจากประจุไฟฟ้าที่เป็นบวก บนสายส่งที่จ่ายกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากซ้าย กระแสไฟฟ้าจะเป็นบวก และถ้าประจุที่เท่ากันเกิดจากกระแสที่ไหลจากทางขวา กระแสไฟฟ้าจะเป็นลบ จากคลื่นในรูปจะเห็นว่า

$$i = 0 \tag{2.27}$$

เมื่อให้ความยาวของสายเท่ากับ  $D$  และกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ปลายด้านรับแทนด้วยตัวห้อย  $r$  ดังนั้นจะได้กระแสไฟฟ้าที่ปลายสายเปิดเท่ากับ

$$i_r = i_1(D - vt) + i_2(D + vt) = 0 \tag{2.28}$$

ซึ่งเป็นฟังก์ชันตามเวลาของกระแสไฟฟ้าที่ปลายด้านรับของสาย ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ คลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อน ดังนั้นเมื่อรวมกันแล้วจะมีค่าเป็นศูนย์

$$i_2(D + vt) = -i_1(D - vt) \quad (2.29)$$

คลื่นทั้งสองจะต้องเท่ากันและมีทิศทางตรงกันข้าม ฟังก์ชัน  $i_2$  จะต้องเท่ากับคลื่นของฟังก์ชัน  $i_1$  แต่จะเป็นขั้วลบ และเดินทางไปในทิศทางตรงกันข้าม เนื่องจากฟังก์ชันทั้งสองไม่เท่ากันเพราะรูปคลื่นจะกลับกัน และไม่ได้เริ่มส่งที่ปลายด้านส่งที่เวลาเท่ากับศูนย์ โดยไปถึงปลายด้านรับที่เวลา  $\frac{D}{v}$  คลื่น  $i_2$  จะมีปริมาณเท่ากับ  $[2D - (x + vt)]$  ดังนั้น  $i_2$  จะเท่ากับ  $(x - vt)$  ในการวิเคราะห์คลื่นสะท้อนจะเป็นไปตามสมการ และ กระแสไฟฟารวมบนสายคือ

$$i(x, t) = i_1(x - vt) + i_2(x + vt) \quad (2.30)$$

จะทำให้ได้ค่า  $i_2$  เท่ากับ

$$i_2(x, t) = -i_1[2D - (x + vt)] \quad (2.31)$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าคลื่นตกกระทบ เป็น

$$i_1 = -(x - vt)e^{x - vt}$$

จะได้คลื่นสะท้อนเท่ากับ

$$i_2 = +[2D - (x + vt)]e^{2D - (x + vt)}$$

ตัวอย่างการสะท้อนของคลื่นจรกรณีปลายสายส่งเปิดวงจร แสดงดังรูป 2-6

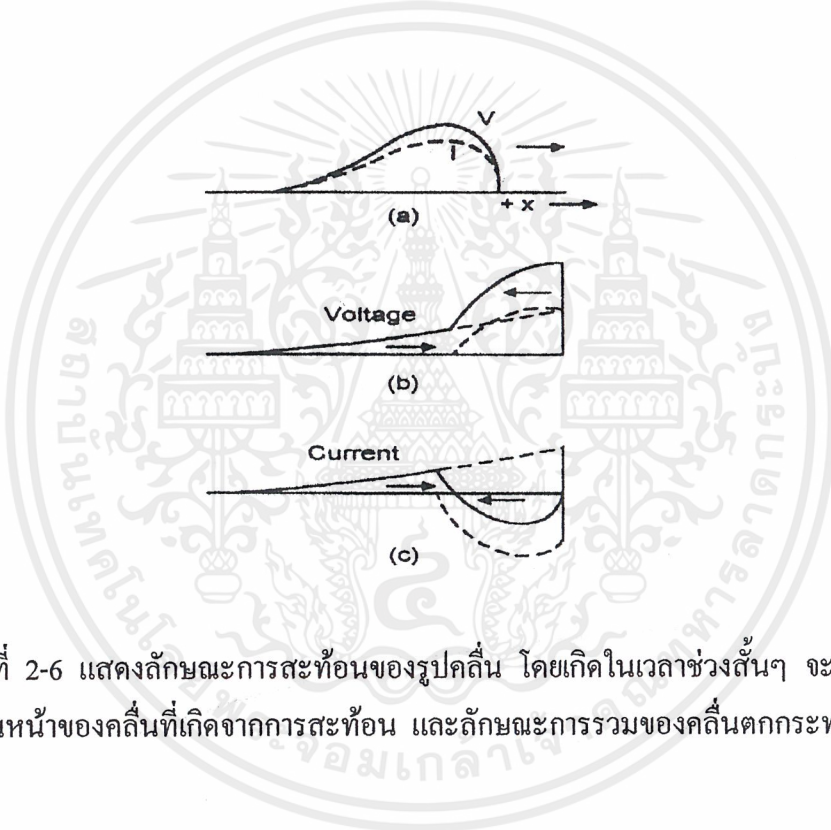
$$i_1 = \sin(x - vt)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นคลื่นสะท้อน คือ

$$i_2 = -\sin[2D - (x + vt)]$$

แรงดันไฟฟ้าของคลื่นสะท้อนจะสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าของคลื่นสะท้อน ดังสมการ นั่นคือ กระแสไฟฟ้าของคลื่นสะท้อนจะตรงข้ามกับกระแสของคลื่นตกกระทบ ส่วนแรงดันไฟฟ้านั้นจะมีค่าเท่ากัน ซึ่งแรงดันรวมคือผลบวกของคลื่นทั้งสอง ดังสมการ



รูปที่ 2-6 แสดงลักษณะการสะท้อนของรูปคลื่น โดยเกิดในเวลาช่วงสั้นๆ จะแสดงดังรูป (b) เป็นส่วนหน้าของคลื่นที่เกิดจากการสะท้อน และลักษณะการรวมของคลื่นตกกระทบ กับคลื่นสะท้อน

### 2.3.5 การสะท้อนเมื่อต่อค่าความจุไฟฟ้า

ถ้าทำการต่อคอนเดนเซอร์เข้าที่ปลายขั้วของสาย มันจะเกิดการอาร์ค เหมือนลัดวงจร ขณะที่คลื่นตกกระทบเคลื่อนที่มาถึง ที่เวลานี้คลื่นสะท้อนแรงดันจะมีค่าเป็นลบ แรงดันไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ชั่วขณะ และกระแสของคลื่นตกกระทบในขณะนี้จะป็นสองเท่า นั่นคือ คอนเดนเซอร์จะได้รับการอัดประจุจนเต็ม ทำให้แรงดันที่ขั้วมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะนี้จะมีคุณสมบัติเหมือนเปิดวงจร ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ขั้วในขณะนี้จะป็นศูนย์และแรงดันไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบจะเป็นสองเท่า ในการวิเคราะห์จะเหมือนกับกรณีปลายสายต่ออยู่กับความเหนี่ยวนำ ผลที่เกิดขึ้นกรณีนี้ที่สายต่ออยู่กับคอนเดนเซอร์ ในทางปฏิบัติมีความสำคัญมาก ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้เนื่องจากวัตถุที่มีความผิดปกติ สำหรับคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงนั้น จะมีค่าความจุไฟฟ้า น้อยกว่าค่าความเหนี่ยวนำแรงดันฟ้าผ่าที่หม้อแปลงจะมีลักษณะเหมือนคลื่นจร และหน้าคลื่นจะมีความชันที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมาก ในทางปฏิบัติไม่สามารถหาช่วงเวลาทีกระแสไฟฟ้าเริ่มไหลผ่านความเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ของขดลวดหม้อแปลงได้ แต่ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดแต่ละรอบ และจากขดลวดกับแกนเหล็ก ซึ่งเป็นผลเนื่องจากฟ้าผ่านั้นสามารถหาได้

### 2.3.6 ความเร็วในการเดินทางของคลื่น

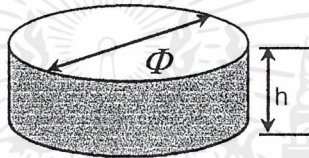
คลื่นจรจะมีความเร็วในการเดินทางที่จำกัดซึ่งสามารถหาได้จากพารามิเตอร์ของสายส่งเท่ากับ  $\frac{1}{\sqrt{LC}}$  จากค่าเริ่มต้นและเปลี่ยนไปจนอยู่ในสภาวะคงตัว คลื่นไซน์(sine) ของความถี่ต่ำที่เกิดขึ้น จะช้ากว่าคลื่นไซน์ ที่ความถี่สูง แต่เมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวแล้วจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งในความเป็นจริงนั้นมันไม่ใช่ความเร็ว และความผิดเพี้ยน ถ้าเราไม่คำนึงถึงความสัมพันธ์ของ R , G , L และ C แล้วจะได้ความเร็วของคลื่นรวมเท่ากับ  $\frac{1}{\sqrt{LC}}$  เมื่อคลื่นรูปไซน์ ในสภาวะที่คงตัวมีความผิดเพี้ยน พลังงานจะย้ายจากหน้าคลื่น ไปรวมอยู่หลังคลื่น ด้วยค่าที่ผิดเพี้ยน

ชนิดของความผิดเพี้ยนจะไม่ปรากฏออกมา ในลักษณะที่ผิดเพี้ยนแต่มันจะทำให้ความเร็วในสภาวะคงตัวเกิดการเปลี่ยนแปลง ยิ่งกว่านั้นอาจเปลี่ยนตำแหน่งในคลื่นไซน์ ได้ถ้าในสภาวะคงตัวคลื่นไม่เป็นรูปไซน์ นั่นคือมันเกิดความผิดเพี้ยน เช่นในองค์ประกอบของรูปไซน์ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็ว คลื่นจรเดี่ยวจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลย

## 2.4 การนำเมทัลออกไซด์ไปใช้งาน

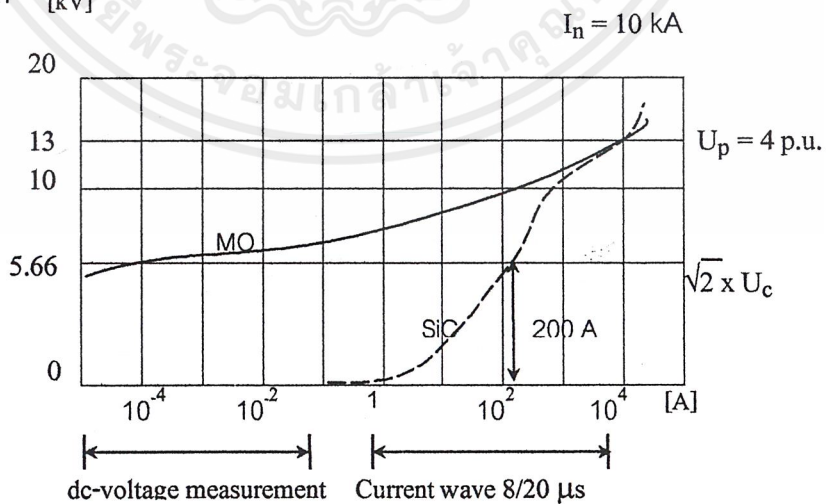
### 2.4.1 คุณสมบัติของเมทัลออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์รีซิสเตอร์ มีชื่อเรียกเป็นศัพท์ทางเทคนิคว่า เมทัลออกไซด์รีซิสเตอร์ (Metal Oxide resister ; MO) เป็นเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำที่ถูกพัฒนาให้เป็นวัสดุที่สามารถทนแรงดันสูงๆ เนื่องจาก เมทัลออกไซด์ เป็นวัสดุที่มีความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นสูง นั่นคือมีค่าความต้านทานสูงเมื่อมีขนาดแรงดันต่ำๆ และเมื่อเพิ่มค่าแรงดันให้สูงขึ้น ค่าความต้านทานจะต่ำลง



รูปที่ 2-7 แสดงลักษณะรูปทรงของเมทัลออกไซด์

รูปทรงของเมทัลออกไซด์จะผลิตออกมาในรูปทรงกระบอกมีค่าเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงไม่มากนัก ขนาดของเมทัลออกไซด์แสดงถึงความสามารถในการรับพลังงาน ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางมีค่ามากจะสามารถดูดซับพลังงานได้มาก ส่วนความสูงบอกถึงขนาดพิกัดแรงดันของ เมทัลออกไซด์ที่สามารถทนได้ [kV]



รูปที่ 2-8 กราฟเซมิล็อก ( Semi-Logarithmic ) แสดงคุณลักษณะ โวลต์กับกระแส

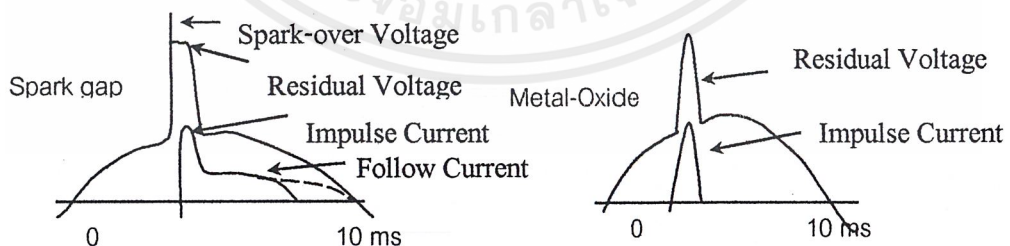
(V-I Characteristics) ของเมทัลออกไซด์ , ซิลิคอนคาร์ไบด์ สำหรับค่า  $U_c = 4 \text{ kV}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $I_n$  : กระแสดีสชาร์ตปกติ (กระแสอิมพัลส์ 8/20  $\mu$ s)  
 $U_p$  : ระดับแรงดันป้องกัน (จากกราฟ  $U_p = 13$  kV ที่  $I_n = 10$  kA)  
 $U_c$  : แรงดันสูงสุดขณะทำงานต่อเนื่อง (rms ต่อเฟส)

ที่สภาวะแรงดัน  $U_c = 4$  kV ค่าแรงดันยอดคลื่นจะมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{2} \times U_c = 5.66$  kV จากรูปที่ 2-8 จะได้กระแสไหลเพียง 0.1 มิลลิแอมป์ ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากค่าความต้านทานที่ได้จากการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ กระแสที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.5 มิลลิแอมป์ เป็นเพราะผลของค่าความจุ ในขณะเดียวกันเปรียบเทียบกับซิลิคอนคาร์บายด์ ที่มีค่าความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นต่ำกว่าเมทัลออกไซด์ กระแสที่ได้จะมีค่าสูงถึง 200 แอมป์ เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความร้อน ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้เมทัลออกไซด์ใช้ทำวัสดุในการผลิตกับดักฟ้าผ่ามากกว่าการใช้ซิลิคอนคาร์บายด์

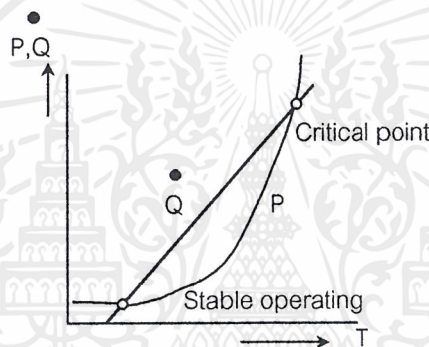
ภายในตัวของกับดักฟ้าผ่าจะประกอบด้วย เมทัลออกไซด์ วางซ้อนกันในลักษณะต่ออันดับกัน และถูกห่อหุ้มด้วยเปลือกนอกที่เป็นฉนวนทำจากกระเบื้อง (Porcelain) เมื่อเกิดแรงดันเกินจากฟ้าผ่าที่จุดต่อกับดักฟ้าผ่า กับดักฟ้าผ่าจะนำกระแสไหลผ่านตัวเองลงดิน เมื่อแรงดันลดลงเข้าสู่สภาวะปกติที่พิกัดแรงดัน กระแสที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าจะกลับสู่สภาวะปกติ ในกรณีของซิลิคอนคาร์บายด์ เมื่อขนาดแรงดันเกินลดลงแล้ว จะยังมีกระแสไหลอยู่ เรียกว่ากระแสไหลตาม (Follow Current) ดังรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 แสดงลักษณะกระแสที่เกิดขึ้น เมื่อมีแรงดันเกินจากฟ้าผ่า

## 2.4.2 ปัญหาทางด้านเสถียรภาพของกับดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคไซค์

จากรูปที่ 2-10 กำลังสูญเสีย (P) ของกับดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคไซค์ในสภาวะการใช้งานที่แรงดันช่วงทำงานต่อเนื่อง โดยค่ากำลังสูญเสียจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล และค่ากำลังสูญเสีย จะแปรผันตามค่าอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเกินจุดวิกฤต (Critical point ) อุณหภูมิ (Q) ความร้อนจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งกับดักฟ้าผ่าไม่สามารถทนได้ ดังนั้นการใช้งานกับดักฟ้าผ่าให้มีเสถียรภาพจำเป็นจะต้องรักษาอุณหภูมิความร้อนให้อยู่ที่จุดทำงานที่มีเสถียรภาพ (Stable operating point )



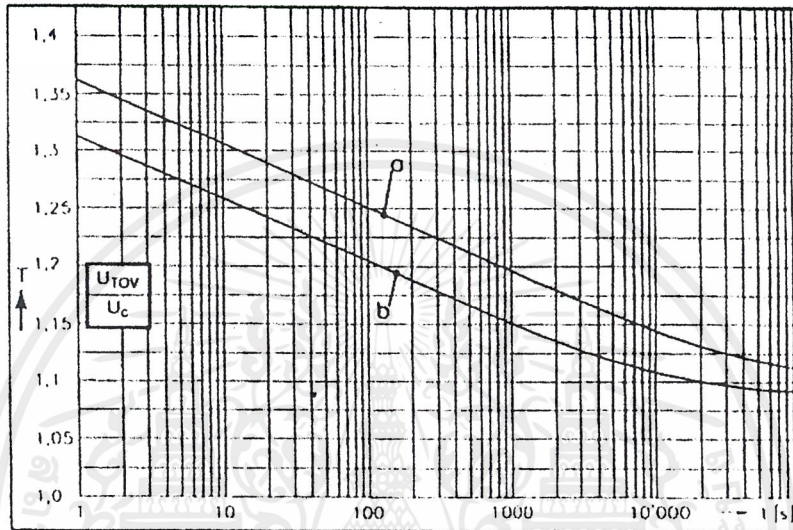
รูปที่ 2-10 การสูญเสียกำลังไฟฟ้าของเมทัลลอคไซค์ และความร้อนที่เกิดในตัวเมทัลลอคไซค์

## 2.4.3 แรงดันเกินชั่วคราว

เป็นที่ทราบกันว่าแรงดันเกินชั่วคราว ( U<sub>TOV</sub> ) เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่จำกัด และถ้าแรงดันเกินชั่วคราว มีค่าสูงเกินกว่าพิกัดของกับดักฟ้าผ่าจะเกิดการอาร์ค จะมีกระแสไหลตามไหลผ่านกับดักฟ้าผ่า ดังนั้นระยะแกปจึงมีความสำคัญโดยป้องกันไม่ให้เกิดอาร์คในกับดักฟ้าผ่าเนื่องจากแรงดันเกินชั่วคราว

ปัญหาดังกล่าวจะไม่เกิดในกับดักฟ้าผ่าที่ใช้เมทัลลอคไซค์เพราะมีค่าความคงทน (T) ต่อแรงดันเกินสูง ค่าความคงทนของกับดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคไซค์ แสดงรายละเอียดในรูปที่ 2-11 โดยกำหนดให้

$$T = \frac{U_{TOV}}{U_c} \quad (2.32)$$



รูปที่ 2-11 ค่าความคงทน มีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับแรงดันเกินชั่วคราว ในช่วงเวลา (t) ใดๆ ที่อุณหภูมิโดยรอบ (Ambient temperature) 45 °C

Curve a : เป็นเส้นที่ใช้กับกับดักฟ้าผ่าแบบ ไม่มี โหลด

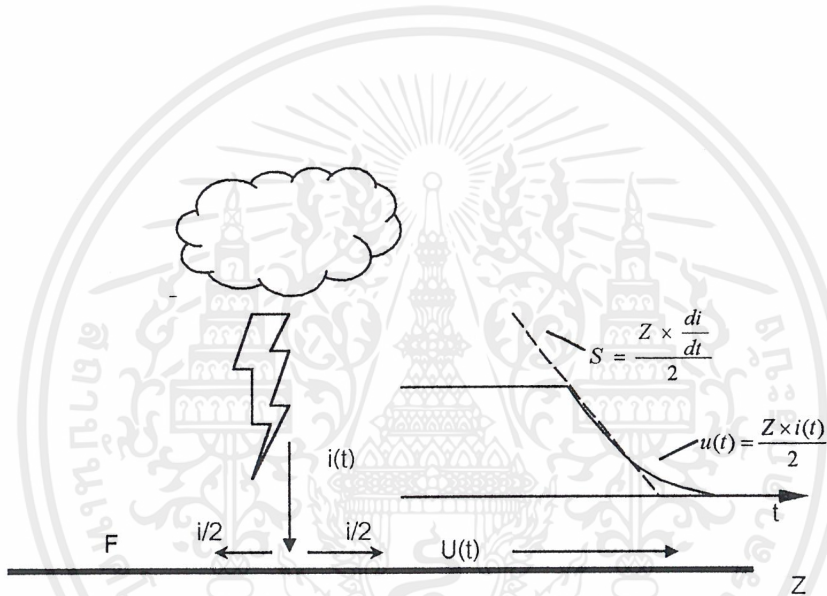
Curve b : เป็นเส้นที่ใช้กับกับดักฟ้าผ่าแบบมี โหลด จากค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของกับดักฟ้าผ่า (E)

E : ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของกับดักฟ้าผ่า มีหน่วยเป็น kJ/kV.U<sub>c</sub>

t : ช่วงเวลาการเกิด แรงดันสูงเกิน โดยปกติจะใช้ เส้น b ในการเลือกค่าความคงทนเพื่อความปลอดภัย

## 2.5 การทำนายความชันหน้าคลื่นจากแรงดันสูงเกินชั่วขณะในระบบ

รูปที่ 2-12 แสดงการเกิดฟ้าผ่าลงบน ตัวนำของระบบสายส่ง กระแสที่ฟ้าตกลงมาแสดงให้เห็น โดย ฟังก์ชันของเวลา  $[i(t)]$  จากจุดที่ฟ้าผ่าลงมาที่สายตัวนำกระแสฟ้าผ่าไหลออกในทิศทางทั้งสอง กระแสหารสอง ถ้า  $Z$  คือความต้านทานฟ้าผ่าของสายตัวนำกับสายดินแล้วนั้น กระแสที่เกิดจากแรงดันสูงเกิน  $[u(t)]$  ด้วยความชันของแรงดันที่เพิ่มขึ้น  $[S(t)]$  ระหว่างตัวนำและดิน ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2-12 แรงดันสูงเกินเนื่องจากฟ้าผ่าลงบนสายส่งเหนือศีรษะ

- F : สายส่งเหนือศีรษะ
- Z : ความต้านทานฟ้าผ่า ของ F
- t : เวลา
- $di/dt$  : ค่าความชันสูงสุดของ  $i(t)$
- $u(t)$  : แรงดันฟ้าผ่าสูงเกิน ในรูปฟังก์ชันเวลา
- S : ค่าความชันสูงสุดของ  $u(t)$
- $i(t)$  : กระแสทั้งหมดที่ฟ้าผ่าลงมา ในรูปฟังก์ชันเวลา

รูปที่ 2-12 นี้ค่าเวลาไม่คงที่ในค่าความชันสูงสุดที่ตามมาของคลื่นแรงดันสูงเกินแสดงให้เห็นโดยค่าความชันใน 10 เปอร์เซ็นต์ ของฟ้าผ่าทั้งหมดกระแสสูงสุดที่ผ่าลงมาเปลี่ยนแปลงตาม  $di/dt$  มีค่ามากกว่า 32 กิโลโวลต์ต่อไมโครวินาที เมื่อ  $Z$  มีค่า 450 โอห์ม ในทุกๆ 10 ครั้งฟ้าผ่าลงมา เป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าความชันสูงสุดมากกว่าหรือเท่ากับ 720 กิโลโวลต์ต่อไมโครวินาที อัตราแรงดันที่เพิ่มขึ้นที่สถานีย่อยเมื่อเกิดฟ้าผ่าลงมาที่จุดไกลจากสถานี เนื่องมาจากผลของโคโรน่า หน้าคลื่นของแรงดันสูงเกินนั้นแพร่มาจากจุดที่ฟ้าผ่าลงมามุ่งหน้ามาที่สถานี ถ้า  $S_0$  คือความชันที่จุดผ่าลงมา ความชันจะลดลงตามค่าความยาวสายส่ง

$$S = \frac{1}{\frac{1}{S_0} + K \times d} \quad (2.33)$$

ค่าคงที่ (K) นี้ขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติทางเรขาคณิตของสายส่งเหนือศีรษะ ค่าโดยประมาณ  $K = 5 \times 10^{-6} \mu\text{s/kV} \cdot \text{m}$  สำหรับระบบแรงดันขนาดกลาง สมมุติว่า ที่จุดที่ฟ้าผ่าลงมา  $d = 135 \text{ m}$  จากสถานี แรงดันฟ้าผ่าลงมา มีค่ามากกว่าหลายในชวงหน้าคลื่นสอกลดคล้องกับสูตรที่ให้มา ความชันเนื่องมาจากโคโรน่าที่สถานีจะมีค่าน้อยกว่า  $1500 \text{ kV}/\mu\text{s}$  ความน่าจะเป็นที่ฟ้าผ่าลงมาที่จุด  $d = 135 \text{ m}$  อยู่ที่ 0.01 ต่อปี ในสถานีส่งจ่ายแรงดันขนาดกลาง ค่าความชันแรงดันฟ้าผ่าสูงเกิน คาดว่าเป็น 1500 กิโลโวลต์ต่อไมโครวินาที

ตารางที่ 2-1 ค่าความชันที่คาดว่าจะเป็นไปได้ ค่าความชัน จากแรงดันสูงเกินจากฟ้าผ่าในระบบสถานีส่งแรงดันขนาดกลาง แสดงค่าความชัน ในค่าเฉลี่ยที่คาดว่าจะเป็นในช่วงเวลาหยุดพัก

ชนิดของสายส่งเหนือศีรษะ	เสาไม้ค้ำ 3000 kV แรงดันวาวไฟ		20 MV ระบบ โครงข่าย โครงเหล็ก	
	1	2	1	2
ช่วงเวลาหยุดพัก $t_s$ [ ปี ]	S[kV/ $\mu$ s]	S[kV/ $\mu$ s]	S[kV/ $\mu$ s]	S[kV/ $\mu$ s]
600	1940	1850	1060	820
400	1630	1530	920	730
300	1450	1350	820	660
200	1200	1100	700	580
100	820	660	520	440

- หมายเหตุ 1. ในกรณีฟ้าผ่า 1 เฟส  
2. ในกรณีฟ้าผ่า 3 เฟส

ค่าช่วงเวลาหยุดพัก ในตารางที่ 2 อธิบายภายใต้ สมมุติฐาน ฟ้าผ่า 8 ครั้ง ต่อปี ต่อ 100 กิโลเมตร ของระบบสายส่ง สำหรับค่าช่วงเวลาหยุดพัก เป็นเพียงค่าที่ฟ้าผ่าลงมาภายใน 300 เมตร ของสถานีส่งจ่าย

ในค่าเวลาที่หยุดพัก 400 ปี ของช่วงเวลาหยุดพัก เป็นค่าที่ถูกใช้สำหรับอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ในส่วนข้างนอกของระบบสถานีส่งจ่าย อย่างไรก็ตามค่าที่ตามมาจากรายการที่ 2 สำหรับค่ายอดคลื่นและค่าความชันสำหรับค่าแรงดันสูงเกินที่เข้ามาที่สถานีส่งจ่ายในสมมุติฐานที่ฟ้าผ่า 8 ครั้งต่อปี ต่อ 100 กิโลเมตรบนระบบส่งจ่ายที่หลายๆเฟสพร้อมกัน มีน้อยกว่าเฟสเดียวบนค่าเฉลี่ย ค่าความชันมีค่ามากขึ้นทุกปีค่าฟังก์ชันเวลาของแรงดันสูงเกินเพิ่มแบบพาราโบลาโบร่าและค่าความชันเพิ่มเมื่อค่าแรงดันยอดคลื่นเพิ่ม

$$U(t) = \frac{t^2 \times S^2}{4 \times U} \quad (2.34)$$

สมการที่ (2.34) อธิบายสำหรับ ค่าเวลาหยุดพัก  $0 \leq t \leq 2 \times U/S$  เมื่อ  $U = 660 \text{ kV}$  นี้เป็นสมมุติฐานสำหรับจุดต่อแบบจุดต่อสายด้วยเสา โครงเหล็กนี้เป็นค่าประมาณแรงดันวาวไฟของฉนวนสาย 20 กิโลเมตร เมื่อใส่ค่าความชัน และแรงดันยอดคลื่นลงในสมการที่ (2.34) แล้วจะได้ค่าแรงดันสูงเกิน  $[U(t)]$  ภายใต้ออกมา สำหรับทั้งสองชนิดของสายส่ง ขอบเขตของแรงดันสูงเกินที่กั๊กฟ้าผ่าที่แรงดันยอดคลื่นค่าที่มากกว่าของค่าความชันในแบบจุดต่อสายด้วยเสาไม้ ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของป้องกันครอบคลุมระยะทางของกั๊กฟ้าผ่า ถึงกระนั้นก็ตาม ระยะทางที่ครอบคลุมการป้องกันสำหรับสายทั้งสองชนิดนี้แตกต่างกัน เหตุที่น่าจะเป็นในความแตกต่างนี้อาจมาจากความสูงของ แรงดันยอดคลื่นของคลื่นแรงดันสูงเกินที่เข้ามา เมื่อกระแสฟ้าผ่าผ่านเข้ามาที่ กั๊กฟ้าผ่าจะมีค่ายอดคลื่นสูงสุดที่ค่ากระแส

$$i = \frac{2 \times U - U_p}{Z} \quad (2.34)$$

อย่างไรก็ตามในกรณีของจุดต่อสายด้วยเสาไม้ ( $U = 3000 \text{ kV}$ ) เมื่อ  $Z$  มีค่า 450 โอห์ม ที่ กระแส 13 กิโลแอมป์ สามารถรับได้ ในส่วนของจุดต่อสายด้วยเสาโครงเหล็ก ( $U = 660 \text{ kV}$ ) กระแสที่เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต่ำกว่า 3 กิโลแอมป์ ความแตกต่างนี้มีอิทธิพลต่อขอบเขตของแรงดันที่ กัปดักฟ้าผ่า อิทธิพลที่มีต่อระยะครอบคลุมการป้องกันอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ชนิดและวิธีการจัดเรียงของกัปดักฟ้าผ่า ใ้ค่าระดับการฉนวนชั่วขณะพื้นฐาน และระดับการป้องกันที่แท้จริง และค่าที่นอกจากนี้ของค่าความชันจะได้ผลลัพธ์ที่ได้ของระยะทางครอบคลุมการป้องกัน

$L = 2.3 \text{ m}$  ในกรณีของจุดต่อสายบนเสาไม้

$L = 4.5 \text{ m}$  ในกรณีของจุดต่อสายบนเสาโครงเหล็ก

ค่านี้ถูกต้องสำหรับสมมุติฐานอย่างง่าย ๆ ตามรูปที่ 2-12 อย่างไรก็ตามเราต้องการค่าที่ถูกต้องซึ่งจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2-12 การเกิดแรงดันสปาร์คที่อุปกรณ์ทางไฟฟ้าในกรณีของหม้อแปลงจะเกิดค่าความจุ (C) ถึงดินเกิดขึ้น เหตุมาจากการสร้างสัญญาณในตัวเองด้วยผลที่เกิดขึ้นจากแรงดันที่หม้อแปลงเพิ่มค่าความจุซึ่งจะเกิดอยู่หน้าระยะการป้องกันที่ครอบคลุมถึงในค่าระยะทางที่ครอบคลุม สมมุติให้กัปดักฟ้าผ่าทำงานมีสภาพความเป็นตัวนำเพียงอย่างเดียวเมื่อแรงดันจุดต่อเพิ่มขึ้นกรณีนี้เป็นของ กัปดักฟ้าผ่าแบบมีแถบเพียงอย่างเดียว กัปดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคไฮค์แบบไม่มีแถบจะมีสภาพความเป็นตัวนำก่อนที่แรงดันจะเพิ่มขึ้นไปที่ระดับการป้องกันที่แท้จริง อย่างไรก็ตามคุณสมบัติการป้องกันจะเกิดขึ้นเร็วกว่าจุดปกติ อย่างไรก็ตามภายใต้สภาพแวดล้อมที่ชัดเจนกัปดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคไฮค์ ป้องกันอุปกรณ์ทางไฟฟ้าได้ดีกว่า คำนวณระยะทางที่ครอบคลุมการป้องกันของกัปดักฟ้าผ่า สมมุติว่าคลื่นแรงดันสูงเกินที่เพิ่มขึ้นเป็นแบบของพาราโบลา และก่อนที่กัปดักฟ้าผ่าจะยอมให้คลื่นผ่านไปมีค่า  $U_p = 4 \text{ p.u.}$  เมื่อ  $I_n = 5 \text{ kA}$  ด้วย  $b \leq 1 \text{ m}$  ผลลัพธ์ของโครงข่ายนี้แรงดันเพิ่ม ไปถึง 7.2 กิโลแอมป์

$L = 20 \text{ m}$  ในกรณีของจุดต่อสายบนเสาไม้,  $C = 0$

$L = 6 \text{ m}$  ในกรณีของจุดต่อสายบนเสาไม้,  $C = 2 \text{ nF}$

$L = 25 \text{ m}$  ในกรณีของจุดต่อสายบนเสาโครงเหล็ก,  $C = 0$

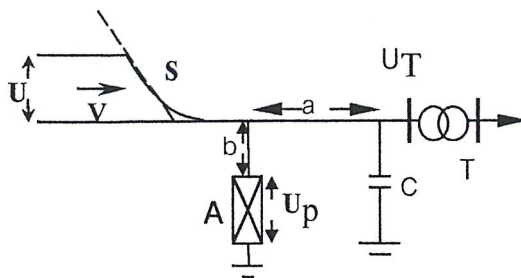
$L = 15 \text{ m}$  ในกรณีของจุดต่อสายบนเสาโครงเหล็ก,  $C = 2 \text{ nF}$

ค่าทั้งสองถูกใช้กับกัปดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคไฮค์แบบมีแถบ อิทธิพลของค่าความจุของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่มีต่อความยาวระยะทางที่ครอบคลุมมองเห็น ระดับของระยะการป้องกันครอบคลุมของกัปดักฟ้าผ่าสำหรับการทำงานของโครงข่ายของ แรงดันสูงสุดเท่ากับ 17.5 กิโลแอมป์ และ 24 กิโลแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

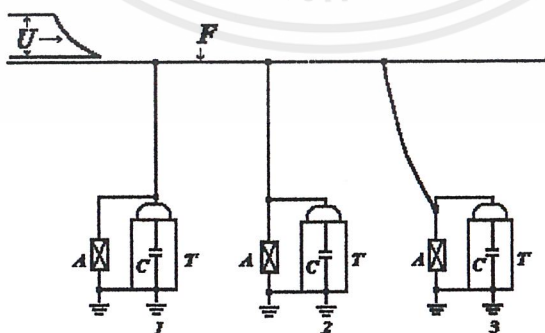
แรงดันสูงเกินที่หม้อแปลง T

- U : คลื่นแรงดันสูงเกินที่เข้ามา
- v : ความเร็วที่แผ่กระจายของ U
- S : ความชันสูงสุดของ U
- A : กับดักฟ้าผ่า
- $U_p$  : ระดับการป้องกันของ A
- a, b : ความยาวของสายต่อ
- T : หม้อแปลง
- C : ความจุของ T ระหว่าง เฟสและดิน
- $U_T$  : แรงดันสูงเกินที่ T



รูปที่ 2-13 แสดงระดับแรงดันป้องกัน

ระยะทางที่ครอบคลุมมากกว่าของกับดักฟ้าผ่าในสายส่ง ก้านแบบเสาโครงเหล็กจากค่าความสูงของแรงดันสูงเกินที่น้อยกว่าวิ่งเข้าสู่ระบบส่งจ่าย (แรงดันวาบไฟจากสายถึงดิน) จากกระแสกับดักฟ้าผ่าที่ต่ำกว่านี้และขอบเขตแรงดันที่ต่ำ ทำให้ผลลัพธ์สามารถใช้ได้ระยะทางที่ครอบคลุมที่ใหญ่กว่าได้ ในระบบโครงข่ายที่แรงดันสูงสุด 12 กิโลโวลต์ ระยะทางป้องกันครอบคลุมของกับดักฟ้าผ่าประมาณค่าที่ได้จะมากกว่า ในกรณีอื่นๆเมื่อแรงดันสูงสุดเท่ากับ 36 กิโลโวลต์ ระยะทางจะสั้นกว่าประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์



1. แย่มาก
2. ดี
3. ดีที่สุด

รูปที่ 2-14 วงจรเสมือนของการต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจัดวางของกับดักฟ้าผ่าและอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

- U: แรงดันสูงเกินที่เกิดจากฟ้าผ่า  
 A: กับดักฟ้าผ่า  
 T: หม้อแปลง  
 C: ความจุของหม้อแปลงจากขั้วถึงดิน

คุณสมบัติการป้องกันของกับดักฟ้าผ่าค่อนข้างจะถูกทำให้น้อยลงด้วยขั้วที่แตกต่างกันของแรงดันสูงเกินจากฟ้าผ่า และค่าชั่วขณะของแรงดันเฟส สิ่งเหล่านี้จะนำไปคำนวณค่าระยะทางที่ครอบคลุม ส่วนเพิ่มเติมการกระตุ้นสั้นๆ ที่จุดต่อระหว่างรากสายดินค้ำนอกของกับดักฟ้าผ่ากับตัวถังหม้อแปลงพิจารณาเมื่อต่อเข้ากับ กับดักฟ้าผ่า ถ้าหม้อแปลงต่อกับขั้วสายแบบเสาไม้

$$b < 1 \text{ m} \quad \text{เมื่อ } U_m \leq 24 \text{ kV}$$

$$b < 0.6 \text{ m} \quad \text{เมื่อ } U_m > 24 \text{ kV}$$

## 2.6 โปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transient Program)

โปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transient Program) เป็น โปรแกรมทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ใช้งานในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

### 2.6.1 โครงสร้างของโปรแกรม

โครงสร้างของโปรแกรม EMTP ซึ่งทำงานภายใต้ระบบดอส(DOS) ประกอบด้วยโปรแกรมย่อยๆ ที่เป็นอิสระจากกัน ดังนี้

1. MT.exe เป็น โปรแกรมหลักที่ใช้ในการคำนวณข้อมูลอินพุตซึ่งจะได้ผลออกมาในรูปแบบของตัวเลขหรือกราฟเก็บไว้ในไฟล์นามสกุล out และ plo
2. MTD.exe เป็น โปรแกรมสำหรับป้อนข้อมูลอินพุต โดยจะเก็บไว้ในไฟล์นามสกุล dat
3. MTLINE.exe เป็น โปรแกรมที่ใช้สำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ของสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. FDDATA.exe เป็นโปรแกรมสำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ของสายส่งชนิดที่จำลองโมเดลแบบพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่(Frequency Dependent Line-Model)
5. MTPLOT.exe เป็นโปรแกรมสำหรับแสดงผลไฟล์นามสกุล plo ออกมาในรูปแบบกราฟ
6. GRAFLASR.com หรือ GRAFPLUS.com เป็นโปรแกรมสำหรับพิมพ์รูปภาพออกมาทางเครื่องพิมพ์

## 2.6.2 ความสามารถในการใช้งาน

โปรแกรม EMTP เป็นโปรแกรมขนาดใหญ่ที่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งระบบไฟฟ้ากำลังและระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง(Power Electronic) ที่สำคัญจะต้องทำการสร้างองค์ประกอบจำลองของอุปกรณ์หรือโมเดลแทนระบบก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถจำแนกความสามารถในการใช้งานแบ่งเป็นหัวข้อใหญ่ๆ ได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์ทรานเซียนต์สำหรับแรงดันเกินฟ้าผ่า(Lightning Overvoltage)แรงดันเกินสวิตช์(Switching Overvoltage) และแรงดันเกินชั่วคราว(Temporary Overvoltage) การวิเคราะห์ในช่วงเวลาสั้นๆ เช่นการวิเคราะห์แรงดันเกินฟ้าผ่าบนระบบจำหน่ายไฟฟ้า การเปิดหรือปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อจ่ายพลังงานให้กับสายส่ง ส่วนการวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วคราวมีช่วงเวลายาวกว่า เช่นการลัดวงจรลงดิน (Unbalance Ground Faults)
2. การวิเคราะห์ในสถานะคงตัว(Steady State)เพื่อใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นก่อนการวิเคราะห์ทรานเซียนต์ เช่นการวิเคราะห์ไหลคไฟฟ้า(Load Flow)
3. การวิเคราะห์ทรานเซียนต์ โคนามิกส์ระบบควบคุมเป็นการวิเคราะห์ที่เหมือนกับการวิเคราะห์ที่ใช้กันมาก่อนโดยอนาล็อกคอมพิวเตอร์
4. การวิเคราะห์เพื่อโมเดลและหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นการหาโมเดลของสายส่ง ระบบจำหน่ายไฟฟ้าในรูปแบบของวงจรสมมูลชนิดพายน์(Equivalent-Pi Circuit)

## 2.6.3 วิธีการป้อนข้อมูลอินพุต

ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะต้องทำการป้อนข้อมูลในแต่ละส่วนต่างๆ สรุปได้ดังนี้

1. Case Identification Card เป็นการกำหนดรายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับหัวเรื่องที่จะทำการวิเคราะห์และการกำหนดค่าของความเหนี่ยวนำกับคาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Time Card เป็นข้อมูลสำหรับการกำหนดช่วงเวลา(Time Step) ในการคำนวณแต่ละครั้ง และเวลาสูงสุดที่จะวิเคราะห์
3. Linear and Nonlinear Branches เป็นข้อมูลของความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และคาปาซิเตอร์ขององค์ประกอบต่างๆ เช่น สายส่ง หม้อแปลง โหลด
4. Switches and Piecewise Linear Components เป็นข้อมูลของสวิตช์ต่างๆ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ รีโคตสเซอร์
5. Sources เป็นข้อมูลของแหล่งจ่ายกระแสหรือแรงดันที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่น เช่น คลื่นรูปไซน์(Sinusoidal Function) รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า(Surge Function)
6. User-Supplied Initial Condition เป็นข้อมูลสำหรับป้อนสถานะเริ่มต้น(Initial Condition) สำหรับการวิเคราะห์ทรานเซียนต์
7. Node Voltages Output เป็นข้อมูลบอกถึงเอาต์พุตที่ต้องการให้แสดงผล
8. Point-By-Point User-Defined Sources เป็นการกำหนดแหล่งจ่ายกระแสหรือแรงดันที่ต้องการป้อนข้อมูลที่ละเอียด

## บทที่ 3

### การออกแบบโปรแกรมและการใช้งาน

#### 3.1 การเลือกใช้กับดักฟ้าผ่า และขนาดแรงดันช่วงทำงานต่อเนื่อง

การเลือกกับดักฟ้าผ่าให้เพียงพอและเหมาะสมต่อความต้องการของระบบ มี 2 เงื่อนไขในการพิจารณาค่าสูงสุดของแรงดันช่วงทำงานต่อเนื่อง แรงดันช่วงทำงานต่อเนื่องมีความสำคัญมากกว่าแรงดันใช้งานปกติที่ชั่วของกับดักฟ้าผ่า  $T \times U_c$  มีความสำคัญมากกว่าแรงดันเกินชั่วคราว ที่ชั่วของกับดักฟ้าผ่า ดังแสดงในรูป 2-11 ค่าความคงทนถูกกำหนดโดยเวลาของแรงดันเกินชั่วคราวดังนั้นในการกำหนด ค่าความคงทน เวลาจะถูกนำมาพิจารณาแต่เพื่อความปลอดภัยจะใช้กราฟเส้นโค้งเส้นล่างนำไปใช้ในการเลือกกับดักฟ้าผ่าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ตำแหน่งในการใช้งานกับดักฟ้าผ่าระหว่างเฟสกับดิน นิเวทรอลหม้อแปลงกับดินหรือระหว่างเฟสกับเฟส แรงดันใช้งานสูงสุดที่ชั่วของกับดักฟ้าผ่าสามารถคำนวณได้จากแรงดันสูงสุด ( $U_m$ ) ระหว่างเฟส แต่ถ้าไม่ทราบค่าแรงดันสูงสุด ให้ใช้ค่าแรงดันที่สูงสุดในระบบหรือแรงดันสูงสุดของอุปกรณ์

##### 3.1.1 รูปแบบของระบบส่งจ่ายที่ผลต่อการเลือกกับดักฟ้าผ่า

ระบบที่การชดเชยกระแสลงดินหรือการต่อผ่านความต้านทานสูงลงดิน ภายใต้เงื่อนไขสำหรับ กระแสลงดิน,แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นที่ เฟสที่สมบูรณ์ คือค่าแรงดันของ แรงดันสูงสุด

$$U_c \geq U_m \quad : \text{สำหรับกับดักฟ้าผ่าที่ต่ออยู่ระหว่างเฟสกับดิน}$$

แรงดันที่นิเวทรอลหม้อแปลงสามารถครอบคลุมค่าสูงสุดของ  $\frac{U_m}{\sqrt{3}}$

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad : \text{สำหรับกับดักฟ้าผ่าที่ต่ออยู่ระหว่างนิเวทรอลหม้อแปลงกับดิน}$$

ในทุกโครงการจะมีค่าอินดักเตนซ์และคาปาซิแตนซ์ ทำให้เกิดการอสซิลเลชันเป็นความถี่รีโซแนนซ์ ถ้าความถี่รีโซแนนซ์ตรงกับความถี่ใช้งานจะทำให้แรงดันเฟสสูงกว่าแรงดันสูงสุด ในการจัดการระบบจะพยายามหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดความถี่รีโซแนนซ์

### ระบบที่ต่อความต้านทานสูงลงดินและการกำจัดกระแสลงดิน

ขนาดของแรงดันเกินชั่วคราวจะเหมือนกับระบบที่มีการชดเชยกระแสลงดิน หรือการต่อผ่านความต้านทานสูงลงดิน ซึ่งการกำจัดกระแสลงดินจะสามารถลดแรงดันช่วงทำงานต่อเนื่องโดยเฟลคเตอร์ ค่าความคงทน (T)

$$U_c \geq \frac{U_m}{T} \quad : \text{สำหรับกับดักฟ้าผ่าที่ต่ออยู่ระหว่างเฟสกับดิน}$$

$$U_c \geq \frac{U_m}{T \times \sqrt{3}} \quad : \text{สำหรับกับดักฟ้าผ่าที่ต่อระหว่างอยู่นิวทรอลหม้อแปลงกับดิน}$$

### ระบบที่ต่อลงดินโดยตรง

เป็นระบบที่มีความต้านทานต่ำเมื่อเกิดกระแสลงดินแรงดันเฟสจะไม่เกิน 1.4 เพอร์ยูนิทของระบบ (earth fault factor  $C_e \leq 1.4$ )

$$U_{TOV} \leq 1.4 \times \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad : \text{ซึ่งเวลาที่ใช้กำจัดกระแสลงดินประมาณเวลาเท่ากับ 3 วินาที ดังนั้นค่าความคงทนจะเท่ากับ 1.28}$$

$$U_c \geq \frac{1.4 \times U_m}{1.28 \times \sqrt{3}} = \frac{1.1 \times U_m}{\sqrt{3}} \quad : \text{สำหรับกับดักฟ้าผ่าที่ต่ออยู่ระหว่างเฟสกับดิน}$$

แรงดันที่นิวทรอลที่ไม่ได้ต่อลงดินของหม้อแปลงจะมีค่าสูงสุดของ  $U_{TOV} = 0.4 \times U_m$

$$U_c \geq \frac{0.4 \times U_m}{1.28} = 0.32 \times U_m \quad : \text{สำหรับกับดักฟ้าผ่าที่ต่ออยู่ระหว่างนิวทรอลหม้อแปลงกับดิน}$$

ระบบที่ต่อนิวทรอลผ่านความต้านทานต่ำลงดินแต่ไม่ยูนิฟอร์ม  $Ce \leq 1.4$

สำหรับกับดักฟ้าผ่าที่อยู่ใกล้จุดนิวทรอลหม้อแปลงแรงดันช่วงทำงานต่อเนื่อง สามารถเลือกโดยระบบที่ต่อลงดินโดยตรง  $Ce < 1.4$  ถ้าตำแหน่งของกับดักฟ้าผ่าห่างไม่มากจากหม้อแปลง เช่นที่มีการต่อระยะไกลระหว่างสายเหนือหัวและสายเคเบิล ถ้าดินมีลักษณะแห้งและเย็นหรือเป็นหิน จะทำให้ความต้านทานของดินสูง ซึ่งนำไปสู่แรงดันเฟสที่ตำแหน่งของกับดักฟ้าผ่า ซึ่งใกล้เคียงกับแรงดันสูงสุดในกรณีนี้ จะได้สมการ

$$U_c \geq \frac{U_m}{T} \quad (3.1)$$

ระบบที่ต่อนิวทรอลผ่านความต้านทานต่ำลงดินและ  $Ce > 1.4$

การต่ออิมพีแดนซ์ลงดินจะทำให้กระแสลงดินถูกจำกัด ในกรณีนี้แรงดันจะเพิ่มขึ้นในเฟสปกติ ที่แรงดันสูงสุดในการต่อความต้านทานลงดินแรงดันสามารถเพิ่มขึ้น 5 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันสูงสุด ถ้าเวลาในการกำจัดกระแสลงดินไม่มากกว่า 10 วินาที ดังนั้นค่าความคงทนเท่ากับ 1.25

$$U_c \geq \frac{1.05 \times U_m}{T} \quad (3.2)$$

### 3.1.2 ระดับแรงดันป้องกันของกับดักฟ้าผ่าและคุณลักษณะพิเศษของการป้องกัน

ระดับแรงดันป้องกัน ( $U_p$ ) เป็นแรงดันสูงสุดที่ขั้วกับดักฟ้าผ่าระหว่างเกิดการไหลของกระแสดีสชาร์จ ความเหมาะสมของค่าจำกัดความแรงไวในรูปแบบของกระแส 8/20 ไมโครวินาที ค่ายอดคลื่นของกระแสจะขึ้นมาจาก 8 ไมโครวินาที โดยประมาณและหลังจากนั้นประมาณ 20 ไมโครวินาที จะลดลงไปอยู่ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ของค่ายอดรูปคลื่นในกรณีของกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกนนั้นระดับแรงดันป้องกันยอมให้เพิ่มขึ้นได้โดยมาตรฐานแรงดันไลท์นิ่งอิมพัลส์สปาร์คโอเวอร์ ( Lightning impulse sparkover ) นี้คือค่าต่ำสุดที่คาดไว้ว่าจะเกิดค่ายอดคลื่นของมาตรฐานแรงดันกระตุ้นฟ้าผ่าชั่วขณะ (1.2/50  $\mu$ s) เมื่อนำกับดักฟ้าผ่าไปใช้ เพราะแรงดันสปาร์คเกินเกิดบนทุกๆระบบการทำงาน ระดับการป้องกันที่แท้จริง ( $U_p$ ) ผ่านทางเมทัลลอคไซค์และกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกนระหว่างแรงดันต่อเนื่องที่อยู่ข้างหน้า โดยถูกกำหนดให้อยู่ที่  $U_p = 3.25 \times U_c$  โดยสรุปเป็นค่าที่เหมาะสมกับการใช้งานในระบบหลัก คุณลักษณะการป้องกันกับดักฟ้าผ่า ไม่ได้

ประกอบด้วยค่าระดับการป้องกันที่แท้จริงเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีลักษณะเด่นเพิ่มเติมอื่นๆอย่างแรก พฤติกรรมของก๊ับดักฟ้าผ่าระหว่างช่วงความชันหน้าคลื่นมีสำคัญมากสำหรับอุปกรณ์ แรงดันระดับปานกลาง (MV) การทดสอบสำหรับก๊ับดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคไซค์ เกิดขึ้นที่กระแสดิสชาร์จ ช่วงเวลาหน้าคลื่นที่เพิ่มขึ้นจาก 1 ไมโครวินาที ถึง 8 ไมโครวินาที ค่าแรงดันตกค้างเกิน ที่ก๊ับดักฟ้าผ่าเพิ่มมากจนสูงสุดที่  $1.13 \times U_c$  ที่กระแสหน้าคลื่น เพราะเหตุที่ความไม่เป็นเชิงเส้นของคุณลักษณะกระแส-แรงดันของก๊ับดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคไซค์ที่ช่วงเวลาหน้าคลื่นของแรงดันตกค้าง ถูกกำหนดที่ความสูงที่ 50 นาโนวินาที

ในการเปรียบเทียบสำหรับก๊ับดักฟ้าผ่าแบบมีแกป แรงดันหน้าคลื่นแรงดันสปาร์กเกินชั่วขณะ ถูกอ้างอิงถึงบ่อยๆ ถูกกำหนดให้อยู่ที่ประมาณ  $1.15 \times U_c$  ในการทดสอบความยาวของช่วงเวลาขึ้นคลื่นปรับแต่งที่ประมาณ 400 นาโนวินาที การเปรียบเทียบด้วยก๊ับดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคไซค์มีความจำเป็นต้องให้ช่วงเวลาขึ้นคลื่น อยู่ในช่วงย่าน 50 นาโนวินาที ด้วยความชันของหน้าแรงดันสปาร์กเกินชั่วขณะค่าสูงอย่างน้อยที่  $1.4 \times U_p$  ส่งผลตามมาโดยความชันของคลื่น จำกัดขอบเขตด้วยแรงดันของก๊ับดักฟ้าผ่าแบบมีแกปนี้้น้อยสุดที่ 24 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าในแบบก๊ับดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคไซค์

พฤติกรรมของก๊ับดักฟ้าผ่าระหว่างการเกิดแรงดันเกินที่เกิดจากการเปิด-ปิดสวิตช์เป็นลักษณะต่อไปของคุณลักษณะการป้องกันในก๊ับดักฟ้าผ่าแบบมีแกป แรงดันสปาร์กเกินจะเพิ่มขึ้นประมาณค่าของระดับการป้องกันที่แท้จริงด้วยความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆของแรงดันเกิน ด้วยก๊ับดักฟ้าผ่าในระบบแรงดันระดับปานกลาง ระดับการป้องกันสวิตช์จึงกำหนดโดยค่าแรงดันตกค้างที่ 500 แอมป์ ของรูปคลื่นกระแส 30/60 ไมโครวินาทีแรงดันตกค้างเพิ่มขึ้นจาก  $0.77 \dots 0.83 \times U_p$  อาศัยชนิดของก๊ับดักฟ้าผ่า ขอบเขตของแรงดันระหว่างแรงดันสูงเกินจากสวิตช์ของก๊ับดักฟ้าผ่าแบบมีแกปน้อยสุดที่ 20 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าในแบบก๊ับดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคไซค์ ที่แรงดันการทำงานต่อเนื่องเท่ากัน

ก๊ับดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคไซค์ พิสูจน์ให้เห็นว่าสามารถช่วยให้คุณลักษณะการป้องกันดีกว่าก๊ับดักฟ้าผ่าแบบมีแกป อ้างอิงนอกเหนือจากนี้รูปร่างที่ถูกต้องสำหรับการทำงานในระบบโครงข่ายด้วยการต่อแบบมีค่าความต้านทานสูง (high-ohmic) แยกจากสายดิน ในการพิจารณาระบบการทำงานที่ปลอดภัย ก๊ับดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคไซค์มีตำแหน่งที่ได้เปรียบในความสามารถกำจัดแรงดันมากเกินชั่วขณะ ก๊ับดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคไซค์และมีแกปโดยมากมีรูปร่างรูปทรงที่แตกต่าง

กัน ในระบบโครงข่ายด้วยระบบสายอากาศิน ผลลัพธ์ของแรงดันช่วงทำงานต่อเนื่อง สามารถเลือกที่ 28 เปอร์เซ็นต์ ต่ำกว่าแรงดันพิกัดของกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกป ผลลัพธ์ของคุณลักษณะการป้องกันสำหรับเทคโนโลยี กับดักฟ้าผ่าแบบเมทัลลอคออกไซค์ อาศัยลักษณะรูปคลื่นกำหนดอยู่ที่ต่ำกว่า 28 เปอร์เซ็นต์ ถึง 42 เปอร์เซ็นต์

### 3.1.3 ระยะทางการป้องกันของกับดักฟ้าผ่า

โดยส่วนใหญ่ระดับการฉนวนชั่วคราวพื้นฐาน (BIL) เกินกว่าระดับการป้องกันที่แท้จริงของกับดักฟ้าผ่าอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ดี จะสามารถป้องกันแรงดันมากเกินชั่วขณะได้ กับดักฟ้าผ่าทำให้เหมาะสมด้วย  $U_p = 3.25 \times U_c$  คงค่าไว้ที่  $U_p \leq 4 p.u.$  เมื่อติดตั้งลงในระบบด้วยการต่อแบบมีค่าความต้านทานสูงแยกจากสายดิน สำหรับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าด้วยหัวข้อการป้องกันแรงดันมากเกินชั่วขณะ แนะนำให้เห็นค่าระดับการฉนวนชั่วคราวพื้นฐาน ในตารางที่ 3-1 ค่า  $BIL = 1.4 \times U_p$  สามารถดูในตารางที่ 3-1 ความต้องการทำให้กับดักฟ้าผ่าเหมาะสมตามหน้าที่

ตารางที่ 3-1 ระดับการฉนวนพื้นฐานแรงดันชั่วขณะ ระดับการป้องกันที่เหมาะสมของกับดักฟ้าผ่าด้วย  $U_p = 4 p.u.$

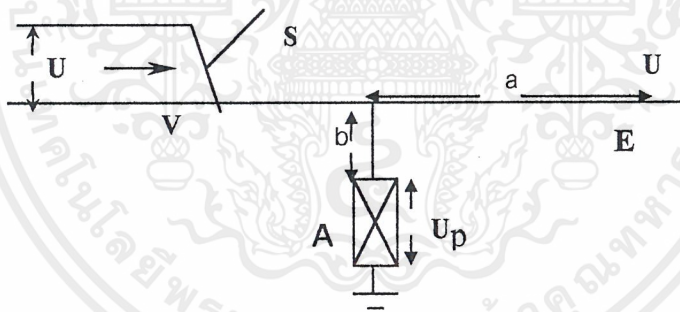
$U_m$	kV	3.6	7.2	12	17.5	24	36
BIL	kV	40	60	75	95	125	170
$U_p$	kV	11.8	23.5	39.2	57.2	78.4	118
$BIL/U_p$	-	3.4	2.55	1.91	1.66	1.59	1.45

ค่าแฟกเตอร์ 1.4 นี้ ใช้ในการคำนวณอย่างแพร่หลาย เพราะว่าสามารถใส่ในรายละเอียดที่แรงดันมากเกินสามารถมีค่ามากกว่าระดับการป้องกันที่แท้จริงในอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ผลตอบสนองจากการสะท้อนกลับ เป็นสาเหตุที่ทำให้แรงดันมากเกินที่อุปกรณ์ทางไฟฟ้าด้วยระยะทางที่เพิ่มขึ้นจากกับดักฟ้าผ่า หลังจากระยะทางที่แน่นอน การป้องกันของกับดักฟ้าผ่านั้นไม่เพียงพอ ระยะทางที่ครอบคลุม (L) เป็นที่เข้าใจว่าระยะทางสูงสุดระหว่าง กับดักฟ้าผ่าและอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ป้องกัน

เพื่อไว้เพียงพอแล้วเพื่อที่จะได้ประสิทธิภาพการออกแบบการป้องกันแรงดันสูงเกิน จะต้องรู้ระยะทางที่ครอบคลุมการป้องกันเราสามารถประเมินค่าของกัปกักฟ้าผ่าในระบบแรงดันระดับปานกลาง

### 3.1.4 แนวทางทฤษฎี สำหรับระยะทางที่ครอบคลุม

บนระบบสายส่งเหนือศีรษะในรูปที่ 3-1 แรงดันสูงเกิน (U) วิ่งแบบการเดินทางของคลื่นด้วยความเร็ว (v) มุ่งหน้ามาที่จุดต่อสายส่ง (E) ที่จุดต่อสายส่งมีอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ต้องการ การป้องกัน เมื่อคลื่นเดินทางมาถึงจุดต่อสายส่งแรงดันสูงเกินจะสะท้อนกลับและแรงดันจะเพิ่มขึ้นเป็น  $2 \times U$  เป็นหน้าที่ของกัปกักฟ้าผ่าที่จะป้องกันอุปกรณ์ภายใต้สมมุติฐานอย่างง่าย ๆ ที่หน้าของความชันคลื่น (S) ของรูปคลื่นแรงดันสูงเกินที่เข้ามาในเวลาคงที่ จะให้ความสัมพันธ์ที่ถูกต้องตามมาสำหรับค่าสูงสุดของระดับการป้องกันที่แท้จริง



รูปที่ 3-1 แรงดันสูงเกินชั่วขณะที่ สายส่ง และ E

U : คลื่นแรงดันสูงเกินที่เข้ามา

v : ความเร็วการกระจายคลื่น U

S : ความชันของหน้าคลื่น U

A : กัปกักฟ้าผ่า

$U_p$  : ระดับการป้องกันของ A

a,b : ความยาวของจุดต่อสาย

E : จุดสุดทางของสาย

$U_E$  : แรงดันสูงเกินที่ E

$$U_E = U_P + \frac{2 \times S \times (a+b)}{v} ; \text{ที่ความเร็ว} = 300 \text{ m}/\mu\text{s} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากประสพการณ์แสดงให้เห็นว่าค่าแฟกเตอร์ที่ปลอดภัยอยู่ที่ 1.2 นั้นเพียงพอ ระหว่างค่าระดับการ  
 จนวนชั่วขณะพื้นฐาน ของอุปกรณ์ทาง ไฟฟ้า และค่าแรงดันสูงเกินจากฟ้าผ่า ระดับการป้องกันที่แท้  
 จริงที่อุปกรณ์ทางไฟฟ้า

$$\frac{BIL}{1.2} \geq U_E = U_P + \frac{2 \times S \times (a+b)}{v} \quad (3.4)$$

ถ้าค่า ขอบเขตนั้นตั้งที่  $L = a + b$  แล้วจากสมการที่ (3.4) ตามมาสำหรับค่าระยะทางที่ ครอบคลุม

$$L = \frac{v}{2 \times S} \times \left[ \frac{BIL}{1.2} - U_P \right] \quad (3.5)$$

ถ้าผลรวมของจุดต่อสาย  $a + b$  นี้เล็กกว่า ระยะทางครอบคลุมของกับดักฟ้าผ่า แล้วอุปกรณ์  
 ทางไฟฟ้า จะป้องกันที่จุดต่อสายส่ง อย่างเพียงพอ เพื่อที่จะอธิบายถึงระยะทางที่ครอบคลุม จาก  
 สมการ (3.4) ค่าความชันหน้าคลื่นจะต้องทราบ

### 3.2 โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

การคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ที่จะทำการป้องกันในที่นี้หมายถึงหม้อแปลง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
2. ส่วนของอุปกรณ์ที่จะป้องกันและกับดักฟ้าผ่า

ข้อมูลเหล่านี้จะนำไปใส่ให้กับ โปรแกรมเพื่อทำการคำนวณค่าที่เหมาะสม และจะนำผลที่ได้จากการคำนวณ ไปใส่ในโปรแกรม ซิมูเลเตอร์วิเคราะห์กระแสและแรงดัน ไฟฟ้าขณะเกิดฟ้าผ่าลงมาที่ระบบส่งจ่ายกำลัง ไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง

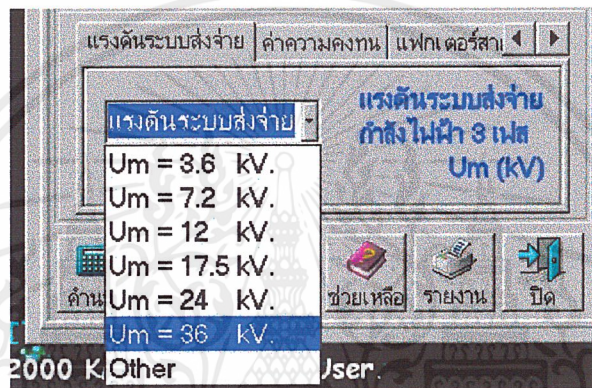


รูปที่ 3-2 ส่วนโปรแกรมการคำนวณหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

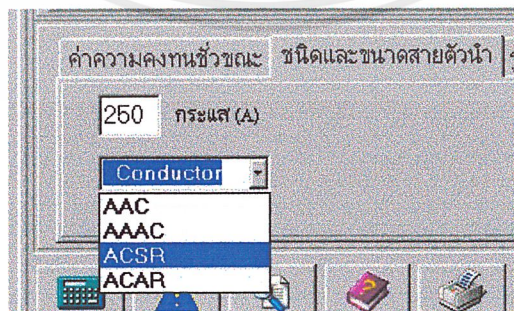
### 3.2.1 ส่วนของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

- แรงดันระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ( $U_m$ ) จากสายส่งแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามาที่อุปกรณ์ปลายทาง แรงดัน  $U_m$  หมายถึงแรงดันระหว่างเฟสกับเฟส ในระบบ 3 เฟส โดยส่วนมากในระบบแรงดันไฟฟ้าขนาดกลาง และแรงดันไฟฟ้าขนาดสูง ที่ส่งในระบบ 3 เฟสจะบอกพิกัดแรงดันที่สถานีส่งจ่ายเป็นค่าแรงดัน  $U_m$  อยู่แล้ว



รูปที่ 3-3 แรงดันระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

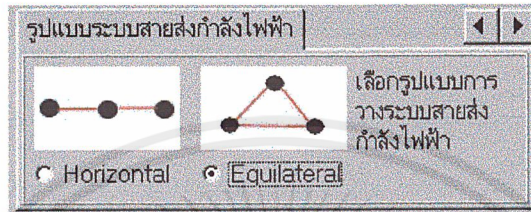
- พิกัดกระแสไฟฟ้า (A) เพื่อนำไปคำนวณหาขนาดสายที่เหมาะสมในการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า



รูปที่ 3-4 เลือกขนาดกระแส และกำหนดชนิดสายตัวนำ

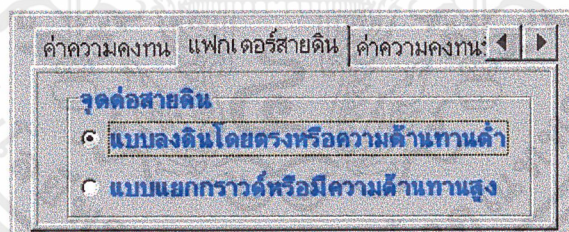
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลักษณะการวางสาย ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่แวนบนเสาสูงแรงสูงจะมีรูปแบบการวางสายอยู่ 2 แบบ คือ ระยะห่างระหว่างเฟสเท่ากัน (Equilateral) และ ระยะห่างแบบแนวระนาบ (Horizontal) รวมถึงการวางในแนวตั้งจะใช้ในแบบลักษณะ ระยะห่างแบบแนวระนาบเช่นกัน จะต้องทราบระยะที่วางห่างกันในแต่ละเฟส



รูปที่ 3-5 กำหนดลักษณะการวางสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

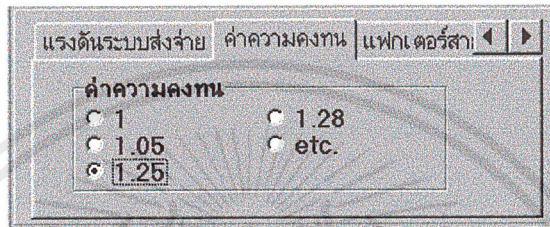
- ค่าแฟกเตอร์สายดิน (Ce) ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ทั้งแบบ มีจุดต่อสายดิน และแบบไม่มีจุดต่อสายดิน จะมีพารามิเตอร์แตกต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อการเลือกขนาดกัปกฟ้าผ่าที่เหมาะสมกับการป้องกันด้วย



รูปที่ 3-6 ค่าแฟกเตอร์สายดิน

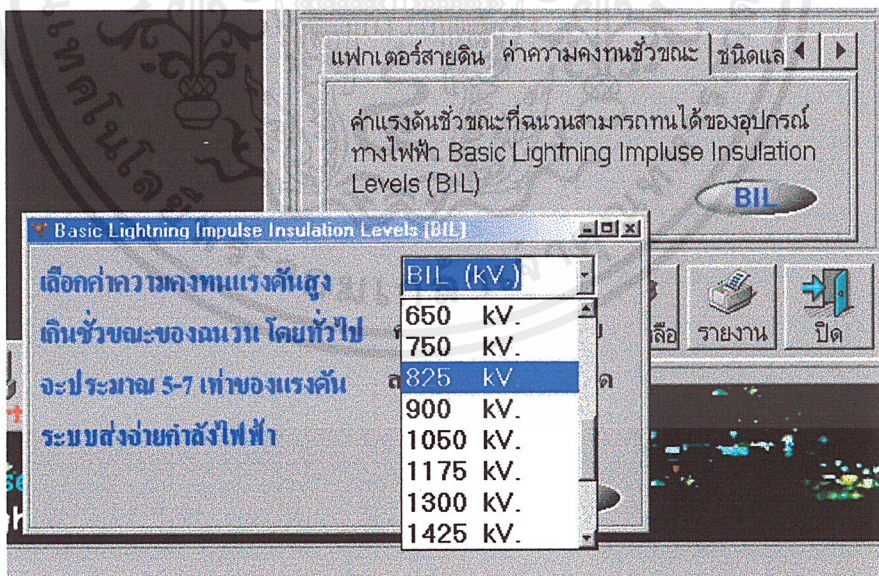
### 3.2.2 ส่วนของอุปกรณ์ที่จะป้องกันและกับดักฟ้าผ่า

- ค่าความคงทน (T) ของกับดักฟ้าผ่า จะเลือกจากช่วงเวลาการทำงานของกับดักฟ้าผ่า ในขณะที่ได้รับแรงดันสูงเกินชั่วขณะ จนตัวกับดักฟ้าผ่าทนรับแรงดันไม่ได้แล้วเบรคความนำตัวเอง



รูปที่ 3-7 เลือกค่าความคงทน

- ค่าความทนแรงดันชั่วขณะของฉนวน (BIL) เป็นค่าแรงดันมาตรฐานของอุปกรณ์ ที่ทดสอบมาจากโรงงานผลิต

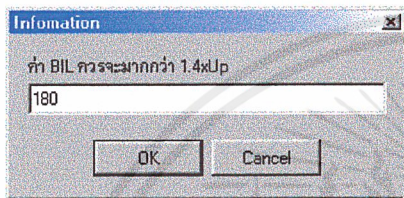


รูปที่ 3-8 เลือกค่าความคงทนแรงดันชั่วขณะของฉนวน

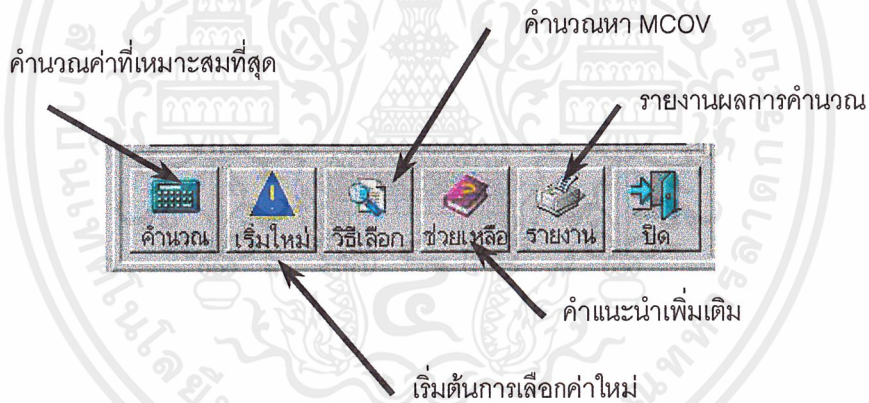
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 จำนวนและรายงานผล

ส่วนการคำนวณผล หลังจากกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ครบแล้วจะทำการคำนวณโปรแกรม จะทำการตรวจสอบค่าต่างๆอีกครั้งก่อนจะทำการคำนวณ หากค่าที่กำหนดไม่ถูกต้องจะ แจ้งให้ทราบและต้องใส่ค่าใหม่



รูปที่ 3-9 ถ้าหากว่าใส่ค่าไม่ถูกต้อง จะแจ้งให้ทราบเพื่อเลือกค่าใหม่



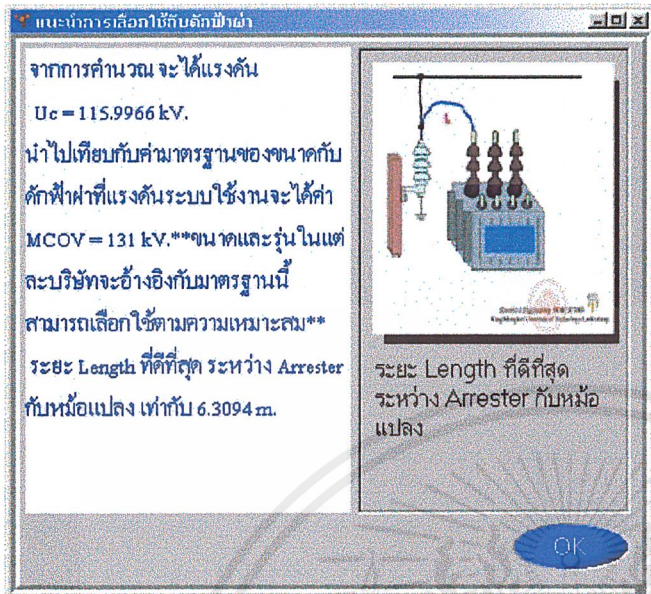
รูปที่ 3-10 ส่วนควบคุมการคำนวณและรายงานผล

โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าต่างๆ ที่ดีที่สุด ได้แก่

#### ส่วนกับดักฟ้าผ่าที่คำนวณแล้ว

- แรงดันสูงเกินชั่วขณะที่ปลายสาย ( $U_e$ )
- ระดับแรงดันป้องกันที่กับดีดฟ้าผ่า ( $U_p$ )
- แรงดันช่วงทำงานต่อเนื่องที่คำนวณได้ ( $U_c$ )
- แรงดันช่วงทำงานต่อเนื่องที่ควรเลือกใช้ (MCOV)
- ค่าความยาวที่เหมาะสมในการติดตั้ง (Length)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-11 เลือกค่า MCOV สำหรับกับ ฉักฟ้าผ่าที่เหมาะสมแล้ว

รูปที่ 3-12 รายงานค่าความยาวที่เหมาะสม ในการติดตั้งกับฉักฟ้าผ่า



### ส่วนของค่าที่ต้องนำไปวิเคราะห์

- ความต้านทานฟ้าผ่า (ZSurge)
- ความเหนี่ยวนำ (L) ปลายสาย
- ความจุประจุไฟฟ้า (C) ปลายสาย
- ค่าความต้านทาน (Ra) ปลายสาย
- ความเหนี่ยวนำ (L) ที่สายส่ง ต่อเมตร
- ความจุประจุไฟฟ้า (C) ที่สายส่ง ต่อเมตร
- ค่าความต้านทาน (Ra) ที่สายส่ง ต่อเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4.

### การคำนวณโดยใช้โปรแกรมคำนวณและทดสอบโดยโปรแกรมวิเคราะห์

การคำนวณหาค่าโดยใช้โปรแกรมทำการคำนวณหาขนาดของกับดักฟ้าผ่าและระยะทางในการติดตั้ง โดยหลังจากการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่คำนวณโดยโปรแกรมเข้าในระบบแล้ว เมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเข้าในระบบแล้วแรงดันที่ปลายสายมีค่าประมาณ 83 เพลอร์เซ็นต์ ของระดับแรงดันเกินสูงชั่วขณะที่อุปกรณ์สามารถทนได้(BIL) ถ้าแรงดันที่ปลายสายมีค่ามากนี้โอกาสที่อุปกรณ์จะได้รับความเสียหายจากแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าก็มีมาก

#### 4.1 การใช้โปรแกรมคำนวณหาขนาดระยะติดตั้งของกับดักฟ้าผ่าและหาค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง

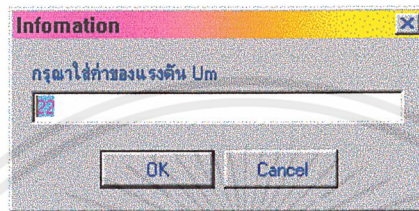
ตัวอย่าง : คำนวณหาคุณสมบัติของกับดักฟ้าผ่าและระยะติดตั้งพร้อมด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบเมื่อรูปแบบของระบบมีลักษณะดังนี้

- แรงดันของระบบ(Um)เท่ากับ 22 กิโลโวลต์
- ค่าความคงทนของกับดักฟ้าผ่า (T) มีค่า 1.25
- ลักษณะของระบบมีการต่อสายตัวนำศูนย์ลงดินโดยตรง ( $C_e = 1.732$ )
- กระแสใช้งานสูงสุด 1,020 แอมแปร์
- ระบบใช้สายอลูมิเนียมเปลือยซึ่งบนอากาศชนิดอลูมิเนียมล้วน(AAC) ลักษณะการวางสายเป็นรูปประนาบ(Horizontal) โดยมีระยะห่างระหว่างสายตัวนำที่ใกล้ที่สุดเป็น 1.2 เมตร
- ระดับแรงดันเกินสูงชั่วขณะที่อุปกรณ์สามารถทนได้(BIL)เท่ากับ 86 กิโลโวลต์

### 4.1.1 การใช้โปรแกรมคำนวณ

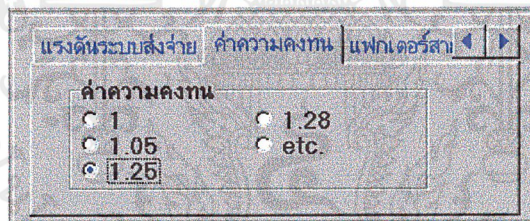
การคำนวณหาค่าต่างๆ โดยใช้โปรแกรมทำได้โดยการใส่ข้อมูลของระบบ ดังต่อไปนี้

1. กำหนดค่าแรงดันของระบบส่งจ่ายเป็น 22 หน่วยของระบบเป็นกิโลโวลต์



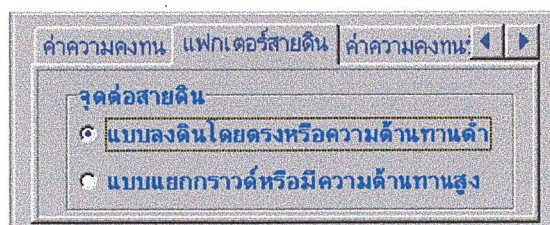
รูปที่ 4-1 แสดงการกำหนดค่าแรงดันของระบบ

2. เลือกค่าความคงทนของกัปดักฟ้าผ่าที่ 1.25



รูปที่ 4-2 แสดงการเลือกค่าความคงทนของกัปดักฟ้าผ่า

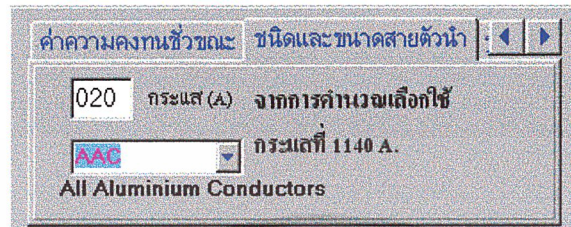
3. กำหนดเฟกเตอร์ของสายดิน โดยการเลือกจุดต่อสายดินแบบลงดิน โดยตรงหรือความต้านทานต่ำ



รูปที่ 4-3 แสดงการเลือกเฟกเตอร์ของสายดิน

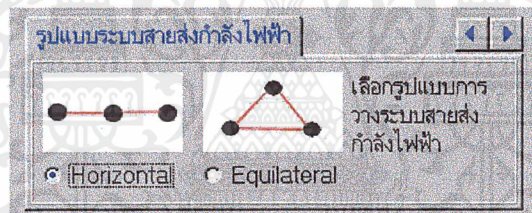
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กำหนดค่ากระแสที่ 1020 แอมแปร์ และเลือกสายแบบอลูมิเนียมเหนียวล้วน (AAC) จากนั้น โปรแกรม จะเลือกขนาดสายแบบอลูมิเนียมเหนียวล้วนที่มีใช้อยู่จริงและแสดงค่ากระแสที่สายสามารถทนได้



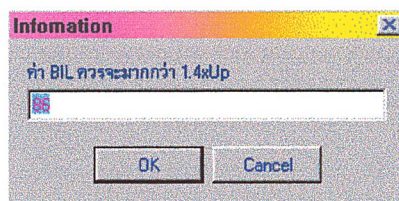
รูปที่ 4-4 แสดงการกำหนดกระแสและเลือกชนิดของตัวนำ

5. เลือกรูปแบบการวางระบบสายส่งแบบระนาบ(Horizontal)



รูปที่ 4-5 แสดงการเลือกรูปแบบของการวางสาย

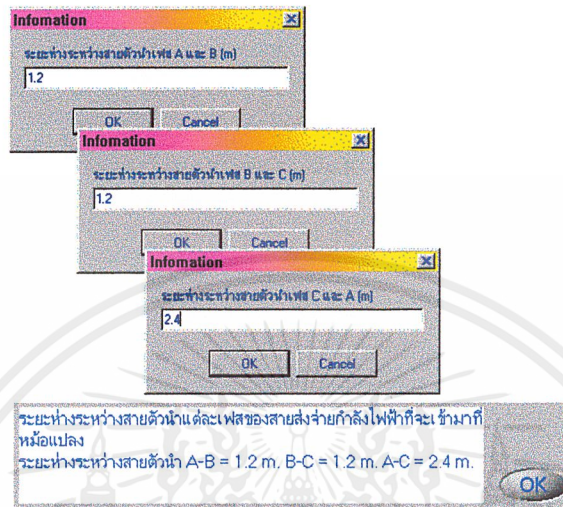
6. กำหนดค่าสูงระดับแรงดันเกินชั่วขณะที่อุปกรณ์สามารถทนได้(BIL)เป็น 86 หน่วยเป็นกิโลโวลต์



รูปที่ 4-6 แสดงการกำหนดค่าระดับแรงดันเกินชั่วขณะที่อุปกรณ์สามารถทนได้(BIL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. กำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำโดยระยะจากตัวนำเฟสAถึงเฟสB เท่ากับ 1.2 จากเฟสBถึงเฟสC เท่ากับ 1.2 และจากเฟสCถึงเฟสA เท่ากับ 2.4



รูปที่ 4-7 แสดงการกำหนดระยะห่างของสายตัวนำแต่ละเฟส

เมื่อใส่ค่าทุกค่าครบแล้ว คอมพิวเตอร์จะประมวลผลคำนวณหาค่าต่างๆออกมา จากนั้นค่าที่คำนวณได้จะถูกนำไปวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์(EMTP)

#### 4.1.2 ค่าจากการประมวลผล

ค่าที่ได้จากการประมวลผลจะแสดงออกมาในรูปของรายงาน โดยรายงานฉบับนี้ประกอบด้วย วัน, เวลาที่ทำการคำนวณและแสดงคุณสมบัติของระบบ คุณสมบัติของกับดักฟ้าผ่า รวมถึงระยะที่เหมาะสมในการติดตั้ง

รายงานฉบับนี้สามารถพิมพ์ออกทางเครื่องพิมพ์หรือจัดเก็บเป็นแฟ้มข้อมูลได้

ตารางที่ 4-1 แสดงค่าต่างๆที่ได้จากการ โปรแกรมโดยการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์

วันจันทร์ที่ 20 เดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2543 [ เวลา 20:06:12 ]

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
**โปรแกรมสำเร็จรูปช่วยคำนวณหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของกัปดักฟ้าผ่า**

**รายงานการคำนวณ**

แรงดันระบบส่งจ่าย (Um)	22	kV.
แรงดันสูงเกินชั่วขณะที่ปลายสาย (Ue)	71.6	kV.
กระแสในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (A)	1020.0	A.
ระดับแรงดันป้องกันที่กัปดักฟ้าผ่า (Up)	57.200	kV.
ระดับแรงดันสูงเกินชั่วขณะที่อุปกรณ์สามารถทนได้ (BIL)	86	kV.
แรงดันช่วงทำงานต่อเนื่องที่คำนวณได้ (Uc)	17.600	kV.
แรงดันช่วงทำงานต่อเนื่องที่ควรเลือกใช้ (MCOV)	19.50	kV.
ค่าความคงทนของกัปดักฟ้าผ่า (T)	1.25	
แฟกเตอร์ดิน (Ce)	1.732	
ลักษณะการวางสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบ Horizontal		
ค่าความยาวที่เหมาะสมในการติดตั้ง (Length)	0.907	m.
ความต้านทานฟ้าผ่า (ZSurge)	307.100	ohm.
ความเหนี่ยวนำ (L) ปลายสาย	0.8681	mircoH.
ความจุประจุไฟฟ้า (C) ปลายสาย	9.2070	pF.
ค่าความต้านทาน (Ra) ปลายสาย	0.0420	microOhm.
ความเหนี่ยวนำ (L) ที่สายส่งต่อเมตร	0.9575	mircoH.
ความจุประจุไฟฟ้า (C) ที่สายส่งต่อเมตร	10.1600	pF.
ค่าความต้านทาน (Ra) ที่สายส่งต่อเมตร	0.0463	mircoOhm.
** BIL/1.2 จะมากกว่าหรือเท่ากับ Ue	72	kV.

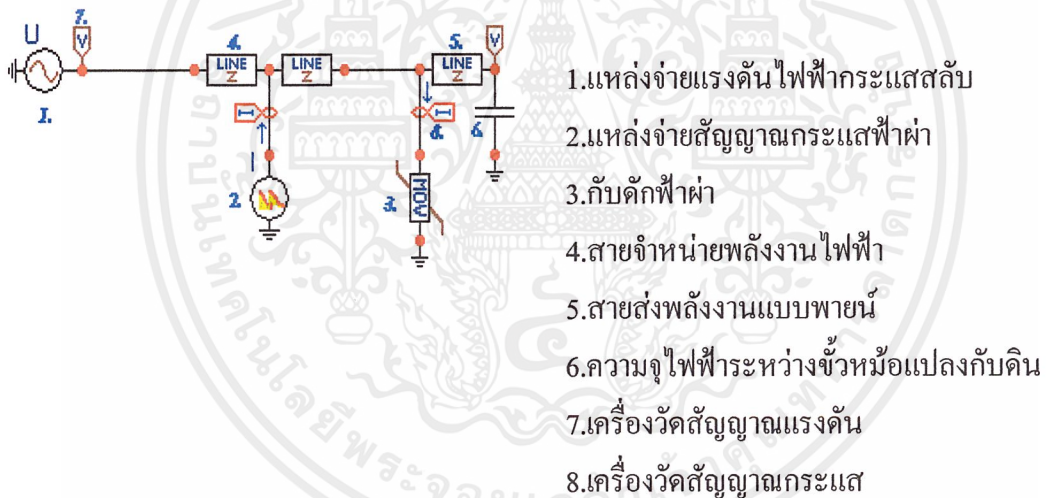
Optimal Location in Surge Arrester Program. Copyright © 1997-2000, KMITL POWER'2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การใช้โปรแกรมวิเคราะห์ตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมที่ออกแบบ

โปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์คือ โปรแกรมวิเคราะห์ในช่วงทรานเซียนต์(Electromagnetic Transients Program : EMTP) เป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งในการนำโปรแกรมนี้อาตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมที่ออกแบบ ทำได้โดยนำค่าต่างๆที่ออกแบบได้มากำหนดค่าให้กับวงจรวิเคราะห์แล้วจึงทำการวิเคราะห์

### 4.2.1 วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์




- 1.แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
- 2.แหล่งจ่ายสัญญาณกระแสไฟฟ้า
- 3.กัปดักไฟฟ้า
- 4.สายจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า
- 5.สายส่งพลังงานแบบพายน
- 6.ความจุไฟฟ้าระหว่างขั้วหม้อแปลงกับดิน
- 7.เครื่องวัดสัญญาณแรงดัน
- 8.เครื่องวัดสัญญาณกระแส

รูปที่ 4-8 แสดงส่วนประกอบของวงจรวิเคราะห์


## 4.2.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์อุปกรณ์ของวงจรวิเคราะห์

### 1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

DATA	VALUE
U/I	
Amp.	22000
f	50
Pha	0
A1	0
TSta	-1
TSto	1

รูปที่ 4-9 แสดงการกำหนดค่าของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

### 2. แหล่งจ่ายสัญญาณกระแสฟ้าผ่าขนาด 10 kA 1.2/50 $\mu$ s

DATA	VALUE
U/I	
Amp	10373
A	-14662.756
B	-2469135.802
Tsta	0
Tsto	1

รูปที่ 4-10 แสดงการกำหนดค่าของแหล่งจ่ายสัญญาณกระแสฟ้าผ่า

## 3. กัปดักฟ้าผ่า

DATA	VALUE
Vref	57200
Vflash	-1
Vzero	0
COL	1
SER	1
ErrLim	0.05

รูปที่ 4-11 แสดงการกำหนดค่าของกัปดักฟ้าผ่า

## 4. สายส่งพลังงานไฟฟ้า

DATA	VALUE
R/I	4.63E-8
A	0.0009575
B	1.016E-5
I	15000
ILINE	0

รูปที่ 4-12 แสดงการกำหนดค่าสายส่งพลังงานไฟฟ้า

## 5. สายส่งพลังงานแบบพายนี

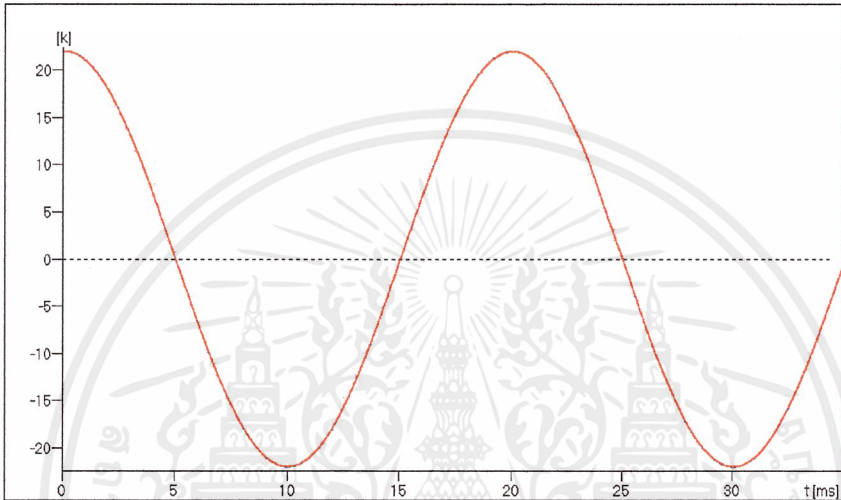
DATA	VALUE
R	4.2E-8
L	0.0008681
C	9.207E-6

รูปที่ 4-13 แสดงการกำหนดค่าสายส่งพลังงานแบบพายนี

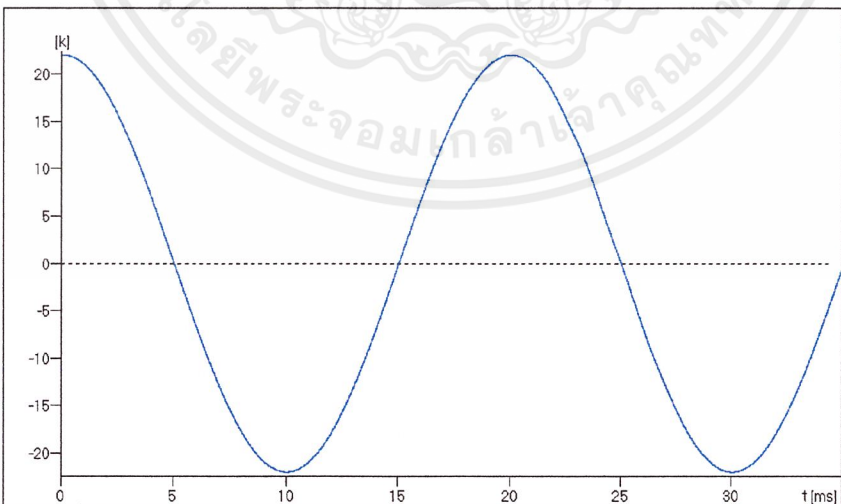
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์

1. ทำการวิเคราะห์โดยสถานะที่ยังไม่ได้จ่ายสัญญาณไฟฟ้าให้กับระบบ

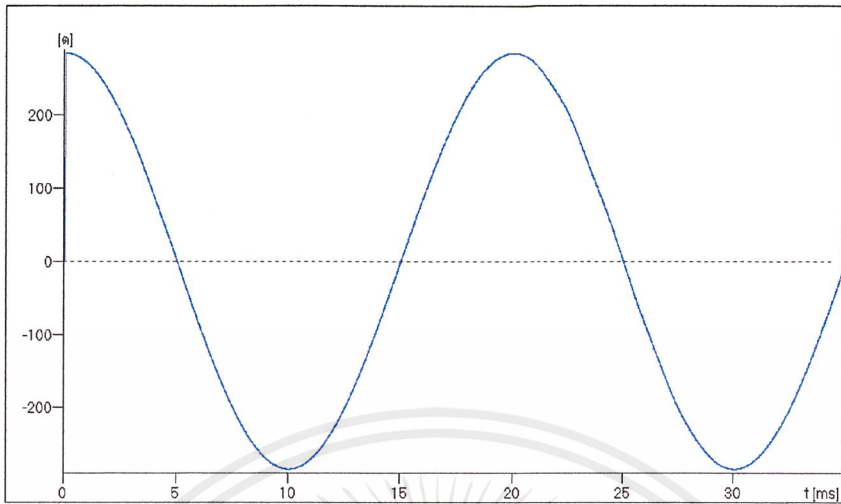


รูปที่ 4-14 แสดงค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายในสถานะปกติ



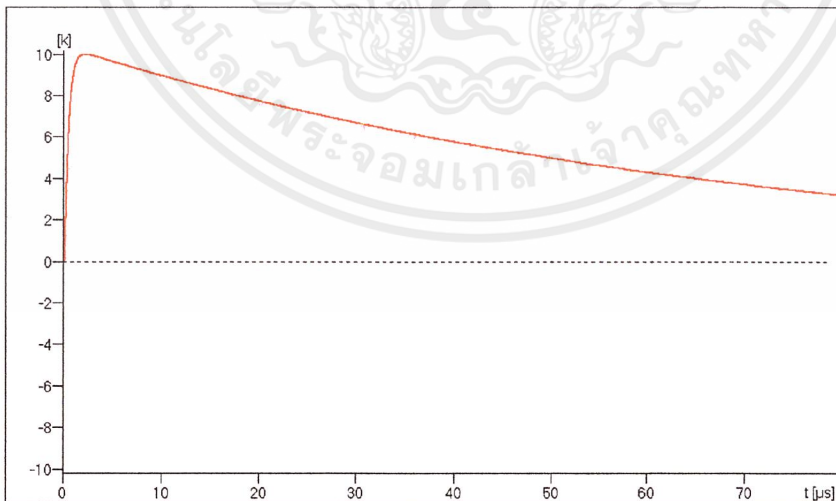
รูปที่ 4-15 แสดงค่าแรงดันที่ปลายสายส่งในสถานะปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



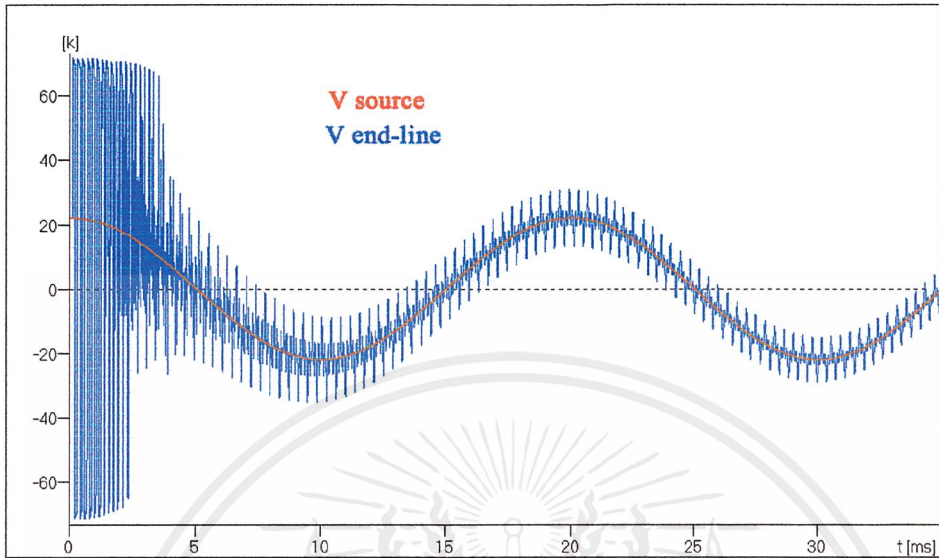
รูปที่ 4-16 แสดงค่ากระแสรั่วไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าขณะที่ยังไม่ทำงาน

## 2. ทำการวิเคราะห์โดยสถานะที่จ่ายสัญญาณฟ้าผ่าให้กับระบบ

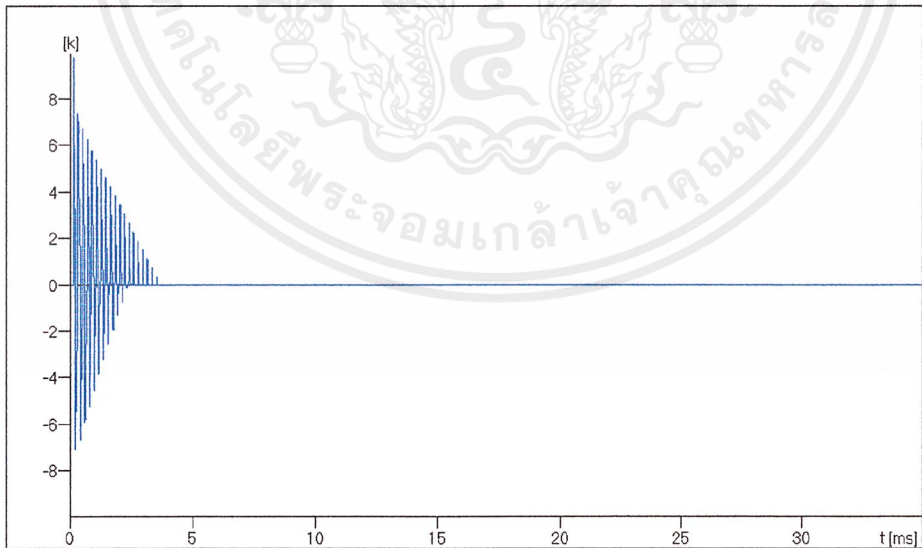


รูปที่ 4-17 แสดงค่าของสัญญาณกระแสฟ้าผ่า 10 kA 1.2/50  $\mu$ s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

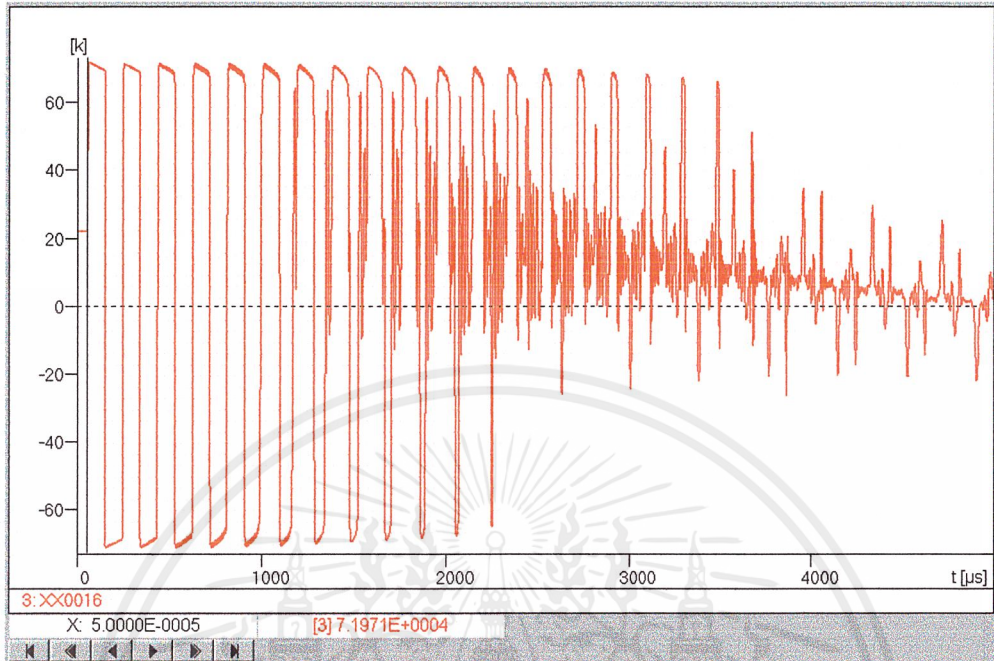


รูปที่ 4-18 แสดงค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายและด้านปลายสายในสภาวะมีสัญญาณฟ้าผ่า



รูปที่ 4-19 แสดงค่ากระแสที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าในสภาวะทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-20 แสดงแรงดันทางด้านปลายสายขณะเกิดกระแสฟ้าผ่าในช่วงแรก

#### ผลการวิเคราะห์ที่ 1

ค่าแรงดันที่ปลายสายจากโปรแกรมวิเคราะห์เท่ากับ 71.971 kV

ค่าแรงดันที่ปลายสายจากโปรแกรมออกแบบเท่ากับ 71.6 kV

ตารางที่ 4-2 แสดงค่าแรงดันที่ปลายสายที่ได้มาจากโปรแกรมวิเคราะห์  
เมื่อปลายสายเปิดไม่มีการต่อของหม้อแปลงไฟฟ้า,  $C=0$  F

กระใช้งานสูงสุด	แรงดันปลายสาย( $U_E$ )ที่วิเคราะห์จากโปรแกรมวิเคราะห์(EMTP) จากแรงดันของระบบส่งจ่ายที่ค่าต่างๆ (kV.-peak)			
	1kV.(rms)	11kV.(rms)	22kV.(rms)	33kV.(rms)
100A	3.2527	35.990	71.972	107.94
560A	3.2518	35.984	71.414	107.91
1,020A	3.2438	35.993	71.971	107.93
1,500A	3.2505	35.989	71.963	107.92
ค่าเฉลี่ย	<b>3.2497</b>	<b>35.989</b>	<b>71.830</b>	<b>107.93</b>
ผลจากโปรแกรมคำนวณ	<b>3.33</b>	<b>35.83</b>	<b>71.67</b>	<b>107.5</b>
เปอร์เซ็นต์ผิดพลาด(%)	<b>2.47</b>	<b>0.442</b>	<b>0.223</b>	<b>0.398</b>

ตารางที่ 4-3 แสดงค่าแรงดันที่ปลายสายที่ได้มาจากโปรแกรมวิเคราะห์ เมื่อปลายสายปิด  
โดยต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ากับระบบและหม้อแปลงมีค่า  $C=0.5$  nF

กระใช้งานสูงสุด	แรงดันปลายสาย( $U_E$ )ที่วิเคราะห์จากโปรแกรมวิเคราะห์(EMTP) จากแรงดันของระบบส่งจ่ายที่ค่าต่างๆ (kV.-peak)			
	1kV.(rms)	11kV.(rms)	22kV.(rms)	33kV.(rms)
100A	3.3999	36.905	73.419	109.60
560A	3.3756	36.875	74.043	108.32
1,020A	3.3247	37.683	75.378	111.98
1,500A	3.3227	36.891	73.291	108.88
ค่าเฉลี่ย	<b>3.3557</b>	<b>37.090</b>	<b>74.033</b>	<b>109.70</b>
ผลจากโปรแกรมคำนวณ	<b>3.33</b>	<b>35.83</b>	<b>71.67</b>	<b>107.5</b>
เปอร์เซ็นต์ผิดพลาด(%)	<b>0.766</b>	<b>3.40</b>	<b>3.19</b>	<b>2.01</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-4 แสดงค่าแรงดันที่ปลายสายที่ได้มาจากโปรแกรมวิเคราะห์ เมื่อปลายสายปิด โดยต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ากับระบบและหม้อแปลงมีค่า  $C = 1.0 \text{ nF}$

กระใช้งานสูงสุด	แรงดันปลายสาย( $U_E$ )ที่วิเคราะห์จากโปรแกรมวิเคราะห์(EMTP) จากแรงดันของระบบส่งจ่ายที่ค่าต่างๆ (kV.-peak)			
	1kV.(rms)	11kV.(rms)	22kV.(rms)	33kV.(rms)
100A	3.4777	36.819	72.367	109.11
560A	3.4181	39.943	75.954	109.05
1,020A	3.3592	37.476	74.464	110.78
1,500A	3.3437	36.804	74.569	110.03
ค่าเฉลี่ย	<b>3.4200</b>	<b>37.761</b>	<b>74.339</b>	<b>109.74</b>
ผลจากโปรแกรมคำนวณ	<b>3.33</b>	<b>35.83</b>	<b>71.67</b>	<b>107.5</b>
เปอร์เซ็นต์ผิดพลาด(%)	<b>2.63</b>	<b>5.11</b>	<b>3.59</b>	<b>2.04</b>

ตารางที่ 4-5 แสดงค่าแรงดันที่ปลายสายที่ได้มาจากโปรแกรมวิเคราะห์ เมื่อปลายสายปิด โดยต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ากับระบบและหม้อแปลงมีค่า  $C = 1.5 \text{ nF}$

กระใช้งานสูงสุด	แรงดันปลายสาย( $U_E$ )ที่วิเคราะห์จากโปรแกรมวิเคราะห์(EMTP) จากแรงดันของระบบส่งจ่ายที่ค่าต่างๆ (kV.-peak)			
	1kV.(rms)	11kV.(rms)	22kV.(rms)	33kV.(rms)
100A	3.5266	38.081	72.442	112.31
560A	3.4161	38.753	75.891	118.39
1,020A	3.4497	37.790	74.291	115.60
1,500A	3.3437	37.683	73.742	112.14
ค่าเฉลี่ย	<b>3.4340</b>	<b>38.077</b>	<b>74.592</b>	<b>114.61</b>
ผลจากโปรแกรมคำนวณ	<b>3.33</b>	<b>35.83</b>	<b>71.67</b>	<b>107.5</b>
เปอร์เซ็นต์ผิดพลาด(%)	<b>3.03</b>	<b>5.90</b>	<b>3.92</b>	<b>6.20</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-6 แสดงค่าแรงดันที่ปลายสายที่ได้มาจากโปรแกรมวิเคราะห์ เมื่อปลายสายปิด โดยต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ากับระบบและหม้อแปลงมีค่า  $C = 2.0 \text{ nF}$

กระใช้งานสูงสุด	แรงดันปลายสาย( $U_E$ )ที่วิเคราะห์จากโปรแกรมวิเคราะห์(EMTP) จากแรงดันของระบบส่งจ่ายที่ค่าต่างๆ (kV.-peak)			
	1kV.(rms)	11kV.(rms)	22kV.(rms)	33kV.(rms)
100A	4.1829	39.400	74.546	117.72
560A	3.4016	39.124	86.274	125.18
1,020A	3.4479	37.649	77.251	121.34
1,500A	3.4480	38.293	76.676	117.17
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>3.6201</b>	<b>38.61</b>	<b>78.687</b>	<b>120.35</b>
<b>ผลจากโปรแกรมคำนวณ</b>	<b>3.33</b>	<b>35.83</b>	<b>71.67</b>	<b>107.5</b>
<b>เปอร์เซ็นต์ผิดพลาด(%)</b>	<b>8.01</b>	<b>7.22</b>	<b>8.92</b>	<b>10.68</b>

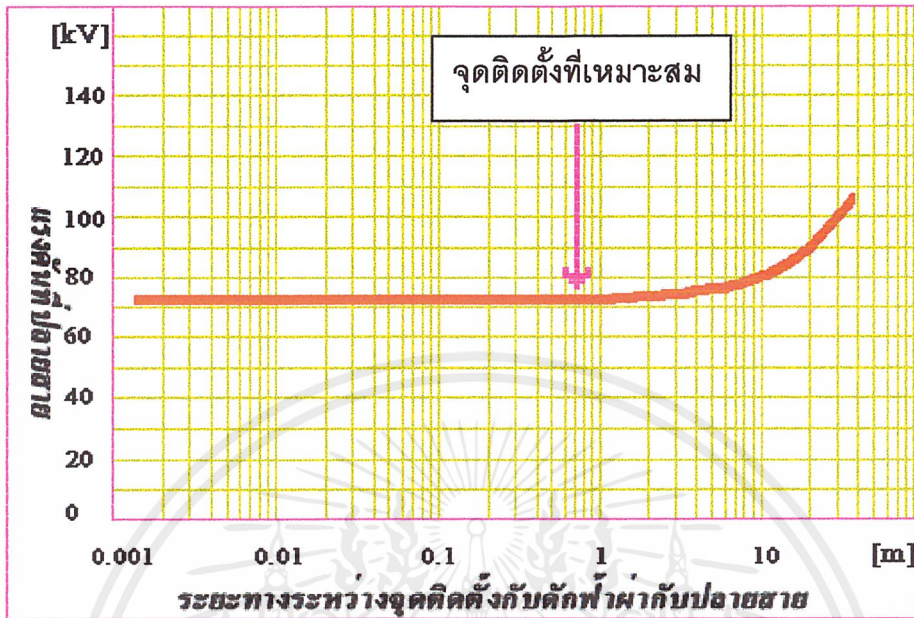
## ผลการวิเคราะห์ที่ 2

จากพารามิเตอร์ของสายส่งแบบพายน้นำมาเปลี่ยนค่าความยาวแล้วใช้โปรแกรมวิเคราะห์หาขนาดของแรงดันที่ปลายสาย

ตารางที่ 4-7 แสดงค่าแรงดันปลายสายเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

ความยาว (m.)	ความต้านทาน Ra ( $\Omega$ )	ความเหนี่ยวนำ L (mH)	ความจุไฟฟ้า C (pF)	แรงดันปลายสาย U <sub>E</sub> (kV –peak)
0	0	0	0	71.97
0.2	0.0092	0.19142	2.0302	71.97
0.4	0.0184	0.3828	4.0604	71.971
0.6	0.276	0.5743	6.0906	71.971
0.8	0.0368	0.76568	8.1208	71.971
1	0.046	0.9571	10.151	71.971
2	0.092	1.9142	20.302	71.973
5	0.23	4.7855	50.755	76.263
10	0.46	9.571	101.51	76.382
15	0.69	14.3565	152.265	78.047
20	0.92	19.142	203.02	81.383
25	1.15	23.9275	253.775	100.44
30	1.38	28.713	304.53	101.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่างกรณี ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ขนาด 22 kV(rms) 1,020 A.

รูปที่ 4-21 แสดงค่าแรงดันที่ปลายสายเมื่อเปลี่ยนระยะติดตั้งกับค้ำฟ้า

## บทที่ 5

### บทวิจารณ์และสรุป

#### 5.1 บทวิจารณ์

##### 5.1.1 จากการวิเคราะห์ที่ 1

ทำโดยการหาค่าของแรงดันปลายสายด้วยวิธีการใช้โปรแกรมคำนวณมาประมวลผลแล้ว นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันปลายสายที่ได้จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ พบว่าเมื่อวิเคราะห์โดยยังไม่ได้อ่อนหรือแปลงที่ปลายสายค่าแรงดันที่ปลายสายจากการคำนวณและจากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์มาเปรียบเทียบผลที่ได้นั้นมีขนาดใกล้เคียงกันมาก โดยที่ระบบแรงดัน 1 กิโลโวลต์ มีค่าความผิดพลาด 2.470 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ระบบแรงดัน 11 ,22 ,33 ,69 ,115 และ230 กิโลโวลต์ มีค่าความผิดพลาดไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อต่อหม้อแปลงเข้าที่ปลายสายแล้วพบว่าแรงดันที่ปลายสายจะมีขนาดมากขึ้น จากผลการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ เมื่อนำหม้อแปลงที่มีความจุไฟฟ้า 0.5 นาโนฟารัดมาวิเคราะห์ค่าแรงดันปลายสายจะน้อยกว่าการใช้หม้อแปลงที่มีความจุไฟฟ้า 2.0 นาโนฟารัด จะเห็นได้ว่าถ้าค่าความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงจากขั้วถึงดินมีค่ามากเมื่อนำมาต่อแล้วเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าลงมาในสายส่งแล้วแรงดันที่ปลายสายจะมากกว่าการใช้หม้อแปลงที่มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ

##### 5.1.2 จากการวิเคราะห์ที่ 2

ทำโดยการหาแรงดันที่ปลายสายที่ตำแหน่งการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าในระยะทางต่างๆ ด้วยวิธีการใช้โปรแกรมวิเคราะห์แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่คำนวณได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณ พบว่าจากการเปลี่ยนตำแหน่งกับดักฟ้าผ่าโดยการเพิ่มระยะทางค่าแรงดันที่ปลายสายจะคงที่อยู่ที่ค่าหนึ่งแต่เมื่อระยะของตำแหน่งติดตั้งมีค่า 1 เมตร แรงดันที่ปลายสายจะเริ่มมีแนวโน้มที่สูงขึ้น และจากการใช้โปรแกรมคำนวณประมวลผลได้ระยะการติดตั้งเท่ากับ 0.953 เมตร จะเห็นว่าค่าทั้งสองมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยระยะที่คำนวณได้จะเป็นระยะไกลที่สุดที่จะสามารถติดตั้ง

อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าถ้าติดตั้งอุปกรณ์ไกลกว่านี้แรงดันที่ปลายสายเวลาเกิดฟ้าผ่าจะมากขึ้นทำ  
อุปกรณ์ที่อยู่ปลายสายไม่สามารถทนได้

จากการวิเคราะห์ทั้งสองอย่าง โดยการพิจารณาค่าแรงดันที่ปลายสายในระบบต่างๆและ  
การพิจารณาค่าแรงดันติดตั้งกับดักฟ้าผ่า ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิง ในกรณีปลายสายเปิดแต่  
ในกรณีปลายสายต่อหม้อแปลงค่าของความจุไฟฟ้าระหว่างขั้วกับดินต้องมีค่าน้อยๆ

## 5.2 บทสรุป

จากการวิเคราะห์ค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณประมวลผลเป็นค่าที่เชื่อถือได้ ดังนั้น  
โปรแกรมสำเร็จรูปช่วยคำนวณหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของกับดักฟ้าผ่าจึงสามารถใช้ได้กับ  
งานการติดตั้งจริงได้

แต่ก่อนจะใช้โปรแกรมคำนวณ ควรจะต้องทราบว่าจะระบบที่จะติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า  
เป็นแบบใดเสียก่อน และควรจะต้องทราบว่าสมรรถนะของโปรแกรมก่อน โปรแกรมสำเร็จรูปช่วย  
คำนวณหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของกับดักฟ้าผ่านี้ใช้กับแรงดันขนาดปานกลางและค่าที่ได้จาก  
การคำนวณประมวลผลจะเป็นค่าที่อ้างอิงกับค่ามาตรฐานในการเลือกใช้จริงขนาดของอุปกรณ์ที่  
คำนวณได้อาจจะไม่มีเพราะแต่ละบริษัทอาจจะไม่ได้ผลิตตามมาตรฐาน ดังนั้นการเลือกใช้ก็ต้องใช้  
วิจารณญาณของผู้ติดตั้งเอง และหม้อแปลงที่จะติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าควรมีค่าความจุไฟฟ้า  
ระหว่างขั้วของหม้อแปลงกับดินควรมีค่าน้อยๆ โปรแกรมสำเร็จรูปช่วยคำนวณหาตำแหน่งติดตั้ง  
ที่เหมาะสมของกับดักฟ้าผ่าจึงเป็นโปรแกรมที่ใช้อำนวยความสะดวกในการตัดสินใจเลือกใช้ตัวกับ  
ดักฟ้าผ่าและหาตำแหน่งจุดติดตั้งในขั้นแรกก่อน

ก่อนจะนำโปรแกรมนี้ไปใช้งานจริงก็ควรจะต้องทราบความสามารถของโปรแกรมและรูปแบบ  
ของระบบเสียก่อนเพื่อให้โปรแกรมทำงานได้เต็มความสามารถ ข้อผิดพลาดจากการใช้โปรแกรม  
จะน้อยด้วย การป้องกันระบบจึงมีเสถียรภาพ หากไม่สนใจคุณสมบัติบางประการเหล่านี้ อุปกรณ์  
ป้องกันที่ได้จากการเลือกโดยโปรแกรมจะเป็นเพียงแค่อุปกรณ์ประดับเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คำนิยาม

Max. system voltage ( $U_m$ )	แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของระบบ คือ แรงดันเฉลี่ยสูงสุดระหว่างเฟสกับเฟส ที่ปรากฏภายใต้สภาวะการทำงานปกติที่เวลาใดๆ และจุดใดๆของระบบ
Continuous operating voltage ( $U_c$ )	แรงดันที่จุดต่อกับดักฟ้าผ่าในขณะที่ระบบทำงานปกติ
Temporary overvoltages (TOV)	แรงดันสูงเกินตักค้างชั่วคราว แรงดันเล็กน้อยที่คงเหลือจากการเกิดฟ้าผ่า เมื่อมาเปรียบเทียบกับช่วงเวลาที่ยาว
Temporary overvoltages withstand strength factor (T)	ค่าแฟกเตอร์ความคงทนต้านทานแรงดันตักค้าง ความจุของแรงดันตักค้างที่กักดักฟ้าผ่า เท่ากับ แฟกเตอร์ความคงทน คูณ แรงดันช่วงทำงานต่อเนื่อง
Basic Lightning Impulse Insulation Levels (BIL)	ค่าความคงทนแรงดันสูงเกินชั่วคราวของฉนวน
Arrester protective distance (L)	ระยะทางการป้องกัน
Earth fault factor ( $C_e$ )	แฟกเตอร์สายดินของระบบส่งกำลังไฟฟ้า
Nominal discharge current ( $I_n$ )	กระแสคายประจุปกติ
Maximum Continuous Operating Voltage (MCOV)	แรงดันช่วงทำงานต่อเนื่องสูงสุด = $U_c$
Maximum steepness (S)	ค่าความชันสูงสุดของแรงดันที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยเวลา
Maximum overvoltage at the end of an open line ( $U_E$ )	ค่าแรงดันสูงเกินชั่วคราวสูงสุดที่ปลายสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Protection level ( $U_p$ )

ระดับแรงดันป้องกันของกับดักฟ้าผ่าที่กระแสนายประจุ  
ปกติ

Overvoltage at the transformer ( $U_T$ )

แรงดันสูงเกินชั่วขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้า

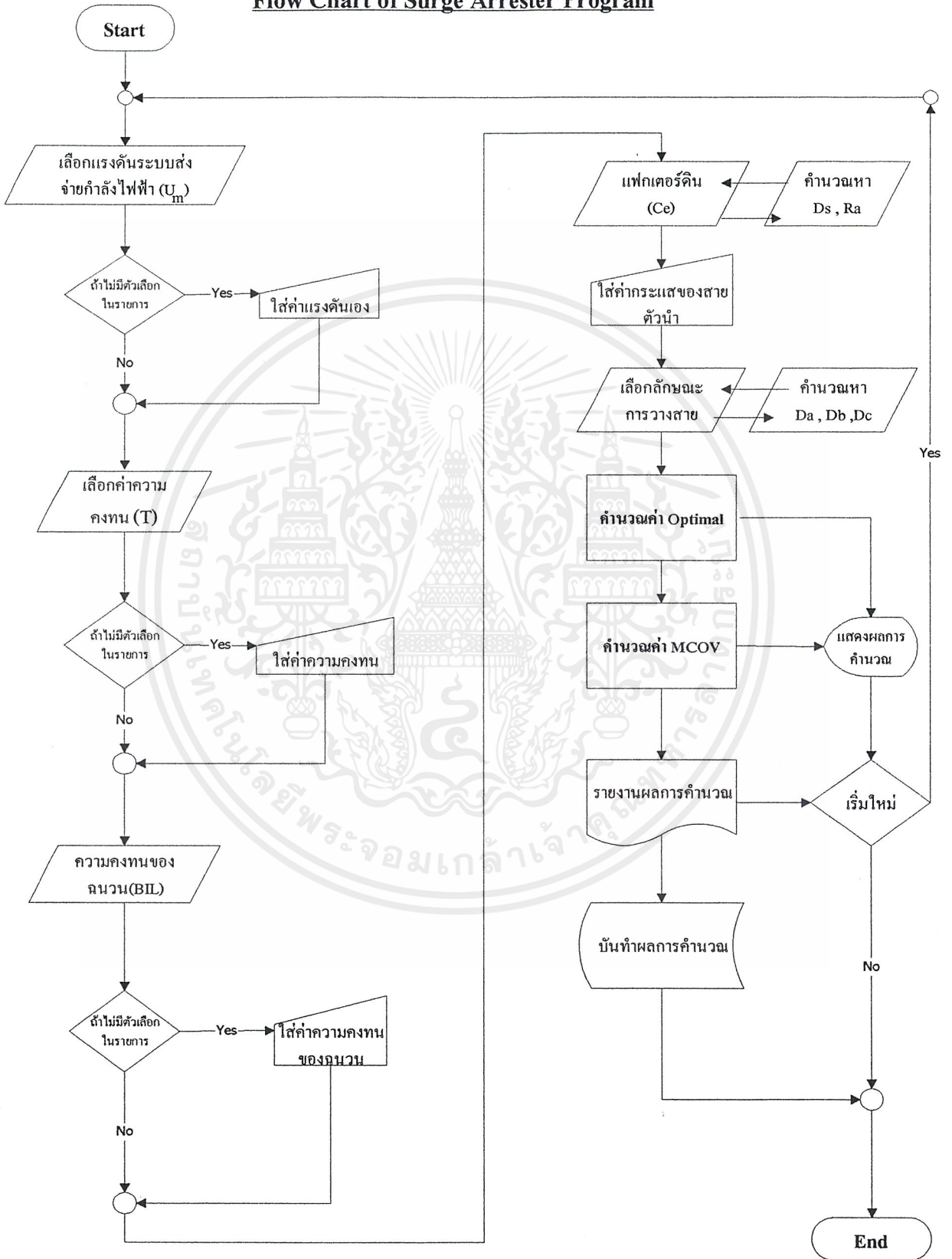
Surge impedance ( $Z$ )

ความต้านทานฟ้าผ่าที่สายตัวนำระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Flow Chart of Surge Arrester Program



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางค่าความคงทนแรงดันสูงเกินชั่วขณะของฉนวน (BIL)

Application	Nominal System Voltage (kV rms)	Maximum System Voltage (from ANSI C84.1-1989 [2] and ANSI C92.2-1987 [4]) (kVrms)	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		
Power	34.5		200	150	125	
	46.0	48.3	250	200		
	69.0	72.5	350	250		
	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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงพิกัดของกั๊บดักฟ้าผ่า (kV- rms)

Duty-cycle Voltage	MCOV	Duty-cycle Voltage	MVOC
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

IEEE Std C62.11-1993

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สายอลูมิเนียมแบบตีเกลียว

สายไฟฟ้าอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย (ALUMINIUM STRANDED CONDUCTORS) สายตัวนำไฟฟ้าในระบบจำหน่าย และระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง โดยทั่วไป นิยมใช้สายตัวนำเส้นเดี่ยว ดันหลายเส้นมาบิดเกลียวรวมกันร่วมจุดศูนย์กลางเดียวกัน เรียกว่า สายตีเกลียว (stranded conductor) “สายตีเกลียวเปลือย“ หมายถึงสายไฟฟ้าที่เอาสายตันเปลือยเส้นย่อยมาตีเกลียวเข้าด้วยกันเป็นสายเส้นเดี่ยวและไม่มีฉนวนหุ้ม สายตันในแต่ละเส้นในสายตีเกลียว เรียกว่าสายประกอบมาจัดเรียงซ้อนกันเป็นวงกลม โดยสายตันเปลือยเส้นย่อยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน มาตีเกลียวร่วมศูนย์กลางเดียวกันถ้าประกอบด้วยชั้นของการตีเกลียวมากกว่าหนึ่งชั้น ชั้นถัดไปต้องตีเกลียวสวนทางกัน และชั้นนอกสุดต้องมีทิศทางการตีเกลียวไปทางขวา ในส่วนของลวดตัวนำอลูมิเนียมย่อยที่จะนำมาตีเกลียวนั้นจะต้องเป็นตัวนำรีดแข็ง (hard-drawn conductor)

ในปัจจุบันนี้ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงภาคเสาเหนือดินจะใช้สายส่งที่เป็นสายอลูมิเนียมตีเกลียวเป็นส่วนใหญ่ โดยสายอลูมิเนียมตีเกลียวสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ตามลักษณะโครงสร้าง และองค์ประกอบของตัวนำ ดังนี้

**1.สายตัวนำอลูมิเนียมล้วน ; AAC (All Aluminum conductors)** เป็นสายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือยที่ประกอบด้วยตัวนำรีดแข็ง (hard-drawn conductor) ล้วนๆ โดยมีจำนวนเส้นลวดตั้งแต่ 7 เส้นขึ้นไป สายตัวนำประเภทนี้จะรับแรงดึงได้ต่ำมากไม่สามารถจึงสายให้มีระยะห่างระหว่างช่วงเสาหลายๆได้

**2.สายตัวนำอลูมิเนียมผสม ; AAAC (All Aluminum Alloy Conductors)** เป็นสายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือยที่ประกอบด้วยเส้นลวดอลูมิเนียมที่ผสมกับสารอื่น ประกอบไปด้วยอลูมิเนียม 99 % , แมกนีเซียม 0.5 % , และซิลิกอน 0.5 % ทำให้สายตัวนำประเภทนี้มีความเหนียว และสามารถรับแรงดึงได้สูงกว่าสายตัวนำอลูมิเนียมล้วน จึงสามารถจึงสายชนิดนี้ด้วยระยะห่างช่วงเสาที่ยาวขึ้น แต่สายตัวนำอลูมิเนียมผสมมีราคาแพง และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าสายตัวนำอลูมิเนียมล้วน จึงไม่ค่อยนิยมใช้สายตัวนำอลูมิเนียมผสมกันมากนัก ยกเว้นสถานที่ที่จำเป็น เช่น บริเวณชายทะเล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สายตัวนำอลูมิเนียมแกนเหล็ก ; ACSR ( Aluminum Conductors Steel Reinforced) เป็นสายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือยที่ประกอบด้วยตัวนำรีดแข็ง โดยมีจำนวนเส้นลวดตั้งแต่ 7 เส้นขึ้นไป ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันมาตีเกลียว โดยมีแกนกลางเป็นเส้นลวดแกนเหล็ก ลวดแกนเหล็กที่ใส่ไว้ทำให้สายตัวนำชนิดนี้สามารถรับแรงดึงได้สูงกว่าสายตัวนำอลูมิเนียมล้วนประมาณ 2 เท่า สามารถชิงสายที่ระยะห่างระหว่างช่วงเสามากๆได้ จึงนิยมใช้สายประเภทนี้กับเสาโครงพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงๆ แต่ไม่นิยมไปใช้กับบริเวณใกล้ชายทะเลไอของเกลือจะทำให้สายตัวนำผุกร่อนและอายุการใช้งานจะสั้นลง

4. สายตัวนำอลูมิเนียมแกนโลหะผสม ; ACAR (Aluminum Conductors Alloy Reinforced) เป็นสายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือยคล้ายกับสายตัวนำอลูมิเนียมแกนเหล็ก แต่แกนกลางเปลี่ยนจากเหล็กเป็นโลหะผสมเพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อนของไอเกลือ แต่ความสามารถในการรับแรงดึงจะน้อยกว่าสายตัวนำอลูมิเนียมแกนเหล็ก และมีราคาแพงกว่า

**ALL ALUMINIUM STRANDED CONDUCTOR; AAC**

Nominal cross section area (mm <sup>2</sup> )	Number and diameter of wire (No/mm)	Overall conductor diameter (mm)	Maximum conductor resistance at 20°C (Ω/Km)	Breaking Strength (Kgf.)	Maximum Continuous Current rating In free air (A)	Cable Weight (approx.) (Kg/Km)	Standard Length (m)
16	7/1.70	5.10	1.802	290	110	44	3,000/D
25	7/2.14	6.42	1.138	440	145	69	3,000/D
35	7/2.52	7.56	0.8200	585	180	96	3,000/D
50	7/3.02	9.06	0.5710	805	225	137	2,500/D
50	19/1.83	9.15	0.5757	890	225	137	2,500/D
70	19/2.14	10.75	0.4171	1,205	270	190	2,500/D
95	19/2.52	12.60	0.3036	1,585	340	261	2,500/D
120	19/2.85	14.25	0.2374	1,980	390	333	2,000/D
150	37/2.25	15.75	0.1960	2,570	455	406	2,000/D
185	37/2.52	17.64	0.1563	3,085	550	509	2,000/D
240	61/2.25	20.25	0.1192	4,015	625	670	1,500/D
300	61/2.52	22.68	0.0950	4,820	410	840	1,500/D
400	61/2.85	25.65	0.0743	6,025	855	1,075	1,000/D
500	61/3.25	29.25	0.0571	7,695	990	1,398	1,000/D
625	91/2.96	32.56	0.0463	9,694	1,140	1,735	500/D
800	91/3.35	36.85	0.0361	12,055	1,340	2,222	500/D
1000	91/3.74	41.14	0.0290	14,845	1,540	2,769	500/D

**REFERENCE STANDARD : TIS 86-2522**

**D : Packing in drum**

**ALUMINIUM CONDUCTOR STEEL REINFORCED; ACSR**

Nominal cross section area Al/stl (mm <sup>2</sup> )	ALUMINIUM		STEEL WIRE		Overall conductor diameter (mm)	Conductor Resistance At 20 °c (Ω/Km)	Breaking Strength (Kgf.)	Maximum Continuous current Rating in free air (A)	Cable Weight (Kg/km)	Standard Length (m)
	Number and diameter of wire (No/mm)	Cross section area (mm <sup>2</sup> )	Number and diameter of wire (No/mm)	Cross section Area (mm <sup>2</sup> )						
70/12	26/1.85	69.9	7/1.44	11.40	11.7	0.4131	2,676	290	282	3,000/D
95/15	26/2.15	94.4	7/1.67	15.30	13.6	0.3058	3,565	350	381	3,000/D
120/20	26/2.44	121.6	7/1.90	19.80	15.5	0.2375	4,555	410	491	2,000/D
125/30	30/2.33	127.9	7/2.33	29.80	16.1	0.2259	5,759	425	587	2,000/D
150/25	26/2.70	148.9	7/2.10	24.20	17.1	0.1939	5,513	470	601	2,000/D
170/40	30/2.70	171.8	7/2.70	40.10	18.9	0.1683	7,675	520	789	2,000/D
185/30	26/3.00	183.8	7/2.33	29.80	19.0	0.1571	6,618	535	741	2,000/D
210/35	26/3.20	209.1	7/2.49	34.10	20.3	0.1381	7,489	590	844	1,500/D
210/50	30/3.00	212.1	7/3.00	49.50	21.0	0.1363	9,390	610	974	1,500/D
240/40	26/3.45	243.0	7/2.68	39.50	21.9	0.1188	8,640	645	981	1,500/D
300/50	26/3.86	304.3	7/3.00	49.50	24.5	0.0949	10,702	740	1,228	1,000/D
305/40	54/2.68	304.6	7/2.68	39.50	24.1	0.0949	9,942	740	1,152	1,000/D
380/50	54/3.00	382.2	7/3.00	49.50	27.0	0.0758	12,312	840	1,443	1,000/D
435/55	54/3.20	434.3	7/3.20	56.30	28.8	0.0666	13,673	900	1,642	1,000/D
490/65	54/3.40	490.3	7/3.40	63.60	30.6	0.0590	15,343	960	1,853	1,000/D
550/70	54/3.60	550.0	7/3.60	71.30	32.4	0.0526	17,096	1,020	2,078	500/D
680/85	54/4.00	678.8	19/2.40	86.00	36.0	0.0426	12,040	1,150	2,552	500/D

REFERENCE STANDARD : TIS 86-2522      D : Packing in drum

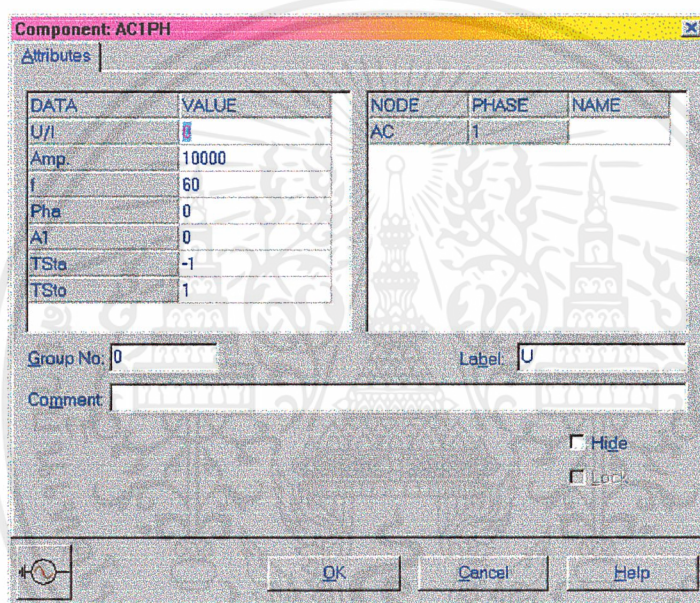
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การตั้งค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 1. แหล่งจ่ายพลังงาน (Source)

เป็นส่วนที่จ่ายพลังงานให้กับระบบ

1.1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC-Voltage source) ทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้กับระบบเรียกว่าแรงดันของระบบ (Voltage system; Um)



U/I = 0: แหล่งจ่ายแรงดัน

-1: แหล่งจ่ายกระแส

Amp = ค่ายอดสูงสุดของสัญญาณใน [A] หรือ [V]

F = ความถี่ [Hz]

pha = มุมห่าง(Phase shift) ในรูปองศาหรือวินาที ขึ้นอยู่กับค่า A1

A1 = 0: มุมในรูปองศา

> 0: มุมในรูปวินาที

Tsta = เวลาที่เริ่มจ่ายพลังงานให้ระบบ [วินาที]

Tsto = เวลาสิ้นสุดที่จ่ายพลังงาน [วินาที]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 แหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า (Lightning surge) ทำหน้าที่จ่ายกระแส

**Component: SURGE**

Attributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
U/I	-1	SU	1	
Amp	10373			
A	-14662.756			
B	-2469135.802			
Tsta	0			
Tsto	1			

Group No: 0 Label: U

Comment:

Hide  
 Lock

OK Cancel Help

U/I = 0: แหล่งจ่ายแรงดัน

= -1: แหล่งจ่ายกระแส

Amp = ค่าคงที่ในหน่วย แอมแปร์หรือ โวลต์ ซึ่งไม่ใช่ค่ายอดสูงสุดของสัญญาณ

A = ค่าที่เป็นลบเพื่อกำหนดความลาดช่วงลง (falling slope)

B = ค่าที่เป็นลบเพื่อกำหนดความลาดช่วงขึ้น (rising slope)

Tsta = เวลาเริ่มการทำงานในหน่วยวินาที

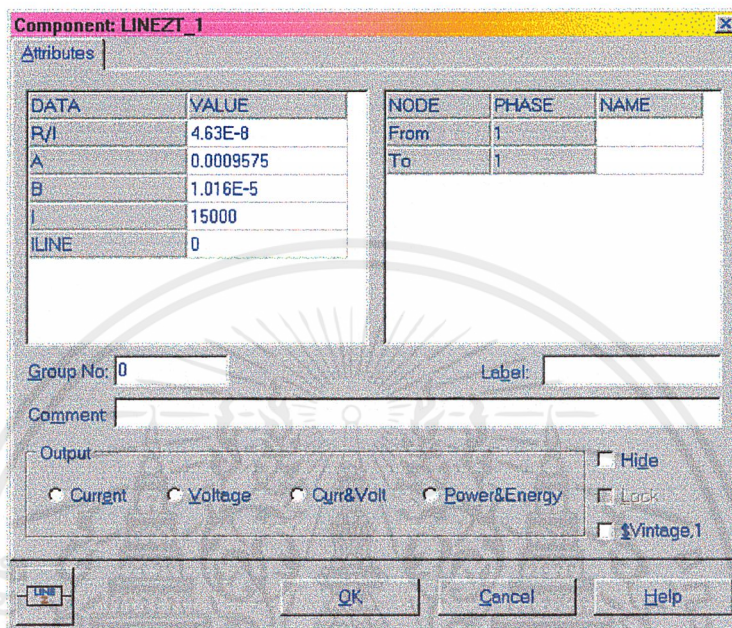
Tsto = เวลาสิ้นสุดการทำงานในหน่วยวินาที

สมการของสัญญาณ คือ  $Amp * [ \exp(A*t) - \exp(B*t) ]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. พารามิเตอร์ของสายส่งพลังงานไฟฟ้า

### 2.1 สายส่งระบบจำหน่าย (Distributed parameter)



- R/I = ความต้านทานต่อความยาว หน่วยโอห์มต่อความยาว
- A = ILINE = 0: A = ความเหนี่ยวนำ หน่วยมิลลิเฮนรี่ต่อความยาว ถ้า Xopt=0  
 A = ความเหนี่ยวนำ หน่วยโอห์มต่อความยาว ถ้า Xopt=ความถี่
- ILINE = 1: A = ค่าเสรีจร์อิมพีแดนซ์ หน่วยโอห์ม
- ILINE = 2: A = ค่าเสรีจร์อิมพีแดนซ์ หน่วยโอห์ม
- B = ILINE = 0: B = ความจุไฟฟ้า หน่วยไมโครฟารัดต่อความยาว ถ้า Copt=0  
 A = ความจุไฟฟ้า หน่วยไมโคร โอห์มต่อความยาว ถ้า Copt=ความถี่
- ILINE = 1: B = ความเร็วคลื่น หน่วยความยาวต่อวินาที
- ILINE = 2: B = เวลาเดินทางของคลื่น หน่วยวินาที
- L = ความยาวของสาย

## 2.2 สายส่งแบบพายน (Line PI)

DATA	VALUE
R	4.2E-8
L	0.0008681
C	9.207E-6

NODE	PHASE	NAME
From	1	
To	1	

Group No: 0      Label:      Comment:

Hide  
 Lock  
 Vintage, 1

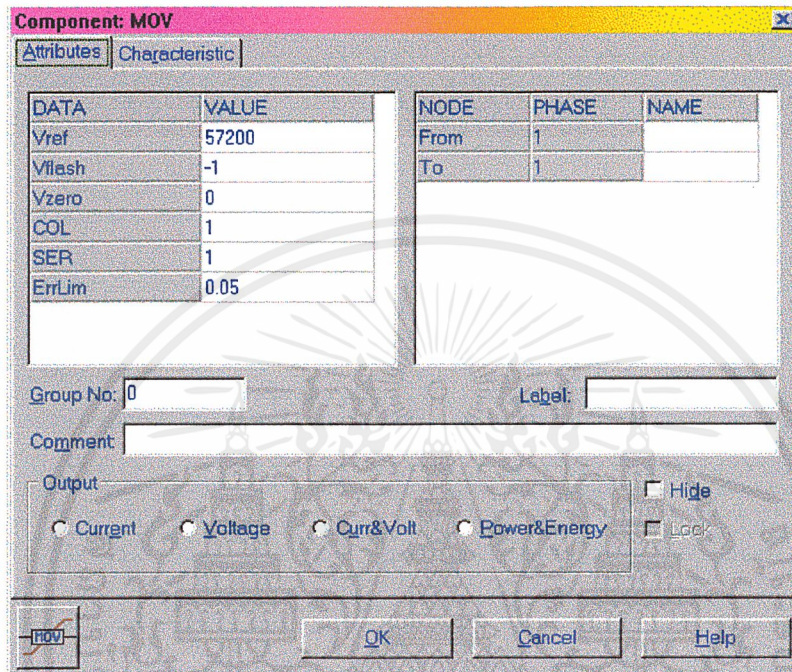
LINE      OK      Cancel      Help

R = ความต้านทาน หน่วยโอห์ม

L = ความเหนี่ยวนำ หน่วยมิลลิเฮนรี่ ถ้า  $X_{opt} = 0$   
ความเหนี่ยวนำ หน่วยโอห์ม ถ้า  $X_{opt} = \text{ความถี่}$

C = ความจุไฟฟ้า หน่วยไมโครฟารัด ถ้า  $C_{opt} = 0$   
ความจุไฟฟ้า หน่วยไมโครโอห์ม ถ้า  $C_{opt} = \text{ความถี่}$   
 $X_{opt}$  และ  $C_{opt}$  ตั้งที่เมนูของโปรแกรม

3. กับดักฟ้าผ่า(Lightning arrester) ทำหน้าที่กำจัดแรงดันเกินเนื่องจากกระแสฟ้าผ่า



- Vref = แรงดันอ้างอิง หน่วยโวลต์ สำหรับแต่ละก้อน
- Vflash = แรงดันวาทไฟที่ผิว ในหนึ่งหน่วยของ Vref
- Vzero = แรงดันเริ่มต้น หน่วยโวลต์
- COL = ตัวคูณประกอบ สำหรับจำนวนของแถวของตัวกับดักฟ้าผ่า  
แถวเดียว : COL = 0,1  
2 แถวขนานกัน : COL = 2
- SER = จำนวนก้อนที่ต่ออนุกรมกัน
- ErrLim = ความคงทน

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ เรื่องการติดตั้งกับดักฟ้าผ่านี้ แม้ในบางครั้งมีอุปสรรคเกิดขึ้นบ้าง ในเรื่อง ข้อมูลเอกสารต่างๆ และปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คงจะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี หากขาดบุคคล เหล่านี้ กลุ่มนักศึกษาผู้ดำเนินโครงการ ขอขอบพระคุณ คุณสมชาย เจริญศรีเกษม , คุณแสน วิศวกร ประจำแผนกสวิตช์เกียร์และอุปกรณ์ระบบแรงดัน กองวิศวกรรมอุปกรณ์ไฟฟ้า ฝ่ายวิศวกรรม ระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ช่วยเหลือเอื้อเฟื้อเอกสาร และให้คำแนะนำเป็นอย่างดี อีกทั้งขอขอบคุณ คุณคณินดา , คุณรัศมี , คุณเอี่ยมพร , คุณอาทิตย์ , คุณอุษณาภรณ์ ที่สละเวลา แรงกายแรงใจ และช่วยลงมือ เรียบเรียงรวบรวมข้อมูลให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นรูป เป็นร่างขึ้นมา และรวมถึงเพื่อนๆ , รุ่นน้องห้อง W , เพื่อนๆ ต่างภาค ต่างสถาบัน และเจ้าตัวน้อย (ลูกพี่ต่าย) ที่ให้กำลังใจ เสมอมา

ขอขอบคุณอาจารย์ เซาว์ ชมภูอินไหว ที่ให้ข้อเสนอแนะ และคำแนะนำ  
ขอขอบคุณ พ่อ-แม่ ที่ให้ทุนสนับสนุนมาร่ำเรียน และให้กำลังใจจนพบกับความสำเร็จ  
และที่ขาดไม่ได้ขอขอบคุณตัวเองที่ไม่ย่อท้อต่อความลำบาก

ผู้ดำเนินโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ตำรวย สังข์สะอาด,ดร. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2528
- [2] ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล,รศ. ระบบไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] สมชัย เจริญศรีเกษม การศึกษาทรานเซียนต์ในสวิตซ์คาปาซิเตอร์โดยอาศัย EMTP (Electromagnetic Transients Program) เอกสารประกอบการบรรยาย การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [4] ชัยณพวงศ์ สัจจะวัฒนวิมล โปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transients Program) บทความวิชาการ ไฟฟ้าอุตสาหกรรม
- [5] Greenwood, A. , Electrical Transients in Power System . Wiley-interscience 1971
- [6] Kuffel , E. , & Zeangl ,w.s. , High Voltage Engineering Program Press plc. 1984
- [7] Grainger , J. , John & Stevenson , J. , William D. Power System Analysis Newyork : Mcgraw-Hill Book Company Inc. 1994
- [8] Microtran , Electromagnetic Transients Analysis Program : Microtran Power System corporation
- [9] Prikler Laszlo & Hoidalen Hans Kr. ATPDraw for Window 3.1x/95/NT version 1.0 1998
- [10] ABB High Voltage Technologies Ltd. Surge Arrester and Overvoltage Protection in MV network
- [11] ABB High Voltage Technologies Ltd. Zinc Oxide Surge Arrester Selection Guide
- [12] IEEE/ANSI Std C62.22-1991 , IEEE Guide for the Application of Metal Oxide Surge Arrester for Alternating Current System
- [13] W.Schmidt , J. Meppelink , B.Richter.et al. , “ Behavior of MO-Surge Arrester Transients” IEEE Transaction on Power Delivey , Vol.4 No.1, Jan 1989
- [14] F.Heidler , J.M.Cvetic , B.V.Stanic “ Calculation of Lightning Current Parameter “ IEEE Transaction on Power Delivery Voi.14 No.2 April 1999
- [15] P.Pinceti , M.Giannettoni . “ A simplified model for zinc oxide surge arresters “ IEEE Transaction on Power Delivery Vol.14 No. 2 , April 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

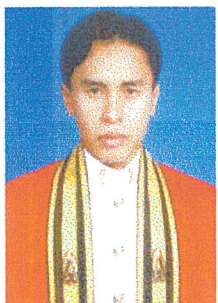
## ผู้จัดทำโครงการ



ชื่อ นายศิริชัย จันทน์หอม  
เกิดวันที่ 18 เมษายน 2513  
ที่อยู่ 15/17 ถนนกำแพงเพชร ตำบลในเมือง  
อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร 62000  
เบอร์โทรศัพท์ (055)711217  
e-mail : chanhom\_sirichai@hotmail.com



ชื่อ นายยุทธนา ลายพรรณพร  
เกิดวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2520  
ที่อยู่ 102/334 หมู่ 4 ถนนร่มเกล้า ตำบลคลองสองต้นนุ่น  
เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
เบอร์โทรศัพท์ 5439302  
e-mail : laipunpon\_yuthana@hotmail.com



ชื่อ นายอรรถพล ภมรพล  
เกิดวันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2520  
ที่อยู่ 1 หมู่ 8 ตำบลบางคูรัด อำเภอบางบัวทอง  
จังหวัดนนทบุรี 11110  
เบอร์โทรศัพท์ 9270468  
e-mail : pamopol\_atthapol@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้