



ปีการศึกษา 2538

การเขียนโปรแกรมคำนวณและเปรียบเทียบ

วิธีการหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979  
พร้อมแสดงการทำงานร่วมกัน(COORDINATION)ของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ศุทธิ บรรจงจิตร

อ.ชาย ชมภูอินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

037054

ปริญญาโทปีการศึกษา 2538

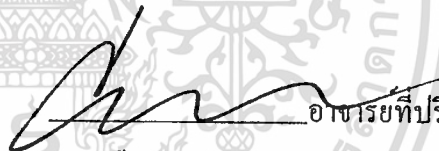
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเขียนโปรแกรมคำนวณและเปรียบเทียบวิธีการหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979 พร้อมแสดงการทำงานร่วมกัน(COORDINATION)ของ อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

- 1.นางสาวเกษศิรินทร อันพันลำ
- 2.นางสาวจุฑารัตน์ เกิดจันทร์
- 3.นายนพพล แซ่ตั้ง

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.สุที บรรจงจิตร)

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อ.ชาย ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเขียนโปรแกรมคำนวณและเปรียบเทียบ

วิธีการหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979

พร้อมแสดงการทำงานร่วมกัน(COORDINATION)ของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

นางสาวเกษศิริพันธ์ อันพันลำ

นางสาวจุฑารัตน์ เกิดจันทร์

นายนพดล แซ่ตั้ง

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ศุติ บรรจงจิตร

อ.ชาย ชมภูอินไหว

ปีการศึกษา 2538

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษา และการเขียน โปรแกรมคำนวณ และเปรียบเทียบวิธีการหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979 ที่ได้รับการปรับปรุงมาเรียบร้อยแล้ว ความแตกต่างที่สำคัญของทั้งสองมาตรฐานได้แก่ วิธีการคำนวณ, การสมมุติค่า, กระแสที่คำนวณได้ และผลต่างๆ พร้อมทั้งได้แสดงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ ฟิวส์(Fuses) รีเลย์(Relays) และเซอร์กิตเบรกเกอร์(Circuit Breakers) ให้สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างสอดคล้อง และเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Short-Circuit Current Calculation : A Comparison between Methods of  
IEC 909 and ANSI/IEEE C37.010-1979 Standards  
and Coordination of Protection Devices  
Using Computer Programming**

Katsirin            Anpanlam

Chutharat        Kerdchun

Noppadol         Sae-tung

Advisors

Assc. Prof. Sulee Banjongjit

Lecturer Chai     Chompoo-invai

1995

**Abstract**

This thesis is a short-circuit current calculation and a comparison between revised methods of IEC 909 and ANSI/IEEE C37.010-1979 standards by using computer programming. The most significant differences of two standards are methodologies , assumptions , computed currents and results. Then choose protection devices - fuses , relays and circuit breakers - to use in single line diagram and coordinate protection devices by coordination.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ	2
บทที่ 2 การคำนวณหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909	3
2.1 บทนำ	3
2.2 มาตรฐานการคำนวณค่ากระแสลัดวงจร	3
2.2.1 ตามIEC 909 ได้แบ่งการลัดวงจรในระบบไฟฟ้าออกเป็น 4 ชนิด	3
2.2.2 ตามIEC 909 ได้แบ่งการคำนวณกระแสลัดวงจรออกเป็น 2 ประเภท	4
2.3 รูปคลื่นกระแสลัดวงจร	5
2.4 แหล่งจ่ายไฟสมมูล	6
2.5 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร	7
2.5.1 ระบบไฟฟ้า	8
2.5.2 หม้อแปลง	9
2.5.3 สายเหนือศีรษะและเคเบิล	12
2.5.4 มอเตอร์	14
2.5.5 การเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ กระแส และ แรงดัน	15
2.6 การคำนวณกระแสลัดวงจรกรณีไม่คิดผลของมอเตอร์	15
2.6.1 กระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร	15
2.6.2 กระแสลัดวงจรค่ายอด	15
2.7 การคำนวณกระแสลัดวงจรกรณีคิดผลของมอเตอร์	16
2.7.1 กระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร	17
2.7.2 กระแสลัดวงจรค่ายอด	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 2.7.3 กระแสลัดวงจรแบบสมมาตร เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน 17 คำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4	กระแสลัดวงจรอยู่ตัว	19
2.8	การลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	19
2.8.1	แหล่งจ่ายไฟสมมูล	21
2.8.2	ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร	21
2.8.3	การหาค่ากระแสลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	22
2.8.3.1	การลัดวงจรจากแหล่งจ่ายไฟเดียว	22
2.8.3.2	การลัดวงจรจากแหล่งจ่ายไฟหลายแหล่งแบบไม่ใช่ตาข่าย	23
บทที่ 3	การคำนวณหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน ANSI/IEEE C37.010-1979	25
3.1	พื้นฐานเบื้องต้นในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร	25
3.2	การเกิดกระแสลัดวงจร	25
3.3	ชนิดของการเกิดการผิดปกติ	27
3.4	พื้นฐานสำหรับหาพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์	28
3.4.1	เซอร์กิตเบรกเกอร์กำลัง	28
3.4.2	ฟิวส์แรงสูง	32
3.4.3	เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ	33
3.5	การคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร	34
3.6	การคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรในระบบที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 1 kV	36
3.6.1	เซอร์วิสเอนทรานซ์	36
3.6.2	การผิดปกติ ณ จุดต่างๆในระบบไฟฟ้า	37
3.6.3	เมื่อเกิดการผิดปกติที่ขั้วของหม้อแปลง	37
3.6.4	เมื่อเกิดการผิดปกติบนสายป้อนและวงจรย่อย	38
3.7	การคำนวณหากระแสลัดวงจรที่ระดับแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 1 kV	38
3.7.1	วิธีที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่ระดับแรงดันมากกว่า 1kV	40
3.7.1.1	วิธีอย่างง่ายโดยการพิจารณาเฉพาะค่า E/X	40
3.7.1.2	วิธีใช้ค่า E/X ที่มีการชดเชยในส่วนของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรงและกระแสลัด	41
3.7.2	ค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องจักรไฟฟ้าที่หมุนได้	48
3.7.3	ค่าความต้านทานของระบบและอัตราส่วน X/R	48
บทที่ 4	ตัวอย่างแสดงการคำนวณและเปรียบเทียบการหากระแสลัดวงจร	

ตามมาตรฐาน IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979

52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า	62
5.1 อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า	62
5.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์	63
5.2.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับระบบแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่า 600V	63
5.2.1.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบอากาศ	63
5.2.1.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบสูญญากาศ	64
5.2.1.3 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบน้ำมัน	64
5.2.1.4 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบใช้ก๊าซเติม	64
5.2.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับระบบแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่า 600V	64
5.2.2.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดอากาศ	64
5.2.2.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดโมลเตส	64
5.2.3 คุณสมบัติประจำตัวของเซอร์กิตเบรกเกอร์	65
5.3 อุปกรณ์ป้องกันแรงต่ำที่ควรรู้จัก	65
5.3.1 โมลเตสเซอร์กิตเบรกเกอร์	65
5.3.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบจำกัดกระแส	66
5.3.3 ตัวป้องกันมอเตอร์ชนิดตัดวงจรทันที	66
5.3.4 โซลิดสเตททริปเซอร์กิตเบรกเกอร์	67
5.3.5 เพาเวอร์แอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์	67
5.3.6 ฟิวส์แรงดันต่ำ	67
5.4 ฟิวส์	68
5.4.1 ฟิวส์แบบจำกัดกระแส	68
5.4.2 ฟิวส์แบบหน่วงเวลา	69
5.4.3 กราฟฟิวส์	69
5.5 รีเลย์ป้องกัน	69
5.6 การทำงานของวงจรผสม	71
5.7 สรุปหลักการของการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าเพื่อให้มี การทำงานร่วมกันในระบบไฟฟ้า	73
5.7.1 ข้อมูลที่จำเป็นที่ต้องใช้ในการศึกษาถึงการทำงานร่วมกัน ของอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า	74
5.8 ขกตัวอย่างการโคออดิเนท	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.9 การวิเคราะห์การทำงานร่วมกัน	78
บทที่ 6 วิธีการใช้โปรแกรม	80
6.1 ส่วนการคำนวณ	80
6.2 ส่วนการเลือกอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ามาทำงานร่วมกัน	80
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการลัดวงจรแบบต่างๆ	4
รูปที่ 2.2 แสดงรูปคลื่นของกระแสลัดวงจรไหลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	5
รูปที่ 2.3 (a) แสดงตัวอย่างวันไลน์ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้า ณ จุดลัดวงจร	7
(b) แสดงอิมพีแดนซ์ไดอะแกรมของรูปที่ 2.3 (a)	7
รูปที่ 2.4 (a) แสดงวันไลน์ไดอะแกรมและอิมพีแดนซ์ไดอะแกรมกรณีที่ไม่มีหม้อแปลง	8
(b) แสดงวันไลน์ไดอะแกรมและอิมพีแดนซ์ไดอะแกรมกรณีที่มีหม้อแปลง	8
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงค่า $x$ ที่สัมพันธ์กับอัตราส่วน $R/X$	16
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงค่า $\mu$ ที่สัมพันธ์กับอัตราส่วน $I_{KM}/I_{TM}$ หรือ $I_{KG}/I_{TG}$ และ $t_{min}$	18
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงค่า $q$ ที่สัมพันธ์กับค่า $m$	19
รูปที่ 2.8 รูปคลื่นของกระแสลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	20
รูปที่ 2.9 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสที่พิกัด	22
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างวันไลน์ไดอะแกรมการลัดวงจรจากแหล่งจ่ายไฟหลายแหล่งแบบไม่ใช่คาบ	23
รูปที่ 3.1 แสดงค่าที่ต้องการในการออกแบบเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลัง	31
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของวันไลน์ไดอะแกรมตัวอย่าง	34
รูปที่ 3.3 แสดงวงจรสมมูลอิมพีแดนซ์ของรูปที่ 3.2	35
รูปที่ 3.4 (a) วันไลน์ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในตัวอย่างที่ 1	40
(b) รีแอกแตนซ์ลำดับบวกสำหรับระบบในรูป (a)	40
(c) รีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์สำหรับระบบในรูป (a)	40
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟสโดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ	42
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดินโดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ	43
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟสและหนึ่งเฟสลงดินโดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรงอย่างเดียว	44
รูปที่ 3.8 (a) วันไลน์ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในตัวอย่างที่ 2	44
(b) อิมพีแดนซ์ลำดับบวกสำหรับระบบในรูป(a) (เซอร์กิตเบรกเกอร์ A)	45

(c) อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์สำหรับระบบในรูป(a) (เซอร์กิตเบรกเกอร์ A)	45
รูปที่ 3.9 (a) อิมพีแดนซ์ลำดับบวกสำหรับระบบในรูป 3.8(a) (เซอร์กิตเบรกเกอร์ B)	46
(b) อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์สำหรับระบบในรูป 3.8(a) (เซอร์กิตเบรกเกอร์ B)	46
รูปที่ 3.10 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับหม้อแปลงกำลัง	50
รูปที่ 3.11 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส	50
รูปที่ 3.12 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีโซลิดโรเตอร์ขนาดเล็ก และซิงโครมอเตอร์	50
รูปที่ 4.1 แสดงวันไลน์โคออร์เดเนตของระบบไฟฟ้าที่ใช้ประกอบตัวอย่างการแสดงผลการเปรียบเทียบวิธีการคำนวณหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979	51
รูปที่ 4.2 แสดงวงจรสมมูลค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกที่จุดลัดวงจร F2	55
รูปที่ 4.3 แสดงวงจรสมมูลลำดับบวกสำหรับคำนวณค่า $I_k''$ ที่ตำแหน่ง F3	57
รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างซีเล็กทีฟโคออดิเนต	76
รูปที่ 5.2 วันไลน์โคออร์เดเนตของตัวอย่างในหัวข้อที่ 5.8	77
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงการโคออดิเนต	79
รูปที่ 6.1 โพลวาร์ทการใช้โปรแกรมเพื่อคำนวณค่ากระแสไหลและกระแสลัดวงจร	82
รูปที่ 6.2 โพลวาร์ทแสดงการใช้โปรแกรมในการโคออดิเนตของอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า	83
รูปที่ 6.3 โพลวาร์ทแสดงการเขียนโปรแกรมเพื่อหาค่ากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC	84
รูปที่ 6.4 โพลวาร์ทแสดงการเขียนโปรแกรมเพื่อหาค่ากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE	85
รูปที่ 6.5 โพลวาร์ทแสดงการเขียนโปรแกรมเพื่อหาค่ากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE(ต่อ)	86
รูปที่ 6.6 แสดงการป้อนข้อมูลของอุปกรณ์ในวันไลน์โคออร์เดเนตที่วาดเสร็จแล้ว (ในรูปเป็นการป้อนข้อมูลในส่วนของระบบไฟฟ้า)	87
รูปที่ 6.7 แสดงผลการคำนวณกระแสปกติและกระแสลัดวงจรที่ได้จาก 2 มาตรฐาน ณ ตำแหน่งวงจรที่จ่ายไปยังโหลด	88
รูปที่ 6.8 แสดงกราฟอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าตัวแรกที่ได้ทำการเลือกโดยในรูปได้ทำการเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์	89
รูปที่ 6.9 แสดงกราฟการเลือกอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ามาทำการโคออดิเนตกัน โดยในรูปทำการเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ร่วมกับฟิวส์ 2 ตัว	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปที่ 6.10 โพลีชาร์ทแสดงการเขียนโปรแกรมเพื่อแสดงการโคออดิเนท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าตัวประกอบแรงดัน c	7
ตารางที่ 2.2 แสดงข้อมูลของหม้อแปลงทางด้านแรงดันต่ำ 400/230	10
ตารางที่ 2.3 แสดงข้อมูลของหม้อแปลงทางด้านแรงดันต่ำ 416/240	11
ตารางที่ 2.4 แสดงอิมพีแดนซ์รวมของระบบไฟฟ้ากับหม้อแปลงทางด้านแรงดันต่ำ 400/230	11
ตารางที่ 2.5 แสดงอิมพีแดนซ์รวมของระบบไฟฟ้ากับหม้อแปลงทางด้านแรงดันต่ำ 416/240	12
ตารางที่ 2.6 แสดงค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของสายไฟฟ้าแรงต่ำหุ้มฉนวนพีวีซี	13
ตารางที่ 2.7 แสดงค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของบัสเวย์	14
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าประมาณค่าสุดสำหรับกระแสที่ทำให้เกิดการอาร์ก	28
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าตัวคูณที่ใช้คูณกระแสสมมาตรเพื่อหากระแสไม่สมมาตร	29
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบอากาศ	30
ตารางที่ 3.4 ค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและค่าตัวคูณที่ใช้ในการคำนวณ	32
ตารางที่ 3.5 แสดงพิกัดมาตรฐานสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำชนิดอากาศ	34
ตารางที่ 3.6 แสดงค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวกที่ใช้ในการคำนวณของเครื่องจักรไฟฟ้าที่หมุนได้	48
ตารางที่ 3.7 แสดงค่าความต้านทานของอุปกรณ์ในระบบที่สามารถเลือกใช้ได้	49
ตารางที่ 3.8 แสดงช่วงของอัตราส่วน X/R ของอุปกรณ์ในระบบที่สามารถเลือกใช้ได้	49
ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลของมอเตอร์แรงดันสูงและค่ากระแสลัดวงจรบนบัสบาร์ช่วย B และบัสบาร์ช่วย C	52
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำด้านแรงดันต่ำ และข้อมูลของหม้อแปลง 10kV/0.693kV และ 10kV/0.4kV ตามลำดับ ซึ่งเชื่อมต่อกับบัสบาร์ช่วย B ซึ่งใช้ในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรที่จุด F3	53
ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ M1-M14	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แต่เดิมในการคำนวณหากระแสลัดวงจรอันเนื่องมาจากความผิดปกติในระบบไฟฟ้า เราจำเป็นต้องทำการคำนวณด้วยมือ และนำผลที่ได้มาใช้เป็นส่วนประกอบ ในการตัดสินใจเลือกอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าที่เลือกมานั้นจำเป็นต้องมีการทำงานร่วมกันในการป้องกันระบบไฟฟ้าจากความผิดปกติต่างๆที่อาจจะเกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี การคำนวณด้วยมือและการเลือกดังกล่าว จะเป็นการล่าช้า อีกทั้งอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ามาใช้ได้ ดังนั้นการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำการเขียนขึ้น มาใช้ช่วยอำนวยความสะดวกในการคำนวณหากระแสลัดวงจร และช่วยในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง จากความสำคัญตรงนี้ จึงได้เป็นที่มาของการทำโครงการนี้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ

- 1.เข้าใจการคำนวณหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979
- 2.สามารถเปรียบเทียบ และแสดงข้อแตกต่างในส่วนสาระสำคัญที่เกี่ยวกับโครงการระหว่างมาตรฐาน IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979 ได้
- 3.สามารถนำผลการคำนวณกระแสลัดวงจรที่ได้ มาเป็นส่วนประกอบช่วยในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าที่เลือกมาใช้นั้น จะต้องมีการทำงานร่วมกันเป็นอย่างดี
- 4.สามารถเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาเดลไฟ(DELPHI LANGUAGE)ได้
- 5.เขียนโปรแกรมภาษาเดลไฟ ที่จะช่วยอำนวยความสะดวกในการคำนวณหากระแสลัดวงจร และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างมาตรฐาน IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979 และช่วยในการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าที่มีการทำงานร่วมกันได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ

1.เขียนโปรแกรมภาษาเตลไฟ เพื่อใช้ในการคำนวณหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979

2.เขียนโปรแกรมภาษาเตลไฟ เพื่อแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979

3.เขียนโปรแกรมภาษาเตลไฟ เพื่อช่วยในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าที่มีการทำงานร่วมกันเป็นอย่างดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### การคำนวณหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909

#### 2.1 บทนำ

ในการเลือกใช้อุปกรณ์และระบบไฟฟ้า นั้น นอกจากจะคำนึงถึงกระแสขณะใช้งานปกติแล้ว ยังจะต้องคำนึงถึงกระแสขณะที่เกิดการลัดวงจรด้วย การลัดวงจรที่เกิดจากความผิดพลาดโดยอุบัติเหตุหรือความไม่ตั้งใจ จะทำให้อิมพีแดนซ์(Impedance)ของวงจรมีค่าลดลง ส่งผลให้เกิดกระแสไหลในวงจรมากกว่าปกติหลายเท่า กระแสลัดวงจรนี้จะทำให้เกิดความเครียดทางกล (Mechanical Stress) และความเครียดทางความร้อน(Thermal Stress)ขึ้น ซึ่งสามารถส่งผลทำให้อุปกรณ์เสียหายและเป็นอันตรายต่อคนได้

การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้า เป็นสิ่งจำเป็นที่สุดอย่างหนึ่งของการออกแบบระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าจะต้องทราบค่ากระแสลัดวงจรล่วงหน้า เพื่อที่จะได้เลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสม ถ้าผู้ออกแบบเลือกใช้อุปกรณ์ที่ทนกระแสลัดวงจรไม่เพียงพอก็อาจจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ทรัพย์สินและชีวิตเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นได้ ในทางกลับกันถ้าผู้ออกแบบเลือกใช้นาฬิกาของอุปกรณ์ป้องกันใหญ่เกินไป ราคาติดตั้งระบบไฟฟ้าก็จะแพงเกินความจำเป็น ดังนั้นการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าที่ดี

#### 2.2 มาตรฐานการคำนวณค่ากระแสลัดวงจร

การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรมีความสำคัญอย่างมากต่อการเลือกใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า หลายประเทศจึงได้มีข้อกำหนดหรือมาตรฐานในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจร และเพื่อให้การคำนวณเป็นไปในแนวทางเดียวกัน ทาง IEC (International Electrotechnical Commission) จึงได้ร่างมาตรฐานสากลสำหรับการคำนวณกระแสลัดวงจรขึ้น คือ IEC 909 “Short-circuit Current Calculation in Three-phase a.c. system”

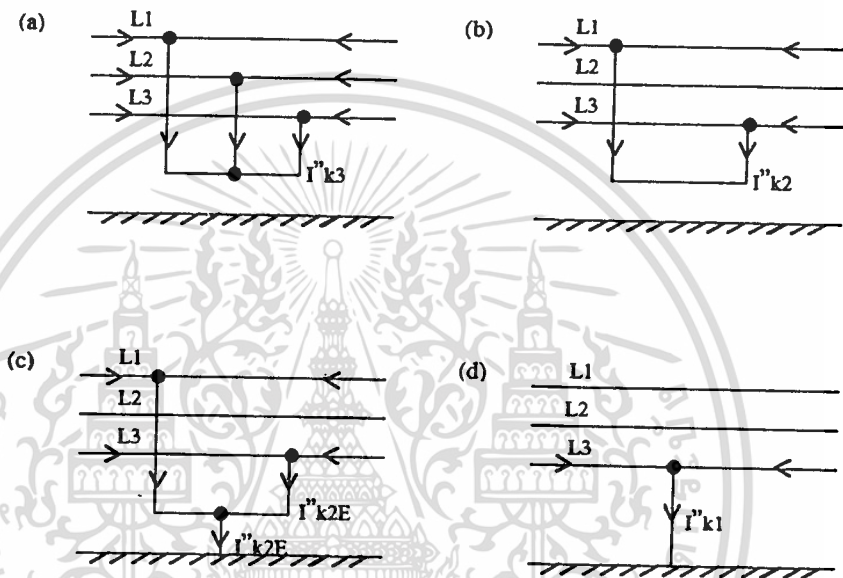
##### 2.2.1 ตาม IEC 909 ได้แบ่งการลัดวงจรในระบบไฟฟ้าออกเป็น 4 ชนิด คือ

- การลัดวงจร 3 เฟสสมดุล(Balanced Three-phase Circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การลัดวงจรระหว่างสายโดยไม่เกี่ยวข้องกับพื้นดิน(Line-to-Line Short Circuit Without Earth Connection)
- การลัดวงจรระหว่างสายและเกี่ยวข้องกับพื้นดิน(Line-to-Line Short Circuit With Earth Connection)
- การลัดวงจรระหว่างสายกับพื้นดิน(Line-to-Earth Short Circuit)

การลัดวงจรทั้ง 4 ชนิดได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการลัดวงจรแบบต่างๆ

2.2.2 มาตรฐาน IEC 909 ได้แบ่งการคำนวณกระแสลัดวงจรออกเป็น 2 ประเภท คือ

- การลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Far-from-Generator Short Circuit)
- การลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Near-to-Generator Short Circuit)

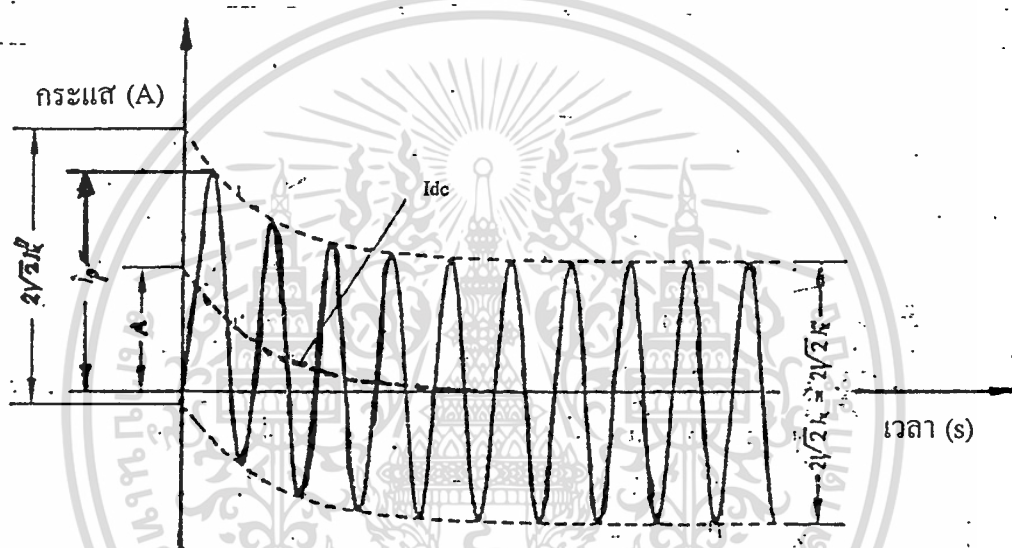
การลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายตลอดช่วงเวลาของการลัดวงจร และค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจะมีค่าคงที่ ส่วนการลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น ค่ารีแอกแตนซ์(Reactance)ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสลัดวงจรส่วนกระแสลัด จะค่อยๆมีค่าลดลง และโดยทั่วไปการลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุล จะให้ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด การคำนวณก็ทำได้สะดวก โดยทำการคำนวณเพียงเฟสเดียวก็เพียงพอ ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงการลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุล เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 รูปคลื่นกระแสลัดวงจร

เมื่อเกิดการลัดวงจรไถ่จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้น กระแสลัดวงจรจะเป็นผลของกระแสสองส่วนด้วยกัน คือ

- ส่วนประกอบกระแสสลับ ซึ่งมีขนาดคงที่ตลอดระยะเวลาการเกิดลัดวงจร
- ส่วนประกอบกระแสตรง ซึ่งมีค่าสูงสุดค่าหนึ่ง และค่อยๆมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์



รูปที่ 2.2 แสดงรูปคลื่นของกระแสลัดวงจรไถ่จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

นิยามที่สำคัญตาม IEC 909 มีดังนี้

- กระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร  $I''_k$  (Initial Symmetrical Short-circuit Current) หมายถึง ค่าอาร์เอ็มเอส(rms)ของส่วนประกอบกระแสสลับของกระแสลัดวงจรขณะเริ่มลัดวงจร
- กระแสลัดวงจรค่ายอด  $i_p$  (Peak Short-circuit Current) หมายถึง ค่าสูงสุดของกระแสลัดวงจร จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่า กระแสลัดวงจรค่ายอด  $i_p$  จะเกิดขึ้นในช่วงไม่กี่ไมโครวินาทีแรกของการเกิดลัดวงจร
- กระแสลัดวงจรอยู่ตัว  $I_k$  (Steady State Short-circuit Current) หมายถึง ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสลัดวงจรซึ่งยังคงมีอยู่หลังจากการลดลงของภาวะชั่วคราว(Transient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระแสตัดวงจรแบบสมมาตร  $I_b$  (Symmetrical Short-circuit Breaking Current) หมายถึง ค่าอาร์เอ็มเอสของส่วนประกอบกระแสลับของกระแสตัดวงจรขณะที่หน้าสัมผัสชั่วคราวแรกของอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งแยกออก
- กำลังลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร  $S''_k$  (Initial Symmetrical Short-circuit (Apparent) Power) หมายถึง ค่าที่ได้จากผลคูณของกระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร  $I''_k$  กับ  $\sqrt{3}$  เท่าของแรงดันของระบบ  $U_n$

$$S''_k = (\sqrt{3})I''_k U_n$$

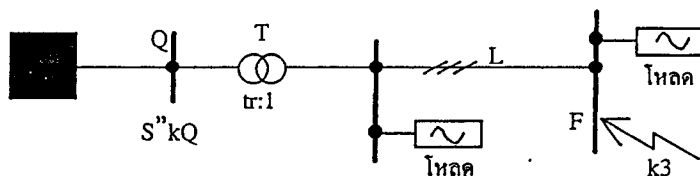
- แรงดันของระบบ  $U_n$  (Nominal System Voltage) หมายถึง ค่าแรงดันระหว่างสาย ซึ่งระบบได้รับการออกแบบ และลักษณะการทำงานได้อ้างอิงถึง

## 2.4 แหล่งจ่ายไฟสมมูล

ตาม IEC 909 เมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุดใดๆในระบบไฟฟ้า ณ จุดนั้นอาจจะแทนได้ด้วยแหล่งจ่ายไฟสมมูล(Equivalent Voltage Source) โดยที่แหล่งจ่ายไฟสมมูลจะเป็นแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียวในระบบ ส่วนระบบไฟฟ้า เครื่องจักรกลซิงโครนัส(Synchronous Machine) และเครื่องจักรกลอซิงโครนัส(Asynchronous Machine) จะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ภายในของมัน

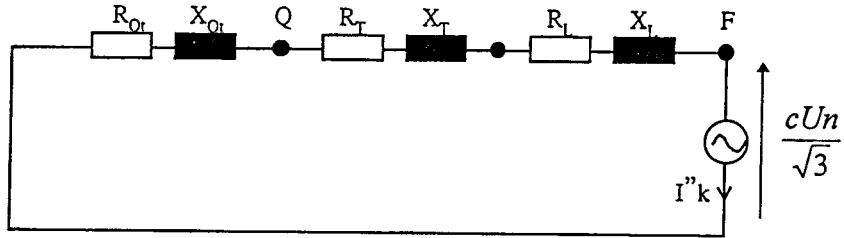
รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของแหล่งจ่ายไฟสมมูล ณ ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร F ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียวในระบบ ส่วนแหล่งจ่ายไฟอื่นๆในระบบให้มีค่าเป็นศูนย์ ที่ตำแหน่งลัดวงจร แหล่งจ่ายไฟสมมูลจะมีค่า  $cU_n/\sqrt{3}$  โดย c คือตัวประกอบแรงดัน (Voltage Factor) และ  $U_n$  คือ แรงดันของระบบที่ใช้

ค่าตัวประกอบแรงดัน c จะมีค่าแตกต่างกันไปตามระบบแรงดันที่ใช้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 2.3 (a) แสดงตัวอย่างวันไลน์ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าระบบหนึ่ง ณ จุดเกิดการลัดวงจร F

(b) แสดงอิมพีแดนซ์ไดอะแกรมของรูปที่ 2.3 (a)

พิกัดแรงดันปกติของระบบ ( $U_n$ )	ค่าตัวประกอบแรงดัน c สำหรับการคำนวณในกรณี	
	กระแสลัดวงจรสูงสุด ( $c_{max}$ )	กระแสลัดวงจรต่ำสุด ( $c_{min}$ )
พิกัดแรงดันต่ำ 100-1000 V		
a) 230 V/400 V	1.00	0.95
b) พิกัดแรงดันอื่นๆ	1.05	1.00
พิกัดแรงดันปานกลาง 1-35 kV	1.10	1.00
พิกัดแรงดันสูง 35-230 kV	1.10	1.00

หมายเหตุ :  $cU_n$  ไม่ควรมีค่าเกินพิกัดแรงดันสูงสุด  $U_m$  ของอุปกรณ์ของระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 ค่าตัวประกอบแรงดัน c

## 2.5 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร

นอกจากจะต้องทราบค่าแหล่งจ่ายไฟสมมูลแล้ว ยังจำเป็นต้องทราบค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรด้วย ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรอาจแบ่งออกเป็นส่วนๆ ได้ดังนี้

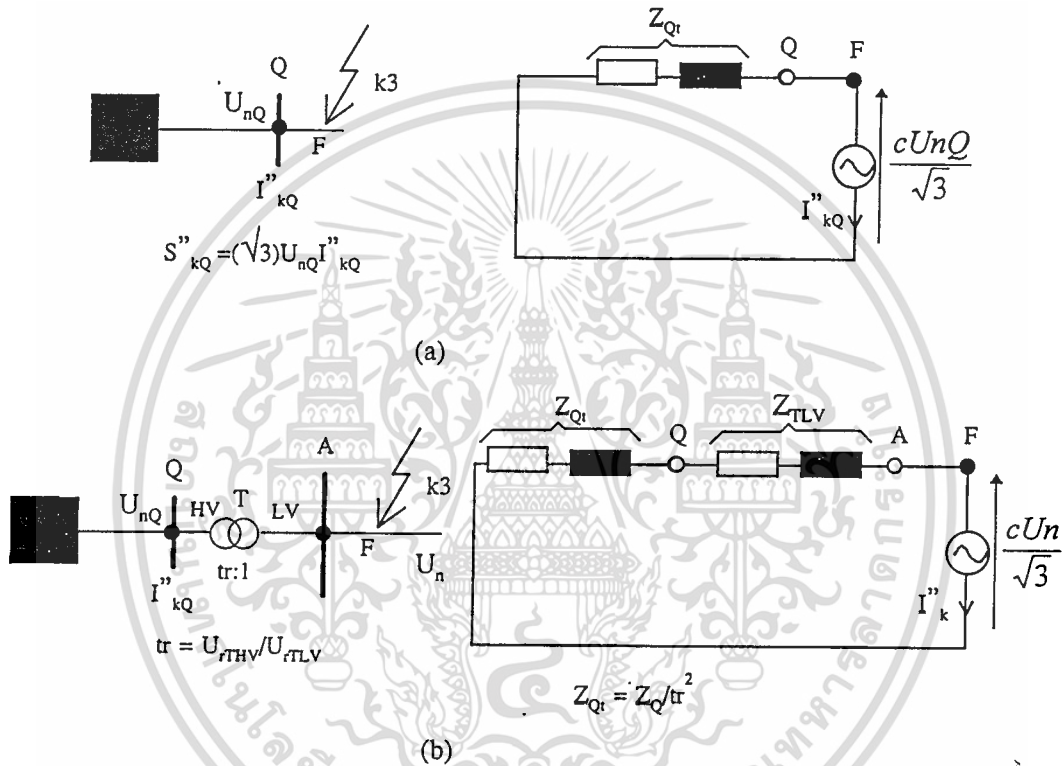
- ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า
- ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง
- ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง
- ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 ระบบไฟฟ้า (Electrical System)

ขนาดของระบบไฟฟ้าอาจแทนได้ด้วยค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร  $S''_{kQ}$  (Initial Symmetrical Short-circuit Power) ถ้าระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่มากจนถือว่าเป็นบัสอนันต์ (Infinite Bus) จะได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบไฟฟ้ามี่ค่าน้อยมากจนถือได้ว่ามีค่าเป็นศูนย์

รูปที่ 2.4 จะแสดงรูปของระบบและวงจรสมมูลสำหรับระบบไฟฟ้า ทั้งกรณีที่มีหม้อแปลงและกรณีที่ไม่มีหม้อแปลง



รูปที่ 2.4 (a) แสดงวันไลน์ไดอะแกรมและอิมพีแดนซ์ไดอะแกรมกรณีที่ไม่มีหม้อแปลง

(b) แสดงวันไลน์ไดอะแกรมและอิมพีแดนซ์ไดอะแกรมกรณีที่มีหม้อแปลง

พิจารณาการลัดวงจรในรูปที่ 2.4 (a) ถ้าทราบกำลังไฟฟ้าลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร  $S''_{kQ}$  หรือกระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร  $I''_{kQ}$  ที่จุด Q ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล  $Z_Q$  ของระบบที่จุด Q สามารถหาได้จาก

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} = \frac{cU_{nQ}}{I''_{kQ}\sqrt{3}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนกรณีการลัดวงจรในรูปที่ 2.4 (b) ซึ่งจ่ายไฟจากระบบแรงดันปานกลางหรือแรงดันสูงผ่านหม้อแปลง ถ้าทราบกำลังไฟฟ้ลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร  $S''_{kQ}$  หรือกระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร  $I''_{kQ}$  ที่จุด Q ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล  $Z_{Qr}$  ซึ่งแปลงให้อยู่ทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง สามารถหาได้จาก

$$Z_{Qr} = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} * \frac{1}{t_r^2} = \frac{cU_{nQ}}{I''_{kQ}\sqrt{3}} * \frac{1}{t_r^2}$$

โดยที่ :  $U_{nQ}$  = แรงดันของระบบที่จุด Q  
 $S''_{kQ}$  = กำลังลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตรที่จุด Q  
 $I''_{kQ}$  = กระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตรที่จุด Q  
 $c$  = ตัวประกอบแรงดัน  
 $t_r$  = พิกัดอัตราส่วนของหม้อแปลง (Rated Transformation Ratio)  
 โดยที่ตัวเปลี่ยนแท็ป (Tap-changer) อยู่ในตำแหน่งหลัก

ในกรณีที่ระบบมีแรงดันสูงกว่า 35 kV จ่ายด้วยสายส่งเหนือศีรษะ ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล  $Z_Q$  อาจพิจารณาเพียงคาร์รีแอกแตนซ์เพียงอย่างเดียว คือ  $Z_Q = jX_Q$

ส่วนในกรณีอื่นๆ ถ้าไม่ทราบค่าความต้านทาน  $R_Q$  ของระบบไฟฟ้าที่แน่นอน ให้ใช้ความสัมพันธ์

$$R_Q = 0.1X_Q \quad \text{โดยที่} \quad X_Q = 0.995Z_Q$$

ส่วนค่ากำลังไฟฟ้ลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร และกระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร นั้น สามารถหาได้จากทางการไฟฟ้า สำหรับที่ระดับแรงดัน 22 kV และ 24 kV นั้น โดยทั่วไปจะกำหนดให้  $S''_{kQ} = 500 \text{ MVA}$  ซึ่งถ้านำมาตามสูตรที่กล่าวมาแล้ว จะได้ว่า

$$\text{ระบบ 400/230 } Z_{Qr} = 0.352 \Omega \quad X_{Qr} = 0.35 \Omega \quad R_{Qr} = 0.04 \Omega$$

$$\text{ระบบ 416/240 } Z_{Qr} = 0.382 \Omega \quad X_{Qr} = 0.38 \Omega \quad R_{Qr} = 0.04 \Omega$$

### 2.5.2 หม้อแปลง (Transformer)

ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด  $Z_T = R_T + jX_T$  สามารถคำนวณได้จากข้อมูลค่าพิกัดของหม้อแปลงดังนี้

$$Z_T = \frac{u_{kT}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}$$

$$R_T = \frac{u_{rT}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{kT}}{3I_{rT}^2}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่ :  $U_{rT}$  = พิกัดแรงดันของหม้อแปลงด้านแรงสูงหรือด้านแรงต่ำ  
 $I_{rT}$  = พิกัดกระแสของหม้อแปลงด้านแรงสูงหรือแรงต่ำ  
 $S_{rT}$  = พิกัดกำลังปรากฏของหม้อแปลง  
 $P_{krT}$  = กำลังสูญเสียทั้งหมดในขดลวดของหม้อแปลงที่พิกัดกระแส  
 $u_{kr}$  = พิกัดแรงดันลัดวงจร เป็น %  
 $u_{Rr}$  = พิกัดแรงดันโอห์ม (Ohmic Voltage) เป็น %

สำหรับข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณนั้น สามารถหาได้จากป้ายพิกัดหรือสอบถามจากบริษัทผู้ผลิต ตารางที่ 2.2 และ 2.3 แสดงค่าข้อมูลต่างๆของหม้อแปลงแบบน้ำมัน ขนาดพิกัดต่างๆ โดยที่ด้านแรงสูง = 22 , 33 kV ด้านแรงต่ำ = 400/230 V และด้านแรงสูง = 12 , 24 kV ด้านแรงต่ำ = 416/240 V ตามลำดับ ส่วนตารางที่ 2.4 และ 2.5 แสดงค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบไฟฟ้ากับหม้อแปลง ระบบ 400/230 V และ 416/240 V ตามลำดับ

พิกัดกำลัง(kVA)	$I_{FL}$ (A)	% $u_k$	$P_L$ (kW)	$Z_T$ (m $\Omega$ )	$R_T$ (m $\Omega$ )	$X_T$ (m $\Omega$ )
315	455	4	3.9	20.32	6.29	19.13
400	577	4	4.6	16.0	4.60	15.32
500	722	4	5.5	12.8	3.52	9.82
630	909	6	6.5	10.16	2.62	9.82
800	115	6	11.0	12.00	2.75	11.68
1000	1443	6	13.5	9.60	2.16	9.35
1250	1804	6	16.4	7.068	1.68	7.49
1600	2309	6	19.8	6.00	2.75	5.87
2000	2887	6	24.0	4.80	2.16	4.70
2500	3608	6	26.8	3.84	0.69	3.78

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อมูลของหม้อแปลงด้านแรงต่ำ 400/230 V

พิกัดกำลัง(kVA)	$I_{FL}$ (A)	% $u_k$	$P_L$ (kW)	$Z_T$ (m $\Omega$ )	$R_T$ (m $\Omega$ )	$X_T$ (m $\Omega$ )
315	437	4	3.9	21.98	6.81	20.90
400	555	4	4.6	17.31	4.98	16.58
500	694	4	5.5	13.84	3.81	13.31
630	874	4	6.5	10.99	2.83	10.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่ในชนวนด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

800	1110	6	11.0	12.98	2.97	12.63
1000	1388	6	13.5	10.38	2.34	10.11
1250	1735	6	16.4	8.31	1.82	8.11
1600	2221	6	19.8	6.49	1.34	6.35
2000	2776	6	24.0	5.19	1.04	5.09
2500	3470	6	26.8	4.15	0.74	4.08

ตารางที่ 2.3 แสดงข้อมูลของหม้อแปลงด้านแรงต่ำ 416/240 V

พิกัดของหม้อแปลง (kVA)	อิมพีแดนซ์ของหม้อ แปลง(m $\Omega$ )	อิมพีแดนซ์ของระบบไฟ ฟ้า(m $\Omega$ )	อิมพีแดนซ์รวม (m $\Omega$ )
315	6.29+j19.32	0.04+j0.35	6.33+j19.67
400	4.60+j15.32	0.04+j0.35	4.64+j15.67
500	3.52+j12.31	0.04+j0.35	3.56+j12.66
630	2.62+j9.82	0.04+j0.35	2.66+j10.17
800	2.75+j11.68	0.04+j0.35	2.79+j12.03
1000	2.16+j9.35	0.04+j0.35	2.20+j9.70
1250	1.68+j7.49	0.04+j0.35	1.72+j7.84
1600	1.24+j5.87	0.04+j0.35	1.28+j6.22
2000	0.96+j4.70	0.04+j0.35	1.0+j5.05
2500	0.69+j3.78	0.04+j0.35	0.73+j4.13

ตารางที่ 2.4 แสดงอิมพีแดนซ์รวมของระบบไฟฟ้ากับหม้อแปลงด้านแรงต่ำ 400/230 V

พิกัดของหม้อแปลง (kVA)	อิมพีแดนซ์ของ หม้อแปลง(m $\Omega$ )	อิมพีแดนซ์ของระบบ ไฟฟ้า(m $\Omega$ )	อิมพีแดนซ์รวม (m $\Omega$ )
315	6.81+j20.90	0.04+j0.35	6.85+j21.28
400	4.98+j16.58	0.04+j0.35	5.02+j16.96
500	3.81+j13.31	0.04+j0.35	3.85+j13.69
630	2.83+j10.62	0.04+j0.35	2.87+j11.00
800	2.97+j12.63	0.04+j0.35	3.01+j13.01
1000	2.34+j10.11	0.04+j0.35	2.38+j10.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1250	1.82+j8.11	0.04+j0.35	1.86+j8.49
1600	1.34+j6.35	0.04+j0.35	1.38+j6.73
2000	1.04+j5.09	0.04+j0.35	1.08+j5.47
2500	0.74+j4.08	0.04+j0.35	0.78+j4.46

ตารางที่ 2.5 แสดงอิมพีแดนซ์รวมของระบบไฟฟ้ากับหม้อแปลงด้านแรงต่ำ 416/240 V

### 2.5.3 สายเหนือศีรษะและเคเบิล (Overhead Lines and Cables)

ค่าอิมพีแดนซ์ลวดวงจร  $Z_L = R_L + jX_L$  สามารถหาได้โดยการคำนวณจากข้อมูลต่างๆของตัวนำ ได้แก่ พื้นที่หน้าตัดและระยะศูนย์กลางของตัวนำ

ค่าความต้านทานประสิทธิผล(Effective Resistance)ต่อหน่วยความยาว  $R'_L$  ของสายเหนือศีรษะที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สามารถคำนวณได้จาก ค่าพื้นที่หน้าตัด  $q_n$  และค่าความต้านทานจำเพาะ  $\rho$  ดังนี้

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n}$$

โดยที่ :  $\rho = 1/54 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  สำหรับตัวนำทองแดง

$\rho = 1/34 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  สำหรับตัวนำอลูมิเนียม(Aluminium)

$\rho = 1/31 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  สำหรับตัวนำอลูมิเนียมอัลลอยด์(Aluminium Alloy)

ส่วนค่ารีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาว  $X'_L$  สำหรับสายเหนือศีรษะ สามารถคำนวณได้จาก

$$X'_L = f\mu_0 \left( \frac{0.25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right)$$

โดยที่ :  $d =$  ระยะเฉลี่ยเรขาคณิตระหว่างตัวนำ

$r =$  รัศมีของตัวนำเดี่ยว ในกรณีของตัวนำบันเดิล(Bundle Conductor) จะแทน

$r$  ด้วย  $\sqrt[n]{nrR^{n-1}}$  โดยที่  $R$  คือ รัศมีบันเดิล

$n =$  จำนวนตัวนำบันเดิล

แทนค่า  $\mu_0 = 4\pi 10^{-4} \text{ H / km}$  เป็นค่าความซึมซาบ(Permeability)ของสุญญากาศ ดังนั้นสามารถเขียนสมการให้ง่ายขึ้นเป็น

$$X'_L = 0.0628 \left( \frac{0.25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) \Omega / \text{km} \quad \text{สำหรับ } f = 50 \text{ Hz}$$

เพื่อความสะดวกในการใช้งาน จึงได้ให้ข้อมูลค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของสาย

ไฟฟ้าชนิดแรงต่ำหุ้มด้วยฉนวนพีวีซี(PVC) ดังแสดงในตารางที่ 2.6 ส่วนตารางที่ 2.7 แสดงค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของบัสเวย์(Busway)ทั้งชนิดอลูมิเนียมและทองแดง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดสาย(mm <sup>2</sup> )	ความต้านทาน(mΩ/m)	รีแอกแตนซ์(mΩ/m)
2.5	7.4	0.155
4	4.625	0.141
6	3.08	0.131
10	1.85	0.121
16	1.16	0.113
25	0.74	0.107
35	0.253	0.103
50	0.37	0.1
70	0.26	0.097
95	0.2	0.096
120	0.154	0.094
150	0.013	0.092
185	0.1	0.091
240	0.08	0.09
300	0.06	0.089
400	0.05	0.088
500	0.04	0.087

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของสายไฟฟ้าแรงต่ำหุ้มฉนวนพีวีซี

ขนาด(A)	อิมพีแดนซ์(mΩ/m)		ทองแดง(mΩ/m)	
	ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์	ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์
225-600	0.1342	0.035	0.0764	0.035
800	0.0814	0.0216	0.0764	0.035
1000	0.0712	0.0186	0.0623	0.026
1200	0.0568	0.015	0.0489	0.0216
1350	0.0407	0.0112	0.0417	0.0186
1600	0.0367	0.0098	0.0328	0.015
2000	0.0292	0.0079	0.024	0.0112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังหน่วยงานการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2500	0.0269	0.0071	0.0164	0.0079
3000	0.0210	0.0057	0.0161	0.0077
4000	0.0148	0.0038	0.0121	0.0057

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของบัสเวย์

#### 2.5.4 มอเตอร์ (Motor)

ในภาวะที่เกิดการผิดปกติขึ้น ซึ่งโครน์สมอเตอร์จะประพฤติตัวเป็นเหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกระแสลัดวงจรไปยังตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร

ส่วนมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุล กระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำจะลดลงอย่างรวดเร็ว และกรณีที่มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำหรือกลุ่มของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำมีกระแสพิกัดรวมน้อยกว่า 1% ของกระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตรกรณีไม่คิดผลของมอเตอร์ ดังนั้นผลของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำจะสามารถตัดทิ้งได้

$$\sum I_{rM} \leq 0.01 I_k''$$

โดยที่ :  $\sum I_{rM}$  = ผลรวมของกระแสพิกัดของมอเตอร์ในบริเวณที่เกิดการลัดวงจร

$I_k''$  = กระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งลัดวงจร โดยไม่มีผลของมอเตอร์

ส่วนในกรณีที่จะต้องคิดกระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ ค่าอิมพีแดนซ์  $Z_M = R_M + jX_M$  ของมอเตอร์ สามารถคำนวณได้จาก

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{I_{rM} \sqrt{3}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}$$

โดยที่ :  $U_{rM}$  = พิกัดแรงดันของมอเตอร์

$I_{rM}$  = พิกัดกระแสของมอเตอร์

$S_{rM}$  = พิกัดกำลังปรากฏของมอเตอร์

$I_{LR}/I_{rM}$  = อัตราส่วนของกระแสล็อกโรเตอร์ (Locked Rotor Current) ต่อพิกัดกระแสของมอเตอร์

สำหรับค่าโดยประมาณของ  $R_M/X_M$  ให้ใช้ค่าดังนี้

$R_M/X_M = 0.10$  ,  $X_M = 0.995 Z_M$  สำหรับมอเตอร์แรงดันสูงที่มีกำลังต่อคู่ของขั้ว  $\geq 1$  MW

$R_M/X_M = 0.15$  ,  $X_M = 0.989 Z_M$  สำหรับมอเตอร์แรงดันสูงที่มีกำลังต่อคู่ของขั้ว  $< 1$  MW

$R_M/X_M = 0.42$  ,  $X_M = 0.922 Z_M$  สำหรับกลุ่มของมอเตอร์แรงดันต่ำที่ต่อถึงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแรงดันต่ำหลายๆตัวที่ต่อบนบัสเดียวกัน อาจรวมกันเป็นกลุ่มมอเตอร์ได้ ถ้าพิคัดกลุ่มมีค่าเป็น kW หรือ MW ก็สามารถคำนวณหาค่ากำลังปรากฏ  $S_{TM}$  ได้โดยกำหนดให้ ตัวประกอบกำลัง  $\cos\phi = 0.8$  และประสิทธิภาพ  $\eta = 0.9$

### 2.5.5 การเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ กระแส และแรงดัน

ในการคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบที่มีแรงดันต่างกันนั้น จำเป็นจะต้องมีการแปลงค่าอิมพีแดนซ์ กระแส และแรงดันจากระดับแรงดันหนึ่งไปยังอีกระดับหนึ่ง โดยที่ในกรณีของอิมพีแดนซ์จะแปลงโดยใช้กำลังสองของ  $t_r^2$  (Rated Transformation Ratio) หรือ  $t^2$  (Transformation Ratio) ส่วนในกรณีของแรงดันหรือกระแสจะแปลงโดยใช้  $t_r$  หรือ  $t$

## 2.6 การคำนวณกระแสลัดวงจรกรณีไม่คิดผลของมอเตอร์

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า การลัดวงจรในระบบไฟฟ้ามีหลายแบบด้วยกัน โดยทั่วไปแล้วการลัดวงจร 3 เฟสสมมูล จะให้กระแสลัดวงจรสูงสุด และสามารถคำนวณได้ง่าย เพราะว่าจะเกี่ยวข้องกับเฉพาะอิมพีแดนซ์ลำดับบวกเท่านั้น สามารถคำนวณแบบต่อเฟสได้ ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมมูลเท่านั้น

### 2.6.1 กระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร ( $I''_k$ )

จากรูปที่ 2.3 กระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร  $I''_k$  สามารถหาได้จาก

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2} \sqrt{3}} = \frac{cU_n}{Z_k \sqrt{3}}$$

โดยที่ :  $U_n/\sqrt{3}$  = แหล่งจ่ายไฟสมมูล  
 $R_k$  = ผลรวมของความต้านทานที่ต่ออนุกรม  
 $X_k$  = ผลรวมของรีแอกแตนซ์ที่ต่ออนุกรม  
 $Z_k$  = อิมพีแดนซ์ลัดวงจร

ในกรณีของการลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะได้ว่า

$$I_k = I_b = I''_k$$

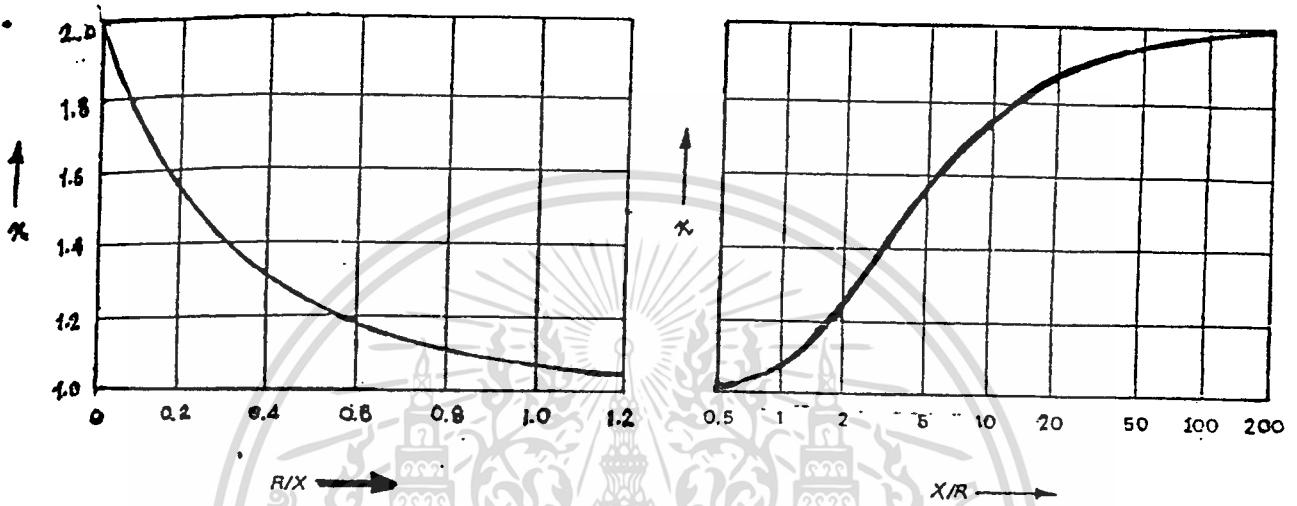
### 2.6.2 กระแสลัดวงจรคายอด ( $i_p$ )

เนื่องจากกระแสลัดวงจรมาจากวงจรที่ต่ออนุกรม ดังนั้นกระแสลัดวงจรคายอดจึงหาได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน  $i_p = x\sqrt{2}I''_k$  เท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่า  $x$  จะขึ้นอยู่กับค่า  $R/X$  หรือ  $X/R$  อาจคำนวณค่า  $x$  ได้โดยประมาณจาก

$$x \approx 1.02 + 0.98e^{-3R/X}$$

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่า  $x$  ได้จากรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงค่า  $x$  ที่สัมพันธ์กับอัตราส่วน  $R/X$

### 2.7 การคำนวณกระแสลัดวงจรกรณีคิดผลของมอเตอร์ด้วย

เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น ซึ่งโครน์สมอเตอร์จะจ่ายกระแสลัดวงจรไปยังจุดที่เกิดการลัดวงจร โดยในกรณีการลัดวงจรแบบ 3 เฟส จะส่งผลต่อกระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร  $I''_k$  กระแสลัดวงจรคายอด  $i_p$  และกระแสลัดวงจรแบบสมมาตร  $I_b$

เราไม่คิดผลของมอเตอร์เมื่อ  $\Sigma I_{rm} < 0.01 I''_k$  ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในการคำนวณกระแสลัดวงจรกรณีคิดผลของมอเตอร์ ทำได้โดยคำนวณหากระแสลัดวงจรในกรณีไม่คิดผลของมอเตอร์ก่อน จากนั้นก็คิดกระแสที่เป็นผลของมอเตอร์ทั้งหมดแล้วจึงนำมารวมกันเป็นกระแสลัดวงจรทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.1 กระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร ( $I''_{kM}$ )

สำหรับการคำนวณหากระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตรที่เป็นผลมาจากมอเตอร์ ในกรณีเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุล สามารถหาได้จาก

$$I''_{kM} = \frac{cU_n}{Z_M \sqrt{3}}$$

### 2.7.2 กระแสลัดวงจรคายอด ( $i_{pM}$ )

$$i_{pM} = x_M \sqrt{2} I''_{kM}$$

สำหรับมอเตอร์แรงดันสูง

$x = 1.65$  (สอดคล้องกับค่า  $R_M/X_M = 0.15$ ) สำหรับกำลังมอเตอร์ต่อคู่ของขั้ว  $< 1$  MW

$x = 1.75$  (สอดคล้องกับค่า  $R_M/X_M = 0.10$ ) สำหรับกำลังมอเตอร์ต่อคู่ของขั้ว  $\geq 1$  MW

สำหรับกลุ่มของมอเตอร์แรงดันต่ำที่ต่อถึงกัน

$x = 1.3$  (สอดคล้องกับค่า  $R_M/X_M = 0.42$ )

### 2.7.3 กระแสลัดวงจรแบบสมมาตร ( $I_{bM}$ )

$$I_{bM} = \mu q I''_{kM}$$

โดยที่ค่า  $\mu$  จะขึ้นอยู่กับ ค่าอัตราส่วนของ  $I''_{kM}/I_{rM}$  และค่าเวลาประวิงที่ต่ำที่สุด  $t_{min}$  (Minimum Time Delay) ดังนี้

$$\mu = 0.84 + 0.26e^{-0.26I''_{kM}/I_{rM}} \quad \text{สำหรับ } t_{min} = 0.02s$$

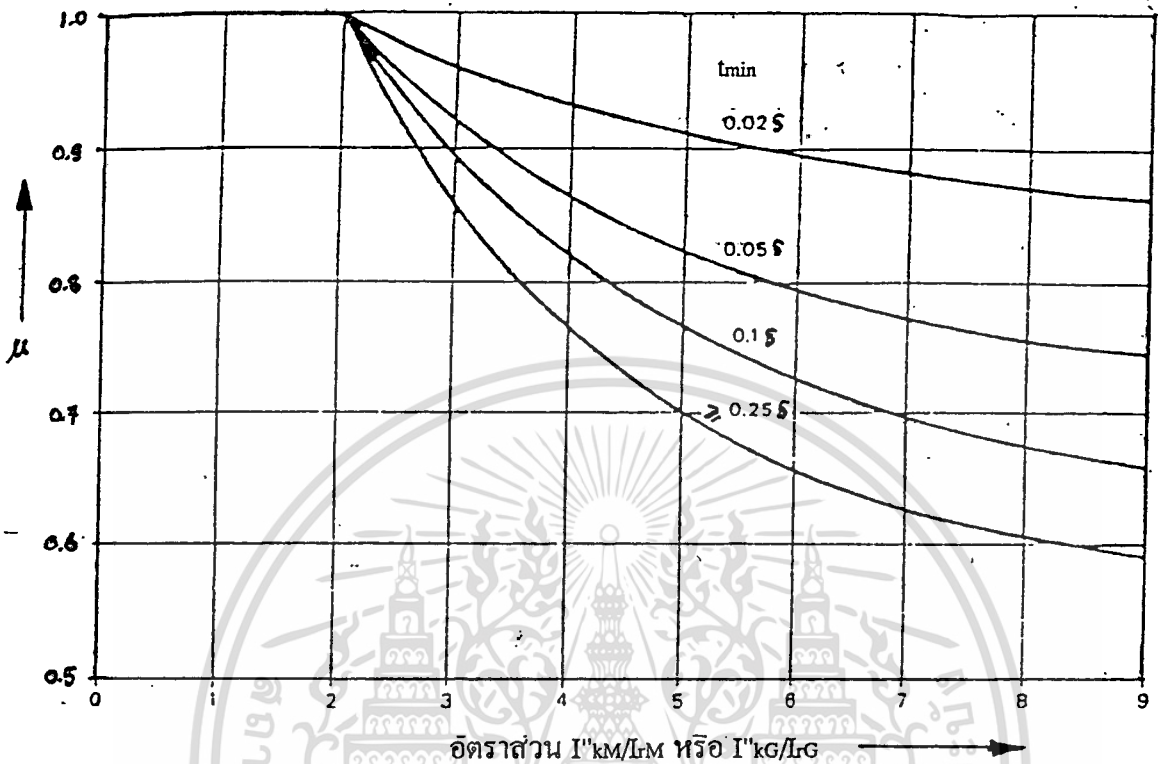
$$\mu = 0.71 + 0.51e^{-0.30I''_{kM}/I_{rM}} \quad \text{สำหรับ } t_{min} = 0.05s$$

$$\mu = 0.62 + 0.72e^{-0.32I''_{kM}/I_{rM}} \quad \text{สำหรับ } t_{min} = 0.1s$$

$$\mu = 0.56 + 0.94e^{-0.38I''_{kM}/I_{rM}} \quad \text{สำหรับ } t_{min} \geq 0.25s$$

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่า  $\mu$  ได้จากรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงค่า  $\mu$  ที่สัมพันธ์กับอัตราส่วน  $I''_{km/L_{FM}}$  หรือ  $I''_{kg/L_{G}}$  และ  $t_{min}$

ส่วนค่า  $q$  สามารถหาได้ดังนี้

$$q = 1.03 + 0.12 \ln m \quad \text{สำหรับ } t_{min} = 0.02s$$

$$q = 0.79 + 0.12 \ln m \quad \text{สำหรับ } t_{min} = 0.05s$$

$$q = 0.57 + 0.12 \ln m \quad \text{สำหรับ } t_{min} = 0.10s$$

$$q = 0.26 + 0.10 \ln m \quad \text{สำหรับ } t_{min} \geq 0.25s$$

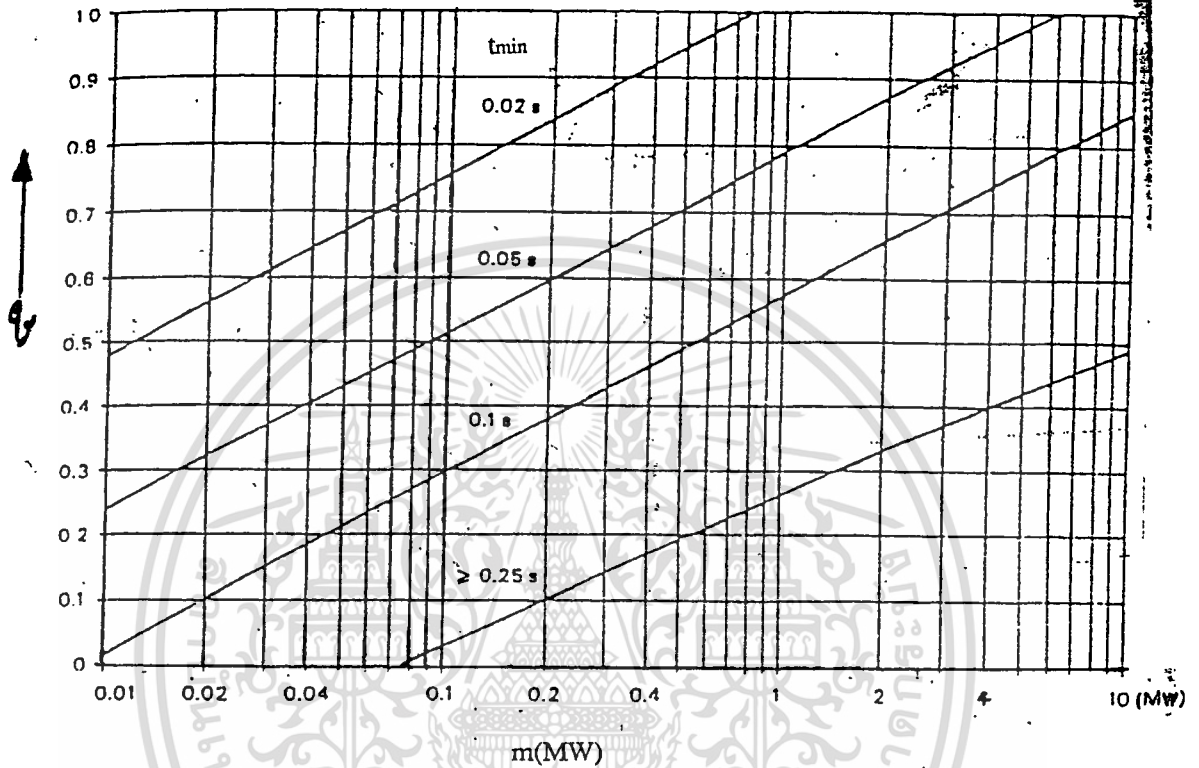
โดยที่ค่า  $m$  คือ ค่าพิทักกำลังใช้งานของมอเตอร์ (MW) ต่อคู่ของขั้ว

หากคำนวณค่า  $q$  ได้มากกว่า 1 แล้ว ให้ใช้  $q = 1$  แทน นอกจากนั้นยังสามารถหาค่า  $q$  ได้

จากรูปที่ 2.7 ด้วย

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนราชการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงค่า q ที่สัมพันธ์กับค่า m

2.7.4 กระแสลัดวงจรอยู่ตัว ( $I_{kM}$ )

$$I_{kM} = 0$$

2.8 การลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การคำนวณจะสนใจหาค่ากระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร  $I''_k$  , กระแสลัดวงจรค่า

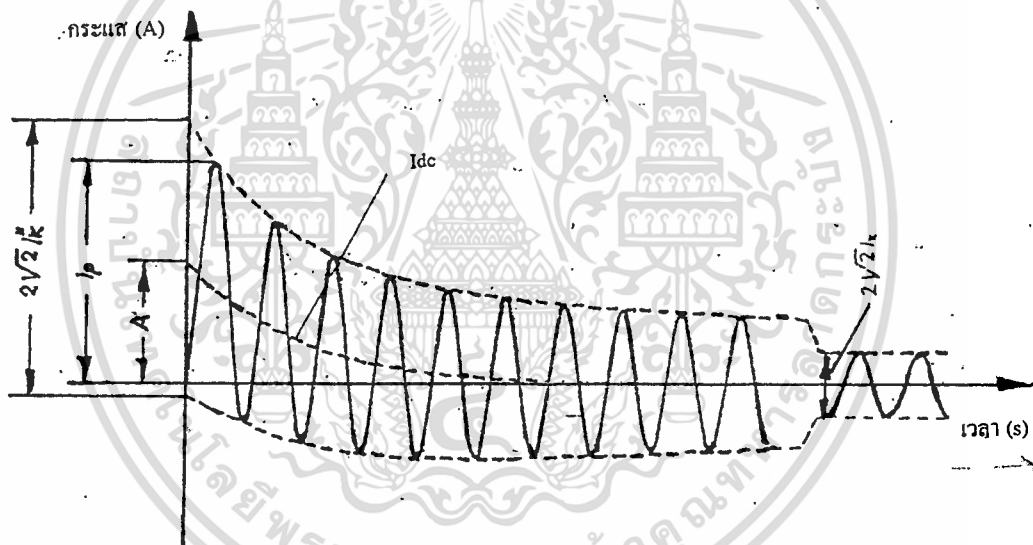
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยอด  $i_p$  และกระแสตัดวงจรแบบสมมาตร  $I_0$  ในบางกรณีที่เกี่ยวข้องกับผลทางกลจากกระแสตัดวงจร ก็จำเป็นต้องหากระแสตัดวงจรแบบไม่สมมาตรจากกระแสตัดวงจรกระแสสลับ และกระแสตัดวงจรกระแสตรง ซึ่งส่วนของกระแสตรง  $i_{DC}$  นั้นสามารถหาได้จาก

$$i_{DC} = \sqrt{2} I_k'' e^{-2\pi f R / X}$$

กระแสตัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นผลรวมของกระแส 2 ส่วน คือ

- # ส่วนประกอบกระแสสลับ ซึ่งมีขนาดค่อยๆ ลดลงระหว่างการลัดวงจร
  - # ส่วนประกอบกระแสตรง ซึ่งมีค่าเริ่มต้นเป็นค่าหนึ่ง และค่อยๆ ลดลงจนเป็นศูนย์
- รูปคลื่นของกระแสตัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแสดงไว้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปคลื่นของกระแสตัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในรูปที่ 2.8  $I_k''$  = กระแสตัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร

$i_p$  = กระแสตัดวงจรสูงสุด

$I_k$  = กระแสตัดวงจรขณะที่เวลาผ่านไป

$i_{DC}$  = องค์ประกอบกระแสตรงที่ลดลงตามเวลาของกระแสตัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับความยินยอมจากเจ้าของลิขสิทธิ์

A = ค่าเริ่มต้นขององค์ประกอบกระแสตรง

### 2.8.1 แหล่งจ่ายไฟสมมูล

เราสามารถหาค่ากระแสลัดวงจร ณ ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร ได้ด้วยวิธีการใช้แหล่งจ่ายไฟสมมูล  $cU_n/\sqrt{3}$  โดยจะต้องมีการแก้ไขค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการใช้ค่าตัวประกอบความถูกต้อง(Collection Factor) ได้เช่นเดียวกับกรณีการเกิดลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในการใช้วิธีแหล่งจ่ายไฟสมมูล แหล่งจ่ายไฟสมมูลจะเป็นแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียวในระบบ ส่วนแรงดันภายในของเครื่องจักรซิงโครนัสและเครื่องจักรอซิงโครนัสจะให้มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นเครื่องจักรซิงโครนัสจะคิดเพียงค่าซับทรานเซียนต์อิมพีแดนซ์(Subtransient Impedance) ส่วนเครื่องจักรอซิงโครนัสจะคิดเพียงค่าอิมพีแดนซ์ของมันซึ่งถูกคำนวณมาจากกระแสลัดวงจรโรเตอร์

### 2.8.2 ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร

ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบไฟฟ้า, หม้อแปลง, สายส่ง และมอเตอร์ จะคิดเหมือนในกรณีการลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีวิธีคิดดังนี้

$$Z_{GK} = K_G Z_G = K_G (R_G + jX''_d)$$

โดยค่าตัวประกอบความถูกต้อง  $K_G$  หาได้จาก

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} * \frac{c_{max}}{1 + x''_d \sin \phi_{rG}}$$

โดยที่ :  $c_{max}$  = ตัวประกอบแรงดัน

$U_n$  = แรงดันของไฟฟ้า

$U_{rG}$  = พิกัดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$Z_{GK}$  = อิมพีแดนซ์ที่ถูกต้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

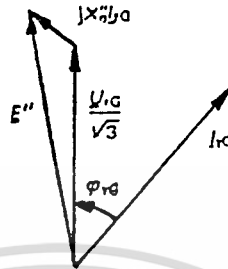
$Z_G$  = อิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$x''_d$  = ค่าซับทรานเซียนต์อิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งอ้างอิงกับ

ค่าพิกัดอิมพีแดนซ์ ( $x''_d = X''_d / Z_{rG}$ )

$\phi_{rG}$  = มุมเฟสระหว่าง  $I_{rG}$  และ  $U_{rG}/\sqrt{3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่พิกัด

เนื่องจากการคำนวณหากระแสลัดวงจรนั้น จะใช้ค่าแหล่งจ่ายไฟสมมูล แทนที่จะใช้ค่าแรงดันขั้วขานเขียนต์ E จึงทำให้ค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้ มีค่าสูงกว่าที่ควรจะเป็น จึงต้องมีการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียใหม่ สำหรับค่าความต้านทาน หาได้ดังนี้

$$R_G = 0.05X_d'' \text{ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่ง } U_{rG} > 1 \text{ kV}, S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$$

$$R_G = 0.07X_d'' \text{ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่ง } U_{rG} > 1 \text{ kV}, S_{rG} < 100 \text{ MVA}$$

$$R_G = 0.15X_d'' \text{ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่ง } U_{rG} > 1000 \text{ V}$$

## 2.8.8 การหาค่ากระแสลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

### 2.8.3.1 การลัดวงจรจากแหล่งจ่ายไฟเดี่ยว (Single Feed Short Circuit)

กระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร  $I''_k$  สามารถหาได้จากแหล่งจ่ายไฟสมมูล  $cU_n/\sqrt{3}$  ที่เกิดการลัดวงจรและค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร  $Z_k$  โดยหาจาก

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k}$$

สำหรับการหาค่ากระแสลัดวงจรค่ายอด  $i_p$  จะทำเหมือนกรณีเกิดการลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_p = x\sqrt{2}I_k''$$

โดยที่ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ที่จะใช้หาค่า  $x$  จะต้องใช้ค่าที่ได้ปรับโดยค่าตัวประกอบความถูกต้องแล้ว

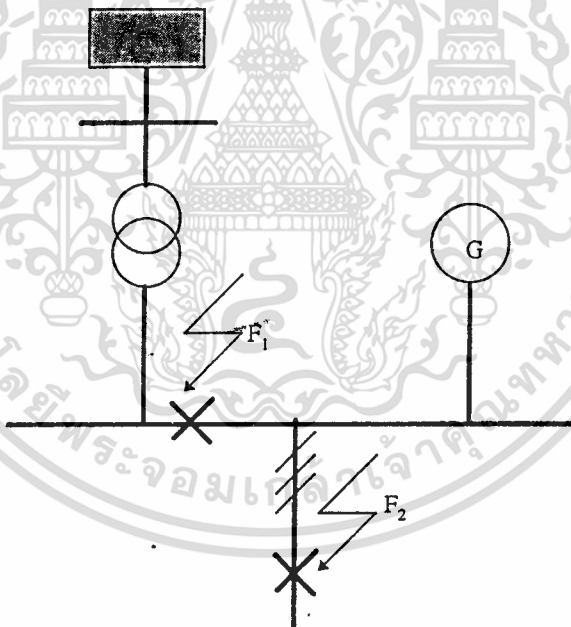
ส่วนการหาค่ากระแสตัดวงจรแบบสมมาตร  $I_b$

$$I_b = \mu I_k''$$

โดยที่ค่า  $\mu$  จะขึ้นอยู่กับค่าเวลาประวิงเวลาที่ต่ำที่สุด (Minimum Time Delay :  $t_{min}$ ) และค่าอัตราส่วน  $I_{kG}''/I_{kG}$  ซึ่งสามารถหาค่า  $\mu$  ได้จากกราฟในรูปที่ 2.6

2.8.3.2 การลัดวงจรจากแหล่งจ่ายไฟหลายแหล่งแบบไม่ใช่ตาข่าย (Short Circuit Feed From Non-meshed Sources)

การลัดวงจรกรณีนี้ กระแสลัดวงจรจะได้จากผลรวมของกระแสลัดวงจรจากแต่ละแหล่งจ่าย โดยจะใช้แหล่งจ่ายไฟสมมูลที่ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรในแหล่งจ่ายไฟแหล่งเดียวในระบบ ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ระบบไฟฟ้า และมอเตอร์อซิงโครนัส จะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของมัน พิจารณารูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างวันไลน์ไดอะแกรมการลัดวงจรจากแหล่งจ่ายไฟหลายแหล่งแบบไม่ใช่ตาข่าย

ที่ตำแหน่ง  $F_1$  จะสามารถหาค่ากระแสลัดวงจรได้ดังนี้

- กระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร  $I_k''$

จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$I_{kG}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}Z_{GK}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากระบบไฟฟ้าและหม้อแปลง  $I_{kT}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}Z_S}$

โดยที่  $Z_s = \frac{Z_0}{t_r^2} + Z_T$

ดังนั้น  $I_k''(Total) = I_{kG}'' + I_{kT}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}Z_{rs1}}$

โดยที่  $\frac{1}{Z_{rs1}} = \frac{1}{Z_{GK}} + \frac{1}{Z_s}$

- กระแสตัดวงจรแบบสมมาตร  $I_b$

จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $I_{bG}'' = \mu I_{kG}''$

จากระบบไฟฟ้าและหม้อแปลง  $I_{bT}'' = I_{kT}''$

ดังนั้น  $I_b''(Total) = I_{kT}'' + \mu I_{kG}''$

ที่ตำแหน่ง  $F_2$  สามารถหาค่ากระแสตัดวงจรของแต่ละส่วนได้ โดยที่หาค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร  $Z_k$  จากการรวมค่าอิมพีแดนซ์ของส่วนต่างๆเข้าด้วยกันตามลักษณะการต่อวงจร จะได้ว่า

$$Z_k = Z_{rs1} + Z_L$$

- กระแสลัดวงจรเริ่มต้นแบบสมมาตร  $I_k''$

$$I_k''(Total) = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}Z_k}$$

โดยกระแสลัดวงจรจากแต่ละส่วนสามารถหาได้จากค่าอัตราส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ดังนี้

จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $I_{kG}'' = I_k''(Total) * \left(\frac{Z_{rs1}}{Z_{GK}}\right)$

จากระบบไฟฟ้าและหม้อแปลง  $I_{kS}'' = I_k''(Total) * \left(\frac{Z_{rs1}}{Z_s}\right)$

- กระแสตัดวงจรแบบสมมาตร  $I_b$

จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $I_{bG}'' = \mu I_{kG}''$

จากระบบไฟฟ้าและหม้อแปลง  $I_{bT}'' = I_{kT}''$

ดังนั้น  $I_b''(Total) = I_{kT}'' + \mu I_{kG}''$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การคำนวณหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน ANSI/IEEE C37.010-1979

### 3.1 พื้นฐานเบื้องต้นในการคำนวณหากระแสลัดวงจร

การเลือกอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า อย่างน้อยที่สุดจะต้องเลือกให้อยู่ในพื้นฐานของการเกิดความผิดปกติ และกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น โดยอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้อยู่มี เซอร์คิตเบรกเกอร์ และ ฟิวส์ เซอร์คิตเบรกเกอร์อาจจะใช้รีเลย์ เป็นตัวตรวจจับขนาดของกระแสที่เกินกว่าปกติ และจะสั่งให้เซอร์คิตเบรกเกอร์ตัดวงจรส่วนที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบ ส่วนฟิวส์ จะเปิดวงจรแยกส่วนที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบ โดยการหลอมละลายเมื่อมีกระแสเกินกว่าปกติไหลผ่าน ในกรณีที่อุปกรณ์ป้องกันมีการทำงานที่ไม่ดี อันตรายที่เกิดขึ้นจะมีมากและก่อให้เกิดความเสียหาย ซึ่งจะเป็นผลทำให้ระบบไม่สามารถที่จะทำงานต่อไปได้

ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ จะมีสิ่งต่อไปนี้ตามมา คือ

1. เกิดการอาร์ก(Arcing) และการเผาไหม้(Burning) ณ ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร
2. กระแสลัดวงจรจากแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าหรือโหลด(Load)ต่างๆ โดยเฉพาะ โหลดที่เป็นมอเตอร์(Motor) จะไหลเข้าสู่จุดที่เกิดการลัดวงจร
3. ส่วนประกอบต่างๆที่จะรองรับกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นนี้ จะต้องทนทานต่อความร้อนและแรงทางกลที่เกิดขึ้น ซึ่งแรงทางกลนี้จะเป็นแรงกดที่แปรตามฟังก์ชันของกระแสยกกำลังสอง และช่วงเวลาการไหลของกระแส
4. แรงดันตก(Voltage Drop)ของระบบจะเป็นสัดส่วนกับขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น โดยที่จุดที่เกิดการลัดวงจรจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ แต่ที่ส่วนอื่นๆของระบบจะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตก

### 3.2 การเกิดกระแสลัดวงจร

ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้า ความรุนแรงของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ณ จุดที่เกิดการลัดวงรนั้น จะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าต่างๆในระบบ ค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) ของแหล่งกำเนิด ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบจนถึงจุดที่เกิดการลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.ระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลัง โดยจะจ่ายพลังงานให้แก่หม้อแปลง เพื่อที่จะได้อาศัยหม้อแปลง ช่วยในการลดแรงดันไฟฟ้าลงมา แต่หม้อแปลงไม่ใช่แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร เพราะว่าตัวหม้อแปลงเองเป็นเพียงตัวเปลี่ยนขนาดของแรงดันหรือขนาดของกระแสเท่านั้น ดังนั้นกระแสลัดวงจรที่เกิดจากระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลังจะถูกส่งผ่านหม้อแปลง ปริมาณของกระแสลัดวงจรที่ผ่านหม้อแปลงมานี้ จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ(Secondary Voltage) และค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์(Percent อิมพีแดนซ์)ของหม้อแปลง เนื่องจากว่าระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลังนั้นจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของตัวกำเนิดกระแสลัดวงจรตัวอื่นๆมาก ดังนั้นขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดจากระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลังจึงมีค่าสม่ำเสมอ

2.เครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Generator) ในขณะที่เกิดการลัดวงจรนั้น ทั้งตัวต้นกำลังและกระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังคงมีอยู่ ดังนั้นกระแสลัดวงจรที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะถูกกำหนดโดยค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตลอดจนขึ้นอยู่กับค่าตัวประกอบในวงจรที่อยู่ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กับจุดที่เกิดการลัดวงจร นอกจากนี้ผลของการลัดวงจรยังจะมีผลต่อเนื่องมาถึงค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกด้วย ดังนี้

2.1 ค่าชับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์แกนตรง(Direct Axis Subtransient Reactance; $X_d'$ ) จะเป็นค่ารีแอกแตนซ์ของขดสเตเตอร์(Stator Winding) โดยจะปรากฏขึ้นทันทีที่เกิดการลัดวงจรขึ้น และจะเป็นตัวกำหนดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นภายในช่วง 1-3 ไซเคิล(Cycle)แรกหลังจากเกิดการลัดวงจร

2.2 ค่าทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์แกนตรง(Direct Axis Transient Reactance; $X_d''$ ) จะเป็นค่าที่กำหนดกระแสลัดวงจร โดยค่ารีแอกแตนซ์ค่านี้จะมีผลจนถึง 1/2 วินาทีหรือมากกว่าจนถึง 2 วินาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรอบการออกแบบเครื่องจักรนั้นๆ

2.3 ค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์แกนตรง(Direct Axis Synchronous Reactance; $X_d$ ) ค่านี้จะเป็นตัวกำหนดการไหลของกระแสลัดวงจรในช่วงสถานะอยู่ตัว(Steady State) ค่ารีแอกแตนซ์ค่านี้จะนำมาพิจารณาหลังจากที่เกิดการลัดวงจรผ่านไปแล้วหลายวินาที ดังนั้นส่วนใหญ่จึงจะไม่นิยมใช้ค่ารีแอกแตนซ์ค่านี้ในการคำนวณหากระแสลัดวงจร

3.ซิงโครนัสมอเตอร์(Synchronous Motor) เนื่องจากลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส และซิงโครนัสมอเตอร์คล้ายคลึงกัน ดังนั้นเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น อิทธิพลของไหลจะทำให้ซิงโครนัสมอเตอร์ ค่อยๆหยุดหมุนลง แต่ยังคงมีแรงเฉื่อยซึ่งส่งผลให้มันทำตัวคล้ายกับเป็นตัวต้นกำลังในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งในลักษณะเช่นนี้จะถือว่าซิงโครนัสมอเตอร์ ได้กลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าชับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์แกนตรง,ค่าทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์แกนตรง และค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์แกนตรงในซิงโครนัสมอเตอร์จะมีค่าที่แตกต่างกันออกไป และผลไม่อาจกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกระแสลัดวงจรที่มาจากซิงโครนัสมอเตอร์นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดแรงม้า แรงดันไฟฟ้า และค่ารีแอคแตนซ์ของมอเตอร์ ตลอดจนค่ารีแอคแตนซ์ระหว่างจุดที่เกิดการลัดวงจรจนถึงมอเตอร์

4. มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Motor) เนื่องจากมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ จะทำงานได้ ต้องอาศัยการกระตุ้นสนามที่ได้จากผลของการเหนี่ยวนำจากสเตเตอร์ ซึ่งไม่ใช่จากขดกระตุ้นกระแสตรง ดังนั้นเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น กระแสจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ก็จะพุ่งไปสู่จุดที่เกิดการลัดวงจร ดังนั้นสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำก็จะลดลงอย่างรวดเร็วจนทำให้มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำหยุดหมุนภายในช่วง 2-3 ไซเคิล นับจากเกิดการลัดวงจร ซึ่งในกรณีเช่นนี้กระแสลัดวงจรก็จะลดลงจนเป็นค่าศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป 2-3 ไซเคิล ดังนั้นค่ารีแอคแตนซ์ของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำก็จะพิจารณาเฉพาะค่าซ์ทรานเซียนต์รีแอคแตนซ์แกนตรงเท่านั้น โดยจะมีค่าใกล้เคียงกับลอคโรเตอร์รีแอคแตนซ์ (Locked Rotor Reactance)

### 3.3 ชนิดของการเกิดผิดปกติ

ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าสามารถจำแนกออกได้หลายชนิด ดังนั้นอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องมีความสามารถในการตัดวงจร (Interrupt) หรือทนต่อแรงดันและความร้อนที่จะเกิดขึ้นได้ ซึ่งความผิดปกติที่เราจะเน้นมากที่สุด คือ ความผิดปกติแบบสามเฟส เพราะเป็นความผิดปกติที่จะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ระบบไฟฟ้าสูงสุด

ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. ความผิดปกติแบบสามเฟส (Three-phase Fault) สภาวะเช่นนี้จะเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก แต่ผลของการเกิดความผิดปกติแบบนี้จะให้ค่ากระแสลัดวงจรที่สูงที่สุด ดังนั้นจึงใช้เป็นแบบในการคำนวณความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังต่างๆ ไปที่โซ่กับงานพาณิชย์

2. ความผิดปกติแบบสองเฟส (Line-to-Line Fault) โดยปกติในระบบไฟสามเฟส กระแสที่เกิดจากความผิดปกติแบบนี้จะประมาณ 87% ของกระแสที่เกิดในกรณีที่ 1

3. ความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) กระแสที่เกิดจากความผิดปกติแบบนี้มีค่าเกือบเท่ากับกระแสที่เกิดในกรณีที่ 1 ทั้งนี้ต้องเป็นแบบระบบต่อลงดินโดยตรง (Solidly Grounded System) เช่น ในกรณีที่เกิดความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดินทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง  $\Delta-Y$  กระแสที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติจะมีค่ามากกว่ากรณีที่ 1 (แต่อย่างไรก็ตามในผลการทดลอง กระแสที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยกว่ากระแสที่เกิดขึ้นในกรณีที่ 1 เล็กน้อย) แต่พอจะกล่าวได้ว่า กระแสที่เกิดขึ้นในกรณีความผิดปกติแบบนี้ จะมีค่าน้อยกว่ากระแสที่เกิดขึ้นในกรณีที่ 1

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรป้อนกลับของระบบกราวด์ ซึ่งโดยปกติจะมีค่าสูง ในกรณีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบแรงดันสูง และใช้ผ่านความต้านทานลงสู่ดิน ค่าความต้านทานที่ใช้จะเป็นตัวจำกัดกระแสที่ลงสู่ดิน ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1-2000 A.

4.การอาร์ก(Arcing Fault) จะเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยการอาร์กที่เกิดขึ้นนี้อาจจะแสดงออกมาน้อยๆ ทั้งนี้กระแสที่ทำให้เกิดการอาร์กอาจจะน้อยกว่ากระแสที่เกิดจากกรณี 1-3 ก็ได้ ระดับกระแสอย่างน้อยๆนี้จะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของช่วงการอาร์กนั้นๆ การอาร์กที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของการเกิดความผิดปกติด้วย แต่เนื่องจากความผิดปกติแบบนี้จะทำการตรวจจับได้ยาก เพราะเกิดจากกระแสอย่างน้อยๆ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดอันตรายได้ในกรณีที่อยู่ในเขตที่เป็นอันตราย ตารางต่อไปนี้จะใช้เป็นตัวช่วยหาค่าต่ำสุดของกระแสที่ทำให้เกิดอาร์ก โดยจะเป็นค่าตัวคูณที่คูณกับกระแสลัดวงจรในกรณีต่างๆ

ชนิดของการเกิดความผิดปกติ	แรงดันไฟฟ้าของระบบ		
	570 V.	480 V.	208 V.
3-เฟส	0.94	0.89	0.12
2-เฟส	0.85	0.74	0.02
1-เฟสลงดิน	0.4	0.38	0
3-เฟส เมื่อฟิวส์ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเปิดวงจร	0.88	0.8	0

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าประมาณต่ำสุดสำหรับกระแสที่ทำให้เกิดการอาร์ก(พิจารณาค่าในรูปเพอร์ยูนิต)

5.ความผิดปกติแบบหม้อแปลงหนึ่งเฟส(Single-phase Transformer Fault) จะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงนั้นๆ และผู้ผลิตจะเป็นผู้กำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงด้วย

### 3.4 พื้นฐานสำหรับหาพิภักซ์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์

#### 3.4.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์กำลัง

พิภักซ์ต่างๆของเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลัง(> 600 V.) เป็นสิ่งที่ซับซ้อนมากในช่วงเวลาไม่กี่ไมโครวินาทีที่เซอร์กิตเบรกเกอร์จะเปิดวงจรออกหลังจากเกิดการลัดวงจรขึ้น ซึ่งช่วงเวลานี้เป็นผลของเวลาต่างๆดังนี้ เวลาที่ใช้ไปของรีเลย์ป้องกันในการปิดหน้าสัมผัส,เวลาสำหรับทริบครอย์(Trip Coils)ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในการสั่งและควบคุมระบบกลไก,เวลาในการเปิดหน้าสัมผัสของแม่เหล็กเซอร์กิตเบรกเกอร์ และเวลาที่ใช้ในการอาร์กในห้องอาร์ก(Arc Chamber) ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มเกิดการ

ลัดวงจรจนถึงเวลาที่เซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจร กระแสจะลดลงอันเนื่องมาจากการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง รวมถึงการเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์ ซึ่งในช่วงนี้กระแสที่ไหลผ่านหน้าสัมผัสในขณะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงาน จะอยู่ในช่วง 4, 5 หรือ 8 ไซเคิลหลังจากเกิดการผิดปกติ และจะมีค่าน้อยกว่าค่าสูงสุดที่เกิดในช่วง 1/2 ไซเคิลแรก เพราะขนาดของกระแสลัดวงจรจะลดลงตามเวลา ดังนั้นจึงมีลักษณะของกระแสลัดวงจร 2 อย่างที่จะต้องพิจารณาสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลัง ดังนี้

1. พิกัดโมเมนตารี (Momentary Rating) เป็นค่าที่แสดงถึงพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในความสามารถที่จะทนทานต่อแรงดันทางกลและความร้อนที่เกิดขึ้น ตลอดจนสามารถเปิดวงจรได้เมื่อมีกระแสลัดวงจรเกิดขึ้นในช่วง 1/2 ไซเคิลแรกนับจากเกิดการผิดปกติ โดยตัวเองไม่เสียหาย

ในการพิจารณากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงครึ่งไซเคิลแรกของกระแสลัดวงจรมานั้น ถ้าในระบบไฟฟ้ามีแหล่งกำเนิดหลายอย่างจะต้องพิจารณาถึงค่าชั้พทรานเซียนตรีแอกแตนซ์แกนตรงของแหล่งกำเนิดทุกแหล่ง หลังจากนั้นจะทำการหารูปคลื่นของกระแสในกรณีไม่สมมาตร โดยนำค่าตัวคูณที่มากคูณกับรูปคลื่นของกระแสในกรณีสมมาตรดังในตารางต่อไปนี้

ค่าประกอบกำลัง ลัดวงจร(%)	ค่าอัตราส่วน X/R ลัดวงจร	ค่าอัตราส่วนกระแสอาร์เอ็มเอส(rms)แบบสมมาตร		
		ค่าสูงสุดในช่วง ของ ระบบ 1 เฟส	ค่าอาร์เอ็มเอสสูง สุดที่ 1/2 ไซเคิลของ ระบบ 1 เฟส	ค่าเฉลี่ยอาร์เอ็มเอสที่ 1/2 ไซเคิลของระบบ 3 เฟส
5	19.974	2.625	1.568	1.301
10	9.9301	2.455	1.436	1.229
15	6.5912	2.309	1.330	1.171
20	4.8990	2.183	1.247	1.127
25	3.8730	2.074	1.181	1.093
30	3.1798	1.978	1.130	1.066
35	2.6764	1.894	1.091	1.046
40	2.2913	1.819	1.062	1.031
45	1.9845	1.753	1.041	1.020
50	1.7321	1.694	1.026	1.013
55	1.5185	1.641	1.015	1.008
60	1.3333	1.594	1.009	1.004
65	1.1691	1.553	1.004	1.002
70	1.0202	1.517	1.002	1.001

เอกสารนี้เป็น ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงค่าตัวคูณที่ใช้คูณกระแสสมมาตร เพื่อหากระแสไม่สมมาตรนี้ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.พิทัดอินเตอร์รัปติง(Interrupting Rating) จะเป็นค่าที่แสดงถึงพิทัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในการที่จะขัดจังหวะการไหลของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดการลัดวงจรขึ้นแล้ว 4 , 5 หรือ 8 ไชเคลิล ซึ่งก็จะสัมพันธ์กับชนิดของเซอร์กิตเบรกเกอร์นั่นเอง

หลังจาก 8 ไชเคลิล นับจากเวลาที่เริ่มเกิดความผิดปกติ ผลจากมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำจะหายไป และคาร์รีแอกแตนซ์ของซิงโครนัสมอเตอร์ จะถูกเปลี่ยนจากซัทธานเขียนตรีแอกแตนซ์แกนตรงไปเป็นทรานเขียนตรีแอกแตนซ์แกนตรง ซึ่งจะเป็นเหตุผลที่ว่าทำไมในระบบแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 600 V. พิกัดอินเตอร์รัปติงของเซอร์กิตเบรกเกอร์ จึงใช้ค่าตัวคูณเป็น 1 เพราะว่าพิจารณาในกรณีของซัทธานเขียนตรีแอกแตนซ์แกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และค่าทรานเขียนตรีแอกแตนซ์แกนตรงของซิงโครนัสมอเตอร์ โดยไม่คำนึงถึงมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ และค่าองค์ประกอบกระแสตรงหลังจาก 8 ไชเคลิลแล้วจะหายไป

พิทัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังกำหนดตามมาตรฐาน ANSI , NEMA และIEEE ซึ่งจะแบ่งชนิดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ออกเป็นหลายอย่างด้วยกัน ตามลักษณะของเซอร์กิตเบรกเกอร์ แรงดันกระแส และค่า I.C.(Interrupting Capacity) ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

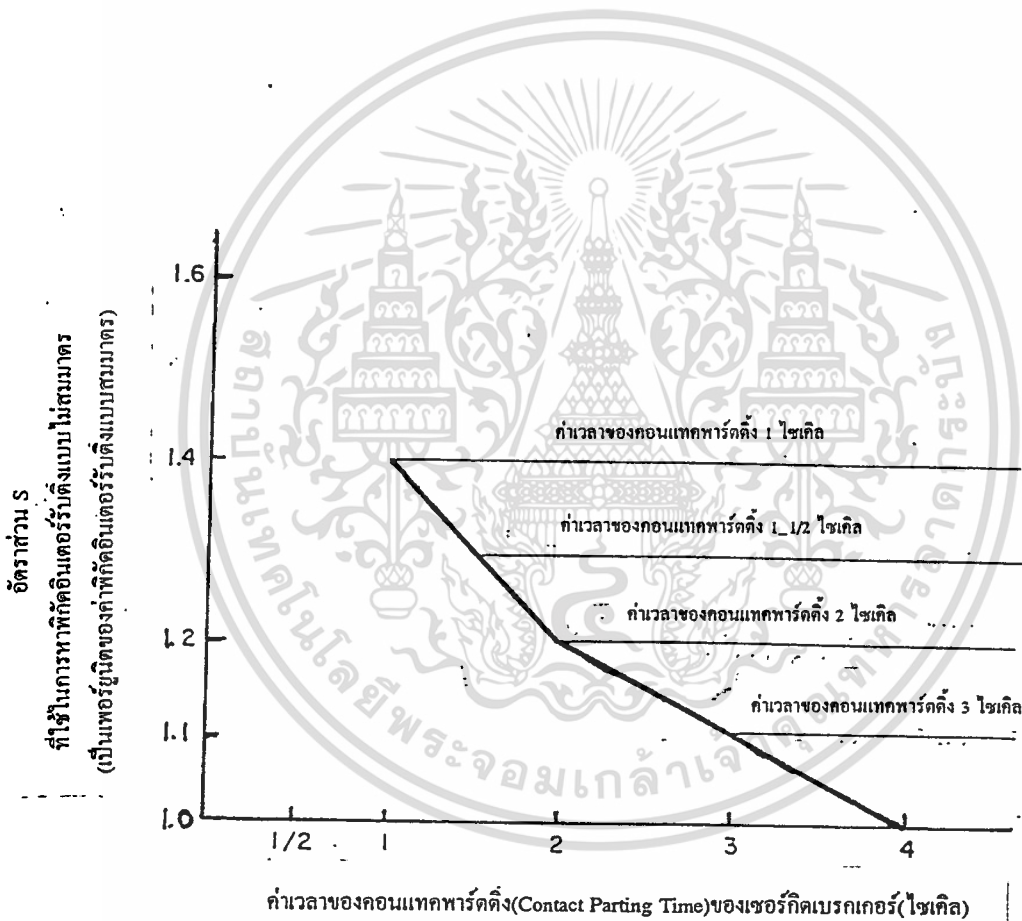
คอลัมน์ 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ชนิดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (kV-MVA)	พิทัดแรงดันไฟฟ้า			ระดับการทนโด		พิทัดกระแส			พิทัดการขัดจังหวะที่60Hz.			ช่วงเวลาที่ทำการเปิดหน้าสัมผัส (ไชเคลิล)
	พิทัด (kV)	กาออกแบบสูงสุด (kV)	การกำหนดค่าที่พิทัด MVA	ของฉนวน		ที่ 60 Hz.และต่อเนื่อง	ช่วงเวลาสั้น		พิทัด 3 เฟส (MVA)	อาร์เอ็มเอสที่พิทัดแรงดัน (A)	ค่าพิทัดสูงสุด (A)	
				ที่ความถี่ค่าเบสอาร์เอ็มเอส(kV)	ค่ากระแสคั่นแรงดันแบบอิมพัลส์		ชั่วขณะ 1/2 ไชเคลิลแรก	4 วินาที				
4.16-75	4.16	4.76	3.5	19	60	1200	20000	12500	75	10500	12500	8
4.16-250	4.16	4.76	3.85	19	60	1200 , 2000	60000	37500	250	35000	37500	8
4.16-250B	4.16	4.76	3.85	19	60	1200 , 2000	80000	37500	250	35000	37500	8
4.16-350	4.16	4.76	4.0	19	60	1200 , 2000	80000	50000	350	48600	50000	8
7.2-500	7.2	8.25	6.6	36	95	1200 , 2000	70000	44000	500	40000	44000	8
13.8-500	13.8	15.0	11.5	36	95	1200 , 2000	40000	25000	500	21000	25000	8
13.8-500B	13.8	15.0	11.5	36	95	1200 , 2000	60000	25000	500	21000	25000	8
13.8-750	13.8	15.0	11.5	36	95	1200 , 2000	60000	37500	750	31500	37500	8
13.8-750B	13.8	15.0	11.5	36	95	1200 , 2000	80000	37500	750	31500	37500	8
13.8-1000	13.8	15.0	11.5	36	95	1200 , 2000	80000	50000	1000	42000	50000	8

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบอากาศ

ในกรณีที่ผลของการเกิดลัดวงจรไม่ได้มีผลของมอเตอร์มาเกี่ยวข้องด้วย จะต้องพิจารณาเฉพาะอินเตอร์รัปติงดีวตี้(Interrupting Duty:MVA) และถ้าค่าที่พิจารณานั้นน้อยกว่าค่า MVA ในไม่่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอลัมน์ 10 แล้วย่อมแสดงว่า กระแสลัดวงจรค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ประกอบไปด้วยองค์ประกอบ กระแสตรงแล้ว ซึ่งก็สามารถถือได้ว่าเป็นค่าพิคต์โมเมนทารีของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ และถ้าในกรณีที่มีผลของมอเตอร์เข้ามาเกี่ยวข้อง จะต้องพิจารณาผลที่เกิดจากการลัดวงจร ด้วยโมเมนทารีและอินเตอร์รับตั้งคิวตี้

รูปต่อไปนี้แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างคาร์พาบิลิตีแบบสมมาตรและไม่สมมาตร (Asymmetrical and Symmetrical Capability) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีค่าเวลาพื้นฐานที่เวลาริเลย์ต่ำสุด 1/2 ไซเคลิบวกเวลาในการเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์



รูปที่ 3.1 รูปแสดงค่าที่ต้องการในการออกแบบเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นกรณีอื่น ๆ ผู้ใช้เห็นชอบโดยปริยายในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวคูณที่ใช้กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ จะแสดงได้ดังตารางข้างล่าง

ชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้เปิดวงจร	ค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องจักรไฟฟ้าที่จะใช้			ค่าตัวคูณ	
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ ซิงโครนัส	ซิงโครนัสมอเตอร์	มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ	กรณีปกติ	กรณีพิเศษ
เซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังที่มีการใช้เวลา ในการเปิดวงจร					
8 ไซเคิล	$X''_d$	$X'_d$	ไม่ต้องพิจารณา	1.0	1.1 <sup>n</sup>
5 ไซเคิล	$X''_d$	$X'_d$	ไม่ต้องพิจารณา	1.1	1.2 <sup>n</sup>
3 ไซเคิล	$X''_d$	$X'_d$	ไม่ต้องพิจารณา	1.2	1.3 <sup>n</sup>
2 ไซเคิล	$X''_d$	$X'_d$	ไม่ต้องพิจารณา	1.4	1.5 <sup>n</sup>
เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ	$X''_d$	$X''_d$	$X''_d$	1.0 <sup>u</sup>	-
โมลเตสเซอร์กิตเบรกเกอร์	$X''_d$	$X''_d$	$X''_d$	1.0	-
ฟิวส์และฟิวส์คัตเอาต์(> 1500 V.)	$X''_d$	$X''_d$	$X''_d$	1.6	1.2 <sup>n</sup>
ฟิวส์แรงต่ำ(< 600 V.)	$X''_d$	$X''_d$	$X''_d$	1.0 <sup>l</sup>	-
เครื่องควบคุมมอเตอร์แรงต่ำ	$X''_d$	$X''_d$	$X''_d$	1.25	-
โมเมนตารีคิวตี้ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ กำลัง	$X''_d$	$X''_d$	$X''_d$	1.6	1.5 <sup>l</sup>
<p>ก. ใช้เมื่อคำนวณหาค่าสมมาตรและมีขนาดเกิน 500 MVA และวงจรถูกป้อนโดยตรงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือผ่านรีแอกเตอร์(Reactor)จำกัดกระแส</p> <p>ข. ค่านี้พิจารณาที่ค่า <math>X/R &lt; 6.6</math> แต่ถ้ามากกว่าค่านี้แต่ต้อง <math>&lt; 12</math> จะใช้ 1.25</p> <p>ค. ใช้เฉพาะระบบ <math>&lt; 15</math> kV. และฟิวส์ที่ใช้ไม่ใช้แบบจำกัดกระแส และ <math>X/R &lt; 4</math></p> <p>ง. รวมฟิวส์จำกัดกระแสตามมาตรฐาน NEMA</p> <p>จ. ใช้เฉพาะระบบ <math>&lt; 5</math> kV. และไม่ได้จ่ายโดยตรงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือผ่านรีแอกเตอร์จำกัดกระแส</p>					

ตารางที่ 3.4 ค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และค่าตัวคูณที่ใช้ในการคำนวณ

### 3.4.2 ฟิวส์แรงสูง

แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. ฟิวส์จำกัดกระแส ซึ่งจะเปิดวงจรก่อนที่กระแสลัดวงจรจะถึงค่าสูงสุด

2. ฟิวส์ไม่จำกัดกระแส ซึ่งจะเปิดวงจรที่ 1 หรือ 2 ไซเคิล หลังจากเกิดการผิดปกติ

ค่าพิกัดกระแสของฟิวส์จะอยู่ที่ค่ากระแสสูงสุดและเป็นค่าอาร์เอ็มเอสในช่วงไซเคิลแรก

หลังจากเกิดการลัดวงจร ในการหากระแสลัดวงจรสำหรับฟิวส์จำกัดกระแสจะหา

จากค่า ขั้วทรานเซียนตรีแอกแตนซ์แกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ,

ซิงโครนัสมอเตอร์ และแหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบ และใช้ค่าตัวคูณ 1.6 สำหรับองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกริใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสตรง ในกรณีพิเศษเมื่อพิกัดแรงดันไฟฟ้า  $\leq 15$  kV. และพิวส์ไม่ได้เป็นชนิดจำกัดกระแส และ X/R ของวงจร  $< 4$  จะใช้ค่า 1.2 สำหรับตัวคูณ ดังนั้นค่าพิกัดอินเตอร์รับตั้งของพิวส์กำลัง จึงใช้วิธีการคำนวณเหมือนกับในกรณีพิกัดโมเมนทารีของเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลัง

### 3.4.3 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ

เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ ( $< 600$  V.) จะต่างจากเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลัง โดยเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำจะทำงานทันทีเมื่อกระแสเข้าใกล้พิกัดการทนต่อกระแสลัดวงจรของตัวมัน หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะเปิดออกในช่วงของไซเคิลแรกของกระแสลัดวงจร เนื่องจากการทำงานเร็วอันนี้เองจึงทำให้พิกัดโมเมนทารี และพิกัดอินเตอร์รับตั้งของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำเท่ากัน กระแสลัดวงจรจะสามารถคำนวณได้จากกระแสที่เกิดขึ้นในช่วง 1/2 ไซเคิลแรก ในช่วงนี้จะมียอดประกอบกระแสตรงประกอบด้วย โดยเกิดจากชั้บทรานเซียนต์รีเอกแตนซ์แกนตรง ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ และซิงโครนัสมอเตอร์ และค่าตัวคูณที่นำมาใช้จะมีค่าน้อยกว่าในกรณีของเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลัง เพราะว่า X/R ในกรณีแรงดันต่ำมีค่าน้อย

ในกรณีเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำนั้น ค่าพิกัดอินเตอร์รับตั้ง จะพิจารณาจากผลรวมของกระแสแบบไม่สมมาตร และเป็นค่าอาร์เอ็มเอสของ 1/2 ไซเคิลแรก และตามมาตรฐานของ NEMA และ IEEE จะใช้ค่าตัวคูณ 1.25 ที่ค่า X/R เป็น 11.72 ค่าตัวคูณนี้จะคูณกับกระแสลัดวงจรแบบสมมาตรในช่วง 1/2 ไซเคิลแรก หลายปีมาแล้วที่ NEMA พยายามที่จะหาค่าตัวคูณเพื่อที่จะใช้กับกระแสที่สมมาตรอินเตอร์รับตั้ง ปรากฏว่าในกรณีของการทดสอบที่กระแสไม่สมมาตรที่ค่าสูงสุด และค่า X/R ของวงจรไม่น้อยกว่า 6.6 จะใช้ค่าตัวคูณเป็น 1.17

ตารางต่อไปนี้เป็นารแสดงถึงพิกัดอินเตอร์รับตั้งที่ 1/2 ไซเคิลแรกของช่วงไม่สมมาตร ในกรณีทั่วไปค่า X/R  $> 6.6$  ใช้ค่าตัวคูณเป็น 1.25 และค่า X/R  $< 6.6$  จะใช้ค่าตัวคูณเป็น 1

ชนิดของ เซอร์กิตเบรกเกอร์	แรงดันไฟฟ้า		พิกัดอินเตอร์รับตั้ง ( ก )		30 ไซเคิล ( ข )		ขนาดเฟรมกระแส พิกัดต่อเนื่อง
	กระแสลัด	กระแสตรง	ไม่สมมาตร	สมมาตร	ไม่สมมาตร	สมมาตร	
15	600-481	250 และต่ำกว่า	15000	14000	15000	14000	225
15	480-241	-	25000	22000	15000	14000	225
15	240 และต่ำกว่า	-	30000	25000	15000	14000	225
25	600-481	250 และต่ำกว่า	25000	22000	25000	22000	600
25	480-241	-	35000	30000	25000	22000	600
25	240 และต่ำกว่า	-	50000	42000	25000	22000	600
50	600-481	250 และต่ำกว่า	50000	42000	50000	42000	1600
50	480-241	-	60000	50000	50000	42000	1600
50	240 และต่ำกว่า	-	75000	65000	50000	42000	1600
75	600-481	250 และต่ำกว่า	75000	65000	75000	65000	3000
75	480-241	-	75000	65000	75000	65000	3000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

75	240 และต่ำกว่า	-	100000	85000	75000	65000	3000
100	600-481	250 และต่ำกว่า	100000	85000	100000	85000	4000
100	480-241	-	100000	85000	100000	85000	4000
100	240 และต่ำกว่า	-	150000	130000	100000	85000	4000

( ก ) กระแสเมื่อวัดหลังจากเกิดการผิดปกติแล้ว 1/2 ไซเคิล ( ข ) มีอุปกรณ์เบรกจอร์ที่ค่อนข้างนุ่มนวล

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงพิกัดมาตรฐานสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำชนิดอากาศ

### 3.5 การคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร

กระแสลัดวงจรจะขึ้นอยู่กับค่าของอิมพีแดนซ์ตั้งแต่แหล่งจ่ายจนถึงจุดที่เกิดการลัดวงจร ดังนั้นปัญหาหลักในการคำนวณหากระแสลัดวงจรจึงอยู่ที่การหาค่าผลรวมของอิมพีแดนซ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง จากกฎของโอห์มจะได้ค่าของกระแสลัดวงจรจากสมการ

$$I = \frac{E}{Z}$$

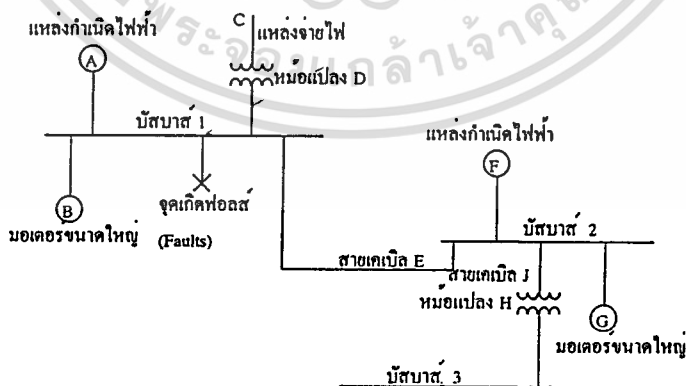
โดยที่ I = กระแสลัดวงจรที่สมมาตร

E = แรงดันเฟสของระบบ

Z = ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่เกี่ยวข้องกับการเกิดลัดวงจร =  $\sqrt{R^2 + X^2}$

ขั้นตอนการคำนวณหากระแสลัดวงจรมีดังนี้

1.เตรียมวันไลน์ไดอะแกรม(One Line Diagram) ซึ่งจำเป็นในการคำนวณและวิเคราะห์ความผิดปกติที่จะเกิดขึ้น โดยจะเป็นการแสดงถึงระบบไฟฟ้าทั้งหมดที่จะออกแบบและคำนวณสามารถยกตัวอย่างได้ดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของวันไลน์ไดอะแกรมตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ทาน ดังนั้นในการคำนวณหากระแสลัดวงจรอาจจะไม่พิจารณาค่าความต้านทานก็ได้ ส่วนพวกตัวนำต่างๆ เช่น สายเคเบิล(Cable) และสายเปลือย จะมีค่ารีแอกแตนซ์ใกล้เคียงกับค่าความต้านทาน ดังนั้นในการคำนวณหากระแสลัดวงจร ค่าความต้านทานก็จะมีผลต่อกระแสดังกล่าวอย่างมากด้วย

ถ้าอัตราส่วน  $X/R > 4$  นั้นหมายความว่า เราจะพิจารณาเฉพาะค่ารีแอกแตนซ์อย่างเดียว ซึ่งจะทำให้เกิดการผิดพลาดไม่เกิน 3% จากการพิจารณาทั้งค่าความต้านทาน และค่ารีแอกแตนซ์ กระแสที่คำนวณได้ก็就会有ความปลอดภัยสูงในการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน เพราะอุปกรณ์ป้องกันจะมีพิกัดสูงตามไปด้วย ซึ่งระบบที่มีแรงดันไฟฟ้า  $> 600$  V. ทัวไปมักมีค่าอัตราส่วน  $X/R > 4$  เสมอ แต่สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้า  $< 600$  V. ค่าอัตราส่วน  $X/R$  จะมีค่าน้อย ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานมีความสำคัญขึ้น จึงควรพิจารณาหาค่าความต้านทาน มาใช้ในการคำนวณหากระแสลัดวงจรด้วย แต่ในกรณีของเครื่องจักรไฟฟ้า เช่น เครื่องจักรไฟฟ้าที่หมุนได้, หม้อแปลง, รีแอกแตนซ์ ถึงแม้จะใช้กับระบบแรงดันไฟฟ้า  $< 600$  V. จะสามารถพิจารณาเฉพาะค่ารีแอกแตนซ์อย่างเดียวได้

### 3.6 การคำนวณหากระแสลัดวงจรในระบบที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 1 kV.

ในระบบแรงดันต่ำนี้จะมีคามยุ่งยากน้อยกว่าระบบแรงดันสูง นอกจากนี้อุปกรณ์ป้องกันที่ใช้กันอยู่ก็มีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในการคำนวณหากระแสลัดวงจรจะใช้กฎของโอห์ม

#### 3.6.1 เซอร์วิสเอนทรานซ์(Service Entrance)

โดยปกติแล้วการที่จะหากระแสลัดวงจร ณ ที่เซอร์วิสเอนทรานซ์นั้น เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง แต่โดยทั่วไปค่ากระแสลัดวงจร(ปัจจุบันและอนาคต)จากแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า จะหาได้จากกรไฟฟ้า ดังนั้นอุปกรณ์ป้องกันตัวเมนจะต้องมีพิกัดอินเตอร์รับตั้งไม่น้อยกว่าค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้ ณ ค่าสูงสุด

ในบางประเด็นตัวป้องกันสายป้อน อาจจะมีค่าการขัดจังหวะหรือเปิดวงจรที่สูงกว่าอุปกรณ์ป้องกันตัวเมนได้ ทั้งนี้เพราะอุปกรณ์ป้องกันสายป้อนจะมีกระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ไหลผ่านด้วย แต่อุปกรณ์ป้องกันตัวเมนจะไม่มีกระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ไหลผ่าน ในกรณีของกระแสลัดวงจรที่มี มอเตอร์เข้ามาเกี่ยวข้องนี้ จะสามารถพิจารณาหากระแสลัดวงจรที่จะมาจากมอเตอร์ได้ง่ายๆ ดังนี้ พิจารณาว่ากระแสที่มาจากมอเตอร์มีค่าเป็น  $I_M$  โดยที่  $I_M$  คือ 4 เท่าของผลบวกของกระแสพิกัดของ มอเตอร์ทุกตัวที่ต่ออยู่กับบัสบาร์ที่เกิดความผิดปกติขึ้น และค่ากระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_M$  นี้จะต้องพิจารณาถึงอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงและอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงด้วย ในกรณีที่มีมอเตอร์ต่อเข้ากับระบบของหม้อแปลง

### 3.6.2 การผิดปกติ ณ จุดต่างๆในระบบไฟฟ้า

ในกรณีที่จะคำนวณหากระแสลัดวงจรในระบบแรงดันไฟฟ้าค่า ณ จุดที่จะพิจารณานั้น จะยึดพื้นฐานของกฎของโอห์ม คือ

$$I = \frac{V_{LN}}{Z}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$X = \frac{Z(X/R)}{\sqrt{(X/R)^2 + 1}}$$

$$R = \frac{X}{X/R}$$

โดยที่  $I$  = กระแสลัดวงจรที่พิจารณาที่ค่าอาร์เอ็มเอส และเป็นแบบสมมาตร โดยอยู่ในช่วงไซเคิลแรก

$V_{LN}$  = แรงดันไฟฟ้าที่เป็นค่าเฟส

$R$  = ค่าความต้านทานรวม( $\Omega$ ) และเป็นค่าเฟส

$X$  = ค่ารีแอกแตนซ์รวมที่พิจารณาในช่วงไซเคิลแรก( $\Omega$ ) และเป็นค่าเฟส

$Z$  = ค่าอิมพีแดนซ์รวมที่พิจารณาในช่วงไซเคิลแรก( $\Omega$ ) และเป็นค่าเฟส

ในกรณีที่พิจารณาที่เซอร์วิสเอนทรานซ์นั้น ถ้ารู้ค่าของ  $I$  และ  $V_{LN}$  จะกำหนดให้  $X = 0.98V_{LN}/I$  และ  $R = 0.2V_{LN}/I \Omega$  โดย  $X$  จะเป็นค่ารีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายไฟ และ  $R$  จะเป็นค่าความต้านทานของแหล่งจ่ายไฟ นอกจากนี้ค่าตัวประกอบกำลังที่ใช้จะอยู่ที่ค่าประมาณ 0.2 (หรือ  $X/R = 5$ )

### 3.6.3 เมื่อเกิดการผิดปกติที่ขั้วของหม้อแปลง

ในกรณีที่ระบบที่พิจารณาได้รับการป้อนกำลังงานไฟฟ้าจากหม้อแปลงสามเฟส และข้อมูลต่างๆของหม้อแปลงนี้ทำได้ ดังนั้นในการคำนวณหากระแสลัดวงจรจะต้องนำค่าของหม้อแปลงมาพิจารณาด้วย ค่ากระแสลัดวงจรที่ขั้วของหม้อแปลง( $I_T$ ) จะหาได้จาก

$$I_T = \frac{V_{LN}}{\sqrt{(R_S + R_T)^2 + (X_S + X_T)^2}}$$

โดยที่  $V_{LN}$  = แรงดันไฟฟ้าที่เป็นค่าเฟสของหม้อแปลงทางคานทุติยภูมิ

$R_S$  = ค่าความต้านทานของแหล่งจ่ายไฟจนถึงหม้อแปลง( $\Omega$ )

$X_S$  = ค่ารีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายไฟจนถึงหม้อแปลง( $\Omega$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

$R_T =$  ค่าความต้านทานของหม้อแปลง( $\Omega$ )

$X_T =$  ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลง( $\Omega$ )

### 3.6.4 เมื่อเกิดการผิดปกติบนสายป้อนและวงจรย่อย

ที่จุดสุดท้ายของสายป้อน ค่ากระแสลัดวงจรจะมีค่าลดลงเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำและบัสเวย์(Busway) ที่นำมาทำสายป้อน

### 3.7 การคำนวณหากระแสลัดวงจรที่ระดับแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 1 kV.

การคำนวณหากระแสลัดวงจรที่ระดับแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 1 kV. และที่มีหลายระดับแรงดันไฟฟ้า หลักการในการคำนวณหากระแสลัดวงจรจะใช้หลักการของเพอร์ยูนิต

ในระบบเพอร์ยูนิตจะมีค่าเบสอยู่ 4 ค่า คือ กำลังเบส(kVA),แรงดันเบส(V),อิมพีแดนซ์เบส( $\Omega$ ) และกระแสเบส(A) ความสัมพันธ์ระหว่างเบส(เพอร์ยูนิต) และปริมาณค่าจริง(Actual Quantities) คือ

$$P.U. = \frac{\text{Actual\_quantities}}{\text{Base\_value}}$$

$$\text{Actual\_quantities} = P.U. * \text{Base\_value}$$

โดยทั่วไปจะเลือกค่ากำลังเบส ส่วนค่าแรงดันเบสจะพิจารณาที่แต่ละระดับแรงดันไฟฟ้า และจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนรอบของหม้อแปลง โดยปกติค่ากำลังเบสที่นิยมใช้คือ 10000 kVA ส่วนแรงดันเบสจะใช้ค่าแรงดันไลน์(Line Voltage:kV)

$$I_b = \frac{kVA_b}{\sqrt{3}kV_b}$$

$$Z_b = \frac{kV_b * 1000}{\sqrt{3}I_b} = \frac{(kV_b)^2}{MVA_b}$$

โดยที่  $I_b =$  กระแสเบส(A)

$kV_b =$  แรงดันเบส(kV) ที่เป็นค่าไลน์

$kVA_b =$  กำลังเบส(kVA)

$MVA_b =$  กำลังเบส(MVA)

$Z_b =$  อิมพีแดนซ์เบสต่อเฟส( $\Omega$ /phase) (ส่วนมากค่าอิมพีแดนซ์จะแสดงในค่าของรีแอกแตนซ์เบส: $X_b$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรโดยมากจะเป็นค่าจริงและมีหน่วยเป็น  $\Omega$  หรือเป็น % ซึ่งขึ้นอยู่กับพิกัด นอกจากนี้สายตัวนำจะมีหน่วยเป็น  $\Omega$  ดังนั้นจึงพอที่จะสรุปได้ว่า

$$X_{PU} = \frac{X_a * kVA_b}{1000 * kV_b^2}$$

$$X_{PU} = \frac{X\% * kVA_b}{100 * kVA_e} \left(\frac{kV_e}{kV_b}\right)^2$$

$$X_{PU} = \frac{X_{PUE} * kVA_b}{kVA_e} \left(\frac{kV_e}{kV_b}\right)^2$$

โดยที่  $X_{PU}$  = ค่าเพอร์ยูนิตรีเอกแตนซ์ ในกรณี que เลือก  $kVA_b$  เป็นเบส(p.u.)

$X_{PUE}$  = ค่าเพอร์ยูนิตรีเอกแตนซ์ ในพิกัดกำลังจริง(p.u.)

$X_a$  = ค่ารีเอกแตนซ์จริง( $\Omega$ )

$X\%$  = ค่าเปอร์เซ็นต์รีเอกแตนซ์ ในกรณีอ้างอิงพิกัดกำลังจริง(%)

$kVA_e$  = พิกัดกำลังจริง(kVA)

$kV_e$  = พิกัดแรงดัน(kV)

เนื้อหาที่จะกล่าวต่อไปจากนี้ จะให้ตัวแปรดังนี้

$E$  = แรงดันไฟฟ้าต่อเฟส ณ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์(p.u.)

$X$  = รีเอกแตนซ์ของระบบที่เกิด ณ จุดเกิดฟอลต์(เมื่อกำหนดให้ความต้านทานเป็นศูนย์) ซึ่งอาจจะเป็นได้ทั้ง  $X_1$  หรือ  $2X_1 + X_0$  แล้วแต่ว่าจะพิจารณาในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟสหรือแบบหนึ่งเฟสลงดิน ตามลำดับ

$X_1$  = รีเอกแตนซ์ลำดับบวก(Positive Sequence Reactance)

$X_2$  = รีเอกแตนซ์ลำดับลบ(Negative Sequence Reactance)

$X_0$  = รีเอกแตนซ์ลำดับ(Zero Sequence Reactance)

$X_d''$  = ค่าซัพทรานเซียนตรีเอกแตนซ์แกนตรงของเครื่องจักรแบบซิงโครนัส หรือลือคโรเตอร์รีเอกแตนซ์ของเครื่องจักรแบบเหนี่ยวนำ

$X_d'$  = ค่าทรานเซียนตรีเอกแตนซ์แกนตรงของเครื่องจักรแบบซิงโครนัส

$R$  = ความต้านทานของระบบที่เกิด ณ จุดเกิดฟอลต์(เมื่อกำหนดให้รีเอกแตนซ์เป็นศูนย์) ซึ่งอาจจะเป็นได้ทั้ง  $R_1$  หรือ  $2R_1 + R_0$  แล้วแต่ว่าจะพิจารณาในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟสหรือแบบหนึ่งเฟสลงดิน ตามลำดับ

$R_1$  = ความต้านทานลำดับบวก(Positive Sequence Resistance)

$R_2$  = ความต้านทานลำดับลบ(Negative Sequence Resistance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ความต้านทานลำดับ(Zero Sequence Resistance) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Z =$  อิมพีแดนซ์ของระบบที่เกิด ณ จุดเกิดฟอลต์

3.7.1 วิธีที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่ระดับแรงดันมากกว่า 1 kV.

3.7.1.1 วิธีอย่างง่ายโดยพิจารณาเฉพาะค่า E/X (E/X Simplified Method)

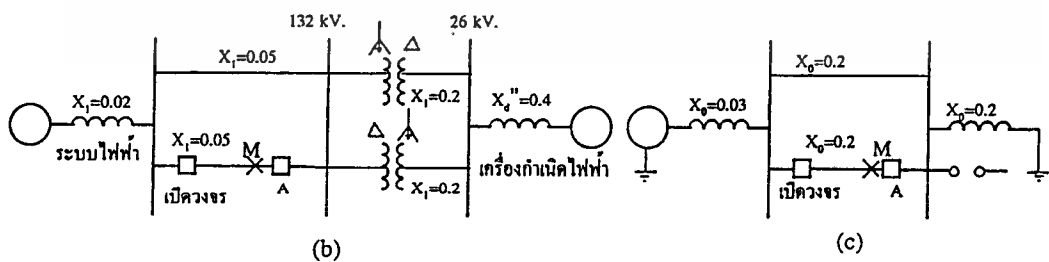
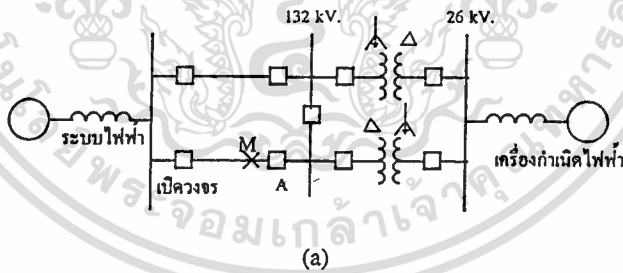
$$I_{3\phi} = \frac{E}{X_1}$$

$$I_{1\phi} = \frac{3E}{(2X_1 + X_0)}$$

$I_{3\phi}$  ที่หาได้จะเป็นค่าอาร์เอ็มเอสแบบสมมาตร(Symmetrical rms) และสำหรับโมเมนตารีคิวิตีของเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลัง จะได้ค่าอาร์เอ็มเอสแบบไม่สมมาตร(Asymmetrical rms) =  $1.6 * I_{3\phi}$  และค่าสูงสุดแบบไม่สมมาตร(Asymmetrical Peak) =  $2.7 * I_{3\phi}$

วิธีนี้เป็นวิธีในการคำนวณหากระแสลัดวงจรอย่างง่าย โดยจะพิจารณาเฉพาะค่า X ของระบบ ส่วนค่า R จะไม่พิจารณา และผลที่ได้จะมีความถูกต้องพอเพียงก็ต่อเมื่อ X/R ของระบบมีค่า  $\leq 15$

ค่ากระแสที่คำนวณได้จากวิธีนี้จะถือเป็น 80% ของอินเตอร์ริงคิงการพาวิริตีแบบสมมาตรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟส และถือเป็น 70% ของอินเตอร์ริงคิงการพาวิริตีแบบสมมาตรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในกรณีความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน ตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 3.4 (a). วันไลน์ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในตัวอย่างที่ 1

(b). รีแอกแตนซ์ลำดับบวกสำหรับระบบในรูป (a)

(c). รีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์สำหรับระบบในรูป (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแหล่งอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**วิธีทำ** (ก).การคำนวณความผิดพลาดแบบสามเฟส

ค่า  $X$  ต่างๆ ในรูปข้างบนอยู่ในรูปเพอร์ยูนิท โดยมีกำลังเบส = 100 MVA , แรงดันเบส = แรงดันปกติที่บัสนั้นๆ จะได้

$$X_{1(total)} = \frac{(0.05+0.02)(0.4 + \frac{0.2}{2})}{(0.05+0.02) + (0.4 + \frac{0.2}{2})} = 0.061 P.U.$$

แรงดันเบส = 132 kV

กระแสเบส = 437 A

$$I_{sc} = \frac{1}{0.061} * 437 = 7164 A.$$

(ข).การคำนวณความผิดพลาดแบบหนึ่งเฟสลงดิน

$$X_{0(total)} = \frac{(0.03+0.2)(0.2)}{(0.03+0.2) + (0.2)} = 0.107 P.U.$$

$$I_{sc} = \frac{3 * 1}{2(0.061) + 0.107} * 437 = 5725 A.$$

เนื่องจากค่า  $I_{sc(1\phi)} < I_{sc(3\phi)}$  ดังนั้นจะใช้ค่า  $I_{sc(3\phi)}$  ในการพิจารณาค่าอินเตอร์รับตั้งคาร์พาบีรีตีแบบสมมาตรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ คือ ไซเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีอินเตอร์รับตั้งคาร์พาบีรีตีแบบสมมาตรไม่น้อยกว่า  $1.25 * 7164 = 8955 A$

### 3.7.1.2 วิธีใช้ค่า E/X ที่มีการชดเชยในส่วนของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรงและกระแสสลับ (E/X Method With Adjustment for AC and DC Decrements)

วิธีนี้จะให้ค่าที่ถูกต้องกว่าวิธีแรก และจะใช้วิธีนี้ก็ต่อเมื่อ

1. อัตราส่วน  $X/R > 15$

2.  $I_{sc(3\phi)} > 80\%$  ของค่าอินเตอร์รับตั้งคาร์พาบีรีตีแบบสมมาตรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในกรณีความผิดพลาดแบบสามเฟส

3.  $I_{sc(1\phi)} > 70\%$  ของค่าอินเตอร์รับตั้งคาร์พาบีรีตีแบบสมมาตรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในกรณีความผิดพลาดแบบหนึ่งเฟสลงดิน

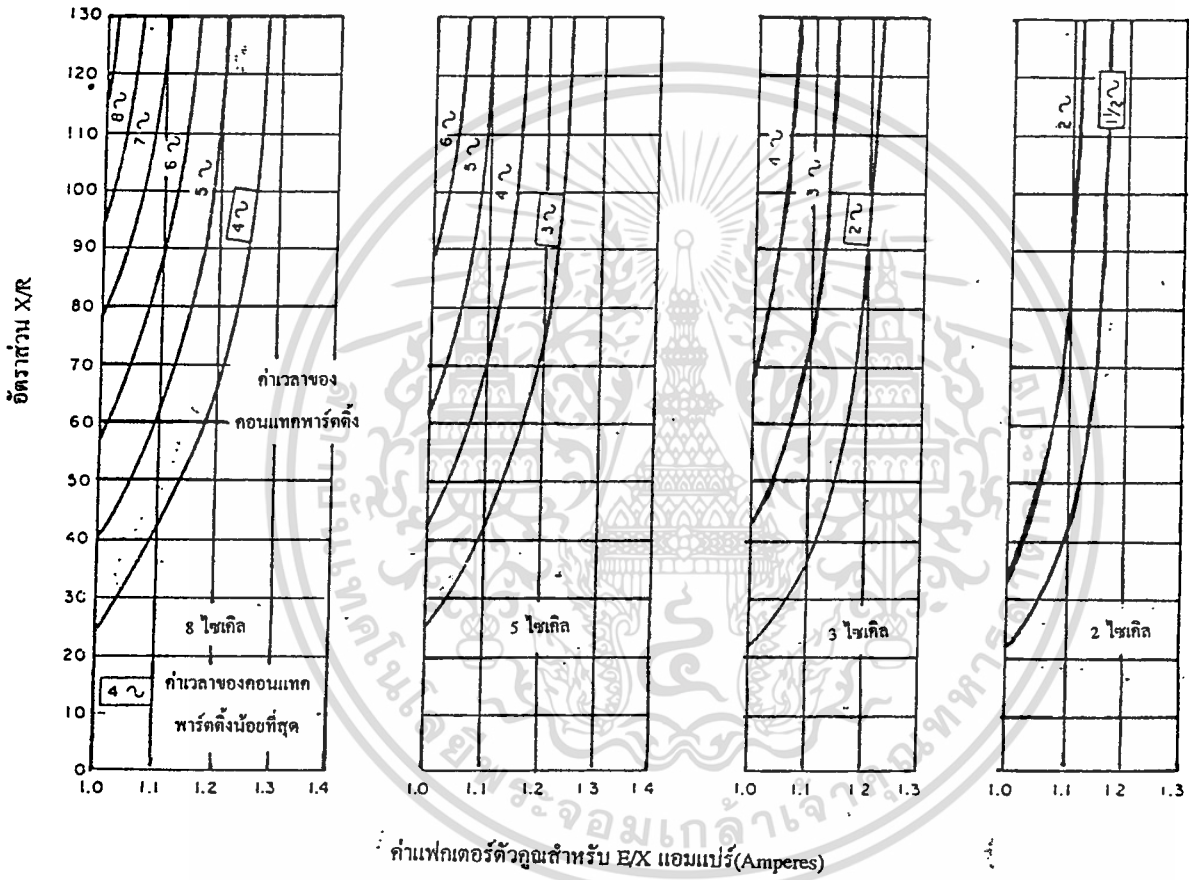
วิธีนี้จะเริ่มด้วยการหาค่า  $I_{sc}$  ตามวิธีอย่างง่ายโดยพิจารณาเฉพาะค่า E/X ออกมาก่อน จากนั้นจะใช้ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณ(Multiplying Factor) ที่สัมพันธ์กับค่าอัตราส่วน X/R คูณแก้ค่า  $I_{sc}$  ที่ได้จากวิธีอย่างง่ายโดยพิจารณาเฉพาะค่า E/X อีกที

ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณที่ไซสามารถหาได้ดังนี้

(1).กรณีคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ(AC and DC

Decrement) ทั้งสองตัว ซึ่งกรณีนี้จะใช้เมื่อกระแสสลับวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

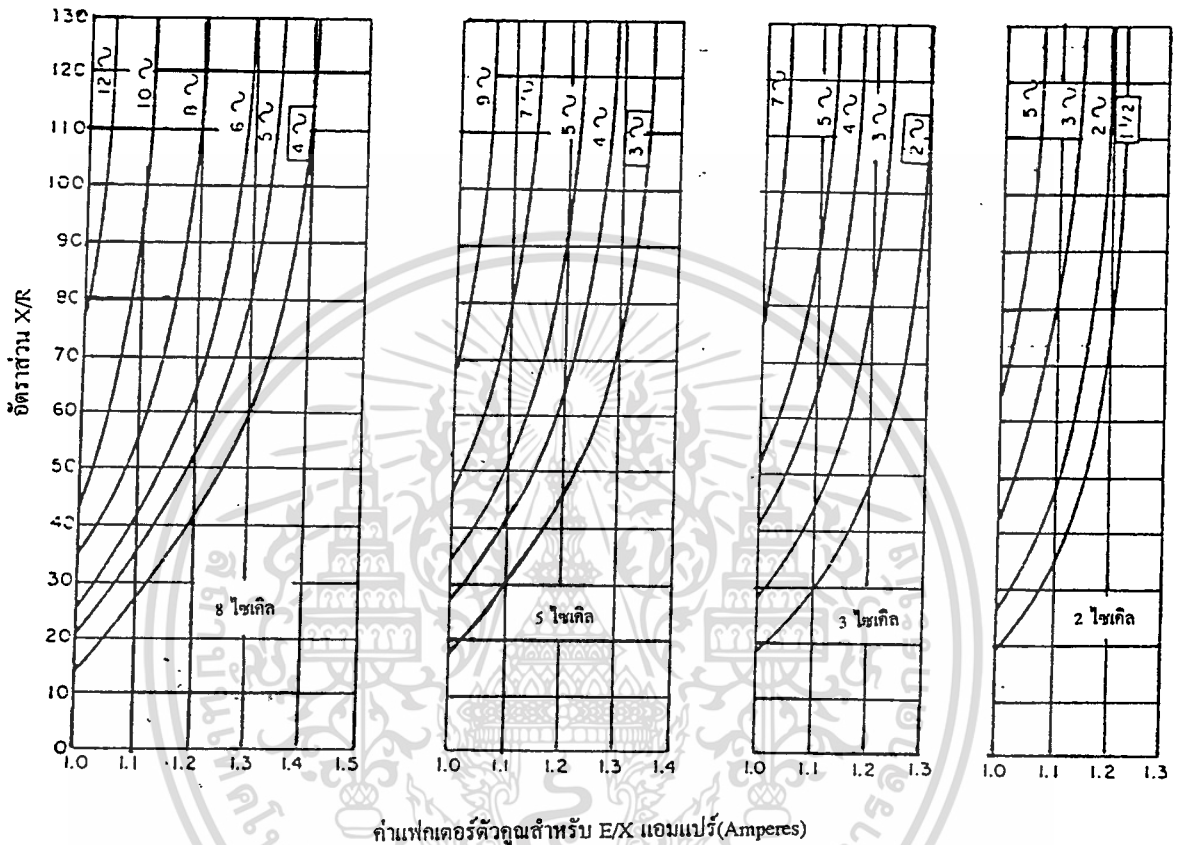
แปลงหนึ่งตัว(One Transformer) หรือจ่ายผ่านรีแอกแตนซ์ภายนอก(External Reactance) ที่มีค่าน้อยกว่า  $1.5 \cdot X_d^{(gen)}$  ที่พิกัดกำลังเบสของระบบ และกราฟที่โซ่หา ดังข้างล่าง



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟส

โดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ

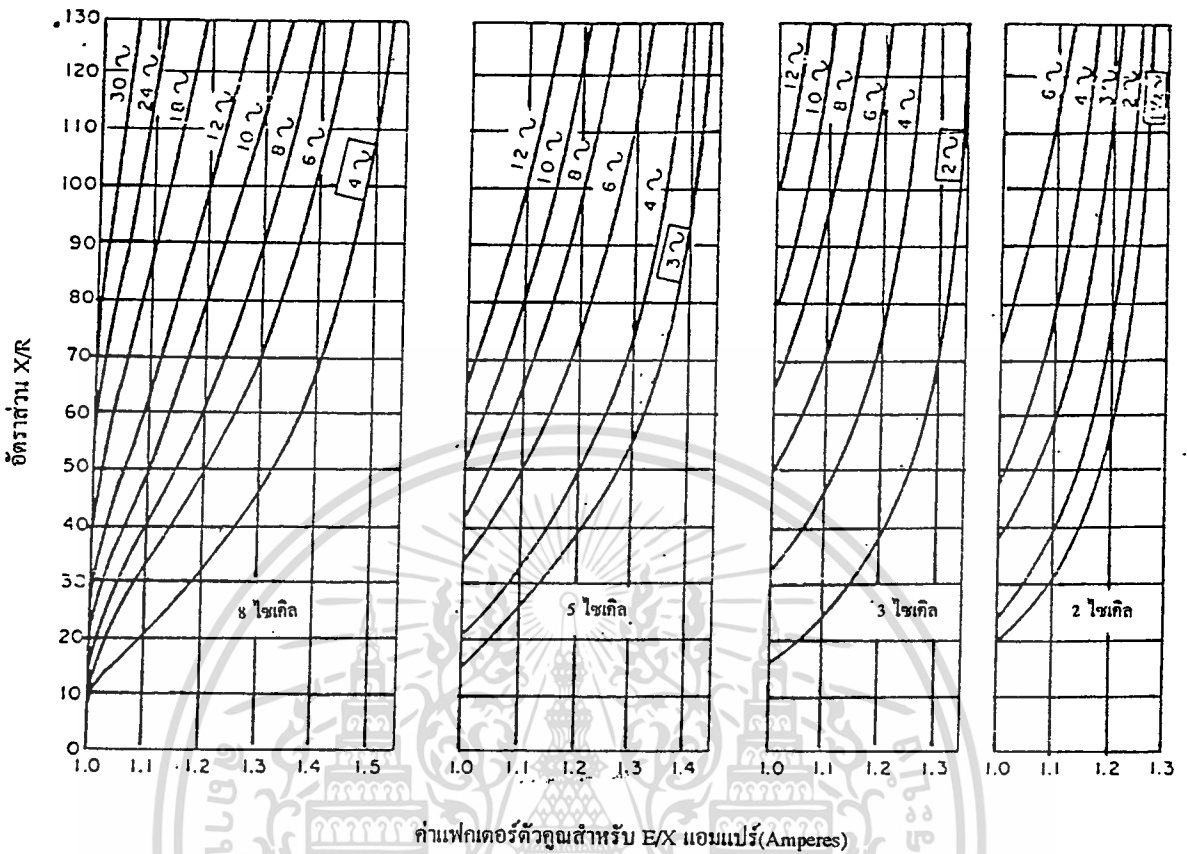
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน โดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ

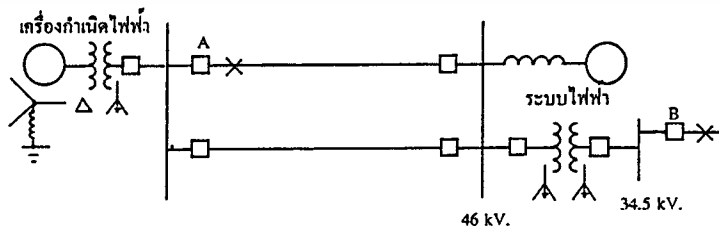
(2).กรณีคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง(DC Decrement)อย่างเดียว ซึ่งกรณีนี้จะใช้เมื่อกระแสสลับคงจรงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายผ่านหม้อแปลงมากกว่าหนึ่งตัว(Two or More Transformers) หรือจ่ายผ่านรีแอกแตนซ์ภายนอกที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $1.5 \cdot X_d''$  (gen) ที่พิกัดกำลังเบสของระบบ และกราฟที่โซหา ดังข้างกลาง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



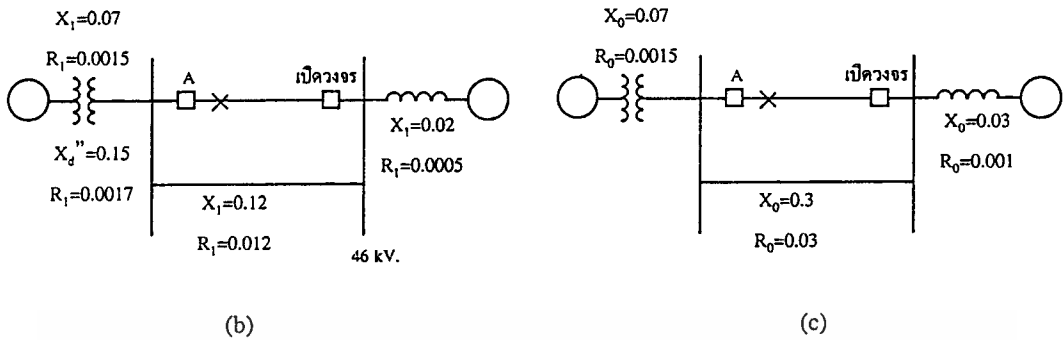
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟส และหนึ่งเฟสลงดิน โดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรงอย่างเดียว

ค่า  $I_{sc}$  ที่คำนวณได้จากวิธีนี้ ไม่ควรมีค่าเกินค่าอินเตอร์รับตั้งการพาวเวอร์ตีแบบสมมาตรของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เลือกใช้  
ตัวอย่างที่ 2



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 (a). วันไลน์ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในตัวอย่างที่ 2

(b). อิมพีแดนซ์ลำดับบวกสำหรับระบบในรูป (a) (เซอร์กิตเบรกเกอร์ A)

(c). อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์สำหรับระบบในรูป (a) (เซอร์กิตเบรกเกอร์ A)

วิธีทำ (ก). การคำนวณความผิดปกติแบบสามเฟสสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ A

ค่า X ต่างๆ ในรูปข้างบนอยู่ในรูปเพอร์ยูนิต โดยมีกำลังเบส = 100 MVA, แรงดันเบส = แรงดันปกติที่บัสนั้นๆ จะได้

$$X_{1(total)} = \frac{(0.15 + 0.07)(0.02 + 0.12)}{(0.15 + 0.07) + (0.02 + 0.12)} = 0.0856 P.U.$$

$$R_{1(total)} = \frac{(0.0017 + 0.0015)(0.0005 + 0.012)}{(0.0017 + 0.0015) + (0.0005 + 0.012)} = 0.00255 P.U.$$

แรงดันเบส = 46 kV

กระแสเบส = 1255 A

$$I_{SC} = \frac{1}{0.0856} * 1255 = 14662 A.$$

(ข). การคำนวณความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดินสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ A

$$X_{0(total)} = \frac{(0.03 + 0.3)(0.07)}{(0.03 + 0.3) + (0.07)} = 0.0578 P.U.$$

$$R_{0(total)} = \frac{(0.03 + 0.001)(0.0015)}{(0.03 + 0.001) + (0.0015)} = 0.00143 P.U.$$

$$I_{SC} = \frac{3 * 1}{2(0.0856) + (0.0578)} * 1255 = 16442 A.$$

(ค). แก่ค่า E/X ข้างต้นด้วยค่าแฟกเตอร์ตัวคูณได้ดังต่อไปนี้

- กรณีความผิดปกติแบบสามเฟส

$$\frac{X_1}{R_1} = \frac{0.0856}{0.00255} = 33.6$$

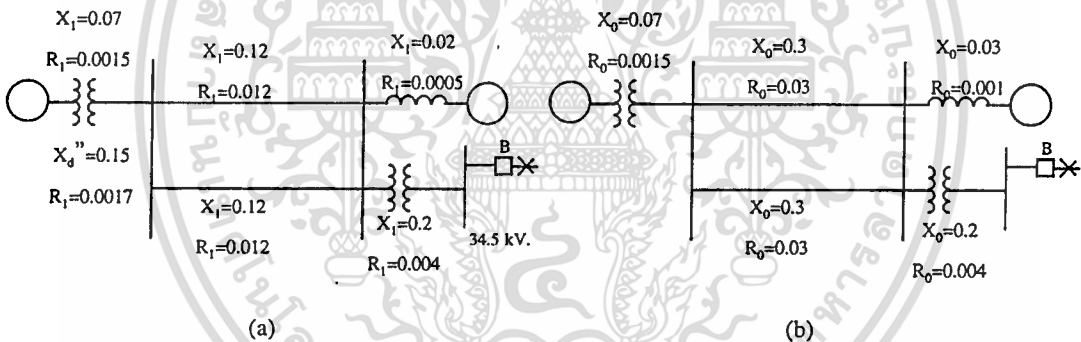
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ 5-ไซเคิลที่มีคอนแทคพาร์ตติ้งใหม่(Contact Parting Time) 3-ไซเคิล และเป็นสแตนดาร์ดดิวตี้ไซเคิล(Standard Duty Cycle) เนื่องจาก  $X/R > 15$  และเซอร์กิตเบรกเกอร์ต่อยู่นบนเมนบัส(Main Bus) ซึ่งกระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายผ่านหม้อแปลงเพียงตัวเดียว ดังนั้นจะได้ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณ = 1.05 ดังนั้นค่ากระแสที่จะนำไปใช้เลือกค่าอินเตอร์รับตั้งการพาปริตี้แบบสมมาตรของเซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับความผิดปกติแบบสามเฟส คือ  $1.05 * 14662 = 15396 \text{ A}$

- กรณีความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน

$$\frac{2X_1 + X_0}{2R_1 + R_0} = \frac{2(0.0856) + 0.0578}{2(0.00255) + 0.00143} = 35.1$$

จะได้ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณ = 1.13 ดังนั้นค่ากระแสที่จะนำไปใช้เลือกค่าอินเตอร์รับตั้งการพาปริตี้แบบสมมาตรของเซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน คือ  $1.13 * 16442 = 18580 \text{ A}$



รูปที่ 3.9 (a). อิมพีแดนซ์ลำดับบวกสำหรับระบบในรูปที่ 3.8(a) (เซอร์กิตเบรกเกอร์ B)

(b). อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์สำหรับระบบในรูปที่ 3.8(a) (เซอร์กิตเบรกเกอร์ B)

(ง). การคำนวณความผิดปกติแบบสามเฟสสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ B

$$X_{1(total)} = \frac{(0.15 + 0.07 + \frac{0.12}{2})(0.02)}{(0.15 + 0.07 + \frac{0.12}{2}) + (0.02)} + 0.2 = 0.219 P.U.$$

$$R_{1(total)} = \frac{(0.0017 + 0.0015 + \frac{0.012}{2})(0.0005)}{(0.0017 + 0.0015 + \frac{0.012}{2}) + (0.0005)} + 0.004 = 0.0047 P.U.$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเบส = 34.5 kV

กระแสเบส = 1670 A

$$I_{sc} = \frac{1}{0.219} * 1670 = 7626 A.$$

(จ).การคำนวณความผิดพลาดแบบหนึ่งเฟสลงดินสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ B

$$X_{0(total)} = \frac{(0.07 + \frac{0.3}{2})(0.03)}{(0.07 + \frac{0.3}{2}) + (0.03)} + 0.2 = 0.226 P.U.$$

$$R_{0(total)} = \frac{(0.0015 + \frac{0.03}{2})(0.001)}{(0.0015 + \frac{0.03}{2}) + (0.001)} + 0.004 = 0.0049 P.U.$$

$$I_{sc} = \frac{3 * 1}{2(0.219) + (0.226)} * 1670 = 7546 A.$$

(ฉ).แก้ค่า E/X ข้างต้นด้วยค่าแฟกเตอร์ตัวคูณได้ดังต่อไปนี้

- กรณีความผิดพลาดแบบสามเฟส

$$\frac{X_1}{R_1} = \frac{0.219}{0.0047} = 49.0$$

จะเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ 5-ไซเคิลที่มีคอนแทคพาร์ตตั้งใหม่ 4-ไซเคิล และเป็นสแตนดาร์ดคิวตี้ไซเคิล เนื่องจาก  $X/R > 15$  และเซอร์กิตเบรกเกอร์ต่ออยู่ บนระบบสายส่งย่อย ซึ่งกระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายผ่านหม้อแปลง มากกว่า 1 ตัว ดังนั้นจะได้ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณ = 1.2 ดังนั้นค่ากระแสที่จะนำไปใช้เลือกค่าอินเตอร์รับตั้งการพำบริตีแบบสมมาตรของเซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับ ความผิดพลาดแบบสามเฟส คือ  $1.2 * 7226 = 8672 A$

- กรณีความผิดพลาดแบบหนึ่งเฟสลงดิน

$$\frac{2X_1 + X_0}{2R_1 + R_0} = \frac{2(0.219) + 0.226}{2(0.00447) + 0.0044} = 47.8$$

จะได้ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณ = 1.19 ดังนั้นค่ากระแสที่จะนำไปใช้เลือกค่าอินเตอร์รับตั้งการพำบริตีแบบสมมาตรของเซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับความผิดพลาดแบบหนึ่งเฟสลงดิน คือ  $1.19 * 7546 = 8980 A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7.2 ค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องจักรไฟฟ้าที่หมุนได้(Rotating Machine Reactances)

ค่ากระแสลัดวงจรเริ่มต้น(Initial Short-circuit Current)ของเครื่องจักรไฟฟ้าที่หมุนได้ จะถูกกำหนดโดยค่าของซัพทรานเซียนตรีแอกแตนซ์แกนตรง ในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรจากทั้งสองวิธีข้างต้นจะใช้ค่ารีแอกแตนซ์ ดังตารางต่อไปนี้

ชนิดของเครื่องจักรไฟฟ้าที่หมุนได้	รีแอกแตนซ์ลำดับบวกที่ใช้ในการคำนวณ	
	อินเตอร์รับลิ่งคิวดี้ (เพอร์ยูนิต)	โมเมนทารีคิวดี้ (เพอร์ยูนิต)
1). เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเทอร์โบ,แบบพลังน้ำที่ไร้อะมอร์ติซเซอร์วินดิง(Amortisseur Windings) และคอนเดนเซอร์(Condensers)	$1.0X_d''$	$1.0X_d''$
2). เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบพลังน้ำที่ไม่ไร้อะมอร์ติซเซอร์วินดิง	$0.75X_d'$	$0.75X_d'$
3). ซิงโครนัสมอเตอร์	$1.5X_d''$	$1.0X_d''$
4). มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ		
1. มากกว่า 1000 Hp. ที่ 1800 rpm. หรือ น้อยกว่า 250 Hp. ที่ 3600 rpm.	$1.5X_d''$	$1.0X_d''$
2. ตั้งแต่ 50 ถึง 1000 Hp. ที่ 1800 rpm. หรือ น้อยกว่า 50 ถึง 250 Hp. ที่ 3600 rpm.	$3.0X_d''$	$1.2X_d''$
3. ไม่พิจารณามอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ 3-เฟสที่มีที่กัก 50 Hp. รวมทั้งมอเตอร์ 1-เฟสทั้งหมด		

ตารางที่ 3.6 แสดงค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวกที่ใช้ในการคำนวณของเครื่องจักรไฟฟ้าที่หมุนได้

### 3.7.3 ค่าความต้านทานของระบบและอัตราส่วน X/R (Resistance of System and Typical X/R Ratio)

จุดประสงค์ของการกำหนดค่าอัตราส่วน X/R มาให้ก็เพื่อใช้ในการหาค่าความต้านทานของอุปกรณ์ตัวนั้นๆ และเป็นการแสดงว่า ค่าความต้านทานของระบบมีผลต่อค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ซึ่งจะต้องนำค่าความต้านทานที่หาได้นี้มาพิจารณาประกอบในการหากระแสลัดวงจรด้วยสำหรับพวกเครื่องจักร(Machines) ค่าอัตราส่วน X/R จะเป็นค่าที่ใช้ในการวัดค่าไทม์คอนสแตนต์ของการลดทอนขององค์ประกอบกระแสตรงของกระแสลัดวงจรจากเครื่องจักร(Time Constant of Exponential Decay of DC Component of Machine Fault current)

โดยปกติแล้วค่าความต้านทาน และค่าอัตราส่วน X/R จะได้จากคู่มือของอุปกรณ์จากโรงงานผู้ผลิต หรืออาจจะใช้ค่าจากตารางต่อไปนี้ก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ในระบบ	ความต้านทานโดยประมาณ
1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเทอร์โบ และคอนเดนเซอร์	ความต้านทานประสิทธิผล(Effective Resistance)
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขั้วเด่น โพล(Salient Pole Generator)และมอเตอร์	ความต้านทานประสิทธิผล
3. มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ	1.2 เท่าของความต้านทานอาร์มาเจอร์กระแสตรง(DC Armature Resistance)
4. หม้อแปลงกำลัง(Power Transformers)	ความต้านทานสูญเสียแบบโหลดกระแสสลับ(AC Load Loss Resistance) (ไม่รวมความสูญเสียในขณะไม่มีโหลด หรือความสูญเสียช่วย(No-load Losses or Auxiliary Losses))
5. รีแอกเตอร์	ความต้านทานกระแสสลับ(AC Resistance)
6. สายส่ง และสายเคเบิล	ความต้านทานกระแสสลับ

หมายเหตุ: ความต้านทานประสิทธิผล =  $\frac{X_{2V}}{2\pi f T_{a3}}$

เมื่อ  $X_{2V}$  คือ รีแอกแตนซ์ลำดับที่ที่กักแรงดันไฟฟ้า

$T_{a3}$  คือ คาบไทม์คอนสแตนต์อาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กักแรงดันไฟฟ้า

โดยปกติแล้วค่าความต้านทานประสิทธิผล จะเท่ากับ 1.2 เท่าของความต้านทานกระแสตรง

ตารางที่ 3.7 แสดงค่าความต้านทานของอุปกรณ์ในระบบที่สามารถเลือกใช้ได้

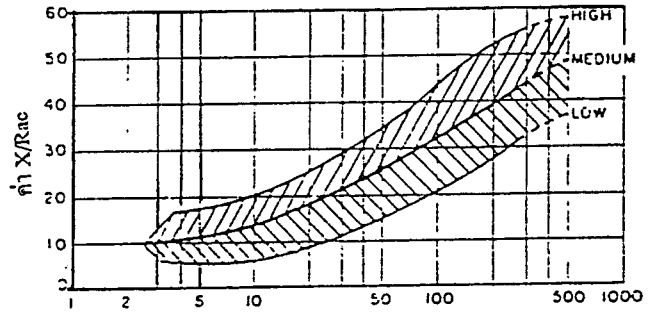
อุปกรณ์ในระบบ	ช่วง	ค่าที่เลือก
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่และซิงโครนัสคอนเดนเซอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ	40-120	80
หม้อแปลงกำลัง	ดูรูปที่ 3.10	-
มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ	ดูรูปที่ 3.11	-
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่และซิงโครนัสมอเตอร์	ดูรูปที่ 3.12	-
รีแอกเตอร์	40-120	80
สายส่งแบบเปลือย(Open Wire Lines)	2-16	5
สายเคเบิลใต้ดิน(Underground Cables)	1-3	2

ตารางที่ 3.8 แสดงช่วงของอัตราส่วน X/R ของอุปกรณ์ในระบบที่สามารถเลือกใช้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

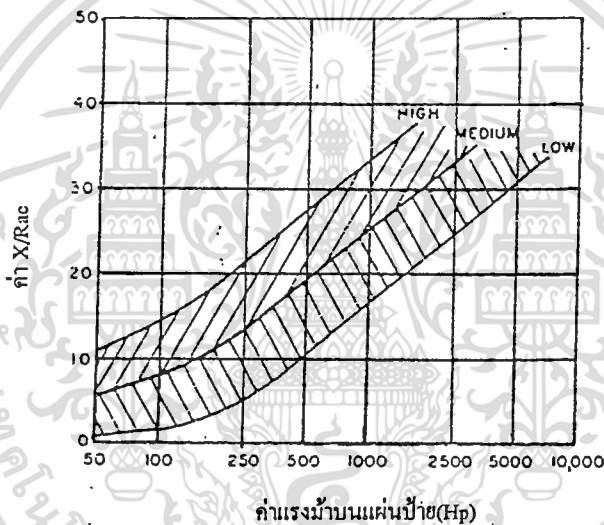
กรณีที่เป็นคลาสอื่น ให้ใช้ค่าแฟกเตอร์ในตาราง  
คูณกับค่าที่ติดกำลัง(MVA) ก่อนที่จะใช้รูปที่ 3.10

คลาส	พิกัดกำลัง(MVA)	แฟกเตอร์
OA	ทุกพิกัด	1.67
FA	มากกว่า 14.9	1.33
FA	16 และมากกว่า	1.25
FOA	ทุกพิกัด	1.00

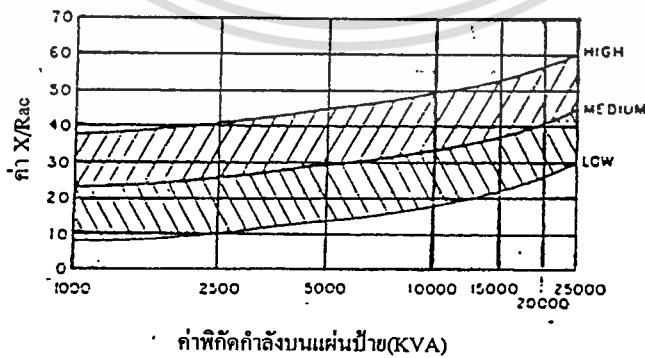


พิกัดกำลังของหม้อแปลงคลาส FOA (FOA Class) 3 เฟส(MVA)

รูปที่ 3.10 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับหม้อแปลงกำลัง

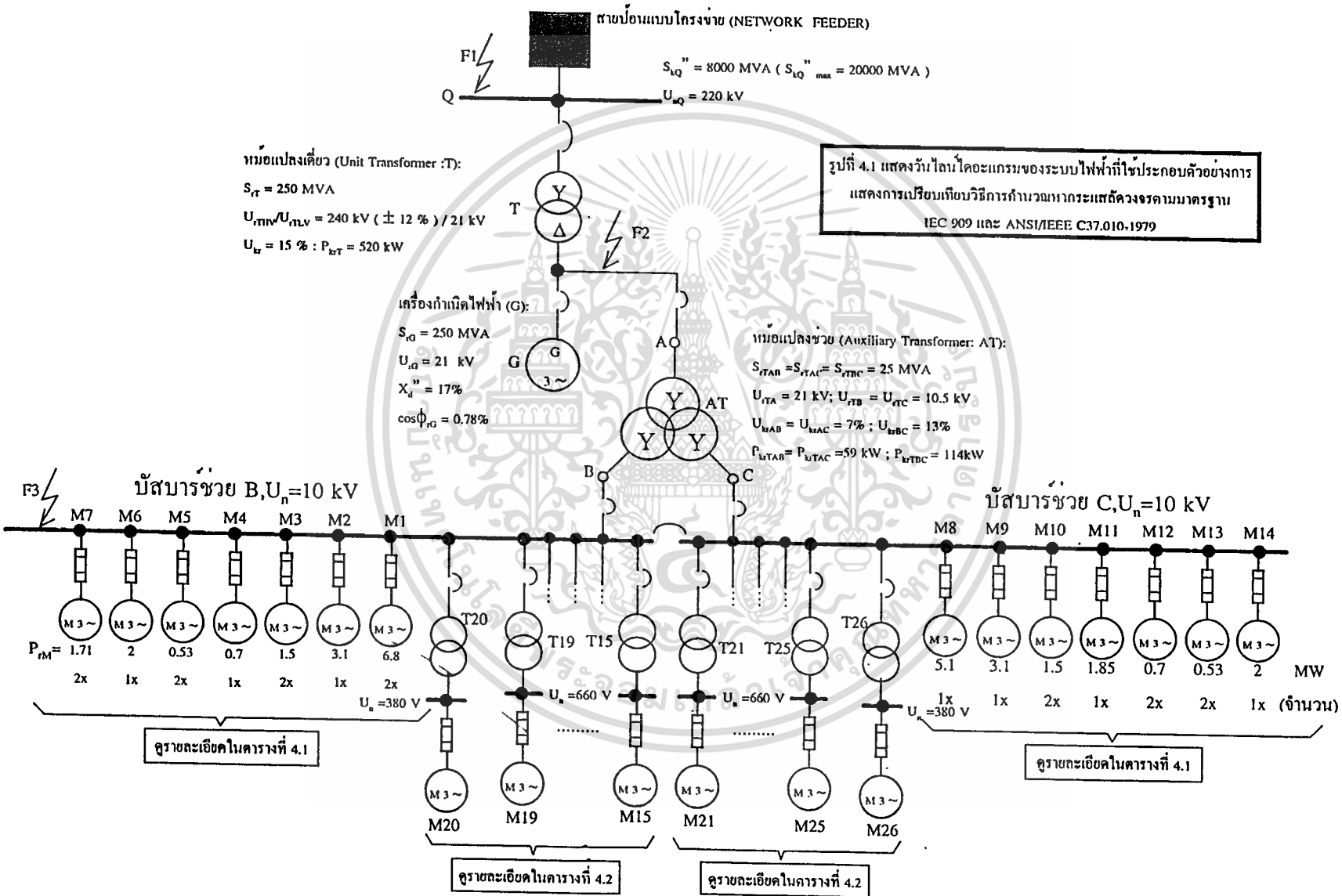


รูปที่ 3.11 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส



รูปที่ 3.12 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขาเคลื่อนโพลที่มีโซลิด โรเตอร์ขนาด

เล็ก(Small Solid Rotor and Salient Pole Generator) และซิงโครนัสมอเตอร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงวันไล่นโคจรของระบบไฟฟ้าที่ใช้ประกอบตัวอย่างการ  
 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการคำนวณหากระแสตัดคังจรตามมาตรฐาน  
 IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979

## บทที่ 4

### ตัวอย่างแสดงการคำนวณและเปรียบเทียบการหากระแสลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979

**ตัวอย่าง** จากรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นวันไลน์โคอะแกรมของระบบไฟฟ้าระบบหนึ่งมีความผิดปกติเกิดขึ้น 3 จุด คือ F1-F3 และข้อมูลในตารางที่ 4.1 และ 4.2 จะใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณ และเปรียบเทียบวิธีการหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979

บัสบาร์ช่วย		B							C									
หมายเลขมอเตอร์ (รูปที่ 4.1)		1	2	3	4	5	6	7	$\Sigma$ (1..7)	8	9	10	11	12	13	14	$\Sigma$ (8..14)	หมายเหตุ
$P_{m}$	MW	6.8	3.1	1.5	0.7	0.53	2	1.71	-	5.1	3.1	1.5	1.85	0.7	0.53	2	-	ข้อมูลจากผู้ผลิต
จำนวนมอเตอร์	-	2	1	2	1	2	1	2	-	1	1	2	1	2	2	1	-	
แรงดันไฟฟ้า	kV	10	10	10	10	10	10	10	-	10	10	10	10	10	10	10	-	
$\cos\phi_i$	-	0.89	0.85	0.88	0.85	0.75	0.85	0.95	-	0.87	0.85	0.88	0.85	0.85	0.75	0.85	-	
ประสิทธิภาพ	-	0.98	0.96	0.96	0.96	0.95	0.96	0.96	-	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.96	-	
$I_{LR}/I_{RM}$	-	4	4	4	4	4	4	4	-	4	4	4	4	4	4	4	-	
จำนวนคู่ขั้ว	-	2	2	1	3	5	3	3	-	3	2	1	3	3	5	3	-	
$\Sigma S_m$	MVA	15.7	3.8	3.54	0.87	1.5	2.45	4.2	32	6.02	3.8	3.54	2.27	1.73	1.5	2.45	21.3	
$\Sigma I_m$	kA	0.9	0.22	0.2	0.05	0.1	0.14	0.24	1.85	0.35	0.22	0.2	0.13	0.1	0.08	0.14	1.23	$I_m=S_m(\sqrt{3}U_m)$
$I_{m}''/I_m$	-	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	-	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	-	$m=P_m/p$
m	MW	3.4	1.55	1.5	0.23	0.11	0.67	0.57	-	1.7	1.55	1.5	0.62	0.23	0.11	0.67	-	
$R_m/X_m$	-	0.1	0.1	0.1	0.15	0.15	0.15	0.15	-	0.1	0.1	0.1	0.15	0.15	0.15	0.15	-	
$\chi_m$	-	1.75	1.8	1.75	1.65	1.65	1.65	1.65	-	1.75	1.75	1.75	1.65	1.65	1.65	1.65	-	
$\mu(t_{ms}=0.1s)$	-	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	-	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	-	
$q(t_{ms}=0.1s)$	-	0.72	0.62	0.62	0.4	0.31	0.52	0.5	-	0.63	0.62	0.62	0.51	0.4	0.31	0.52	-	
$I_m''$	kA	4	0.97	0.9	0.22	0.38	0.62	1.06	8.14	1.53	0.96	0.9	0.6	0.44	0.38	0.62	5.41	
$i_{pm}$	kA	9.85	2.4	2.23	0.51	0.9	1.45	2.5	20	3.8	2.4	2.22	1.35	1.03	0.9	1.45	13.1	
$I_{bm}$	kA	2.3	0.5	0.44	0.07	0.09	0.26	0.42	4	0.77	0.47	0.44	0.24	0.14	0.1	0.26	2.4	
$Z_m$	$\Omega$	1.6	6.6	7.06	28.7	16.8	10.2	6	0.78	4.15	6.56	7.06	11	14.5	16.8	10.2	1.15	
$X_m$	$\Omega$	$0.995Z_m$			$0.989Z_m$				0.77	$0.995Z_m$			$0.989Z_m$				1.17	
$R_m$	$\Omega$	$0.1X_m$			$0.15X_m$				0.08	$0.1X_m$			$0.15X_m$				0.13	

#### ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลของมอเตอร์แรงดันสูง

#### และค่ากระแสลัดวงจรบนบัสบาร์ช่วย B และบัสบาร์ช่วย C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หอยแปลงหมายเลข กลุ่มมอเตอร์หมายเลข		15 16 17 18 19	$\Sigma$ (15...19)	20	$\Sigma$ (15...19)	หมายเหตุ
$S_{IT}$	MVA	2.5	12.5	1.6	14.1	ข้อมูลจากผู้ผลิต
$U_{ITHV}$	kV	10		10		
$U_{ITLV}$	kV	0.693		0.4		
$U_{IT}$	%	6		6		
$P_{IT}$	kW	23.5		16.5		
$P_{IM}$ (กลุ่มมอเตอร์)	MW	0.9	4.5	1	5.5	
$U_{IM}$	kV	0.66		0.38		
$\cos(\phi, \eta_r)$	-	0.72		0.72		
$I_{LR}/I_{IM}$	-	5		5		
$R_M/X_M$	-	0.42		0.42		
$X_M$	-	1.3		1.3		
$S_{IM}$	MVA	1.25	6.25	1.39	7.67	
$Z_{TIV}$	$\Omega$	2.4		3.75		
$R_{TIV}$	$\Omega$	0.37		0.65		
$X_{TIV}$	$\Omega$	2.38		3.7		
$Z_M$	$\Omega$	0.07		0.02		$R_M=0.42 \cdot X_M$ $X_M=0.922 \cdot Z_M$ $U_n=0.66 \text{ kV} : 0.38 \text{ kV}$ $c=1.05$
$R_M$	$\Omega$	0.03		0.0081		
$X_M$	$\Omega$	0.06		0.0192		
$I_{IM}$	kA	5.74		11.8		
$Z_M=Z_M \cdot I_r^2$	$\Omega$	14.5		13		
$R_M=R_M \cdot I_r^2$	$\Omega$	5.62		5		
$X_M=X_M \cdot I_r^2$	$\Omega$	13.4		12		
$R_{TIV}+R_{MT}$	$\Omega$	6	1.2	5.64	0.991	
$X_{TIV}+X_{MT}$	$\Omega$	15.76	3.152	15.7	2.625	
$Z_{TIV}+Z_{MT}$	$\Omega$	16.86	3.372	16.7	2.806	$U_n=10 \text{ kV}$
$I_{IT}$	kA	0.377	1.883	0.381	2.264	$c=1.1$

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำด้านแรงดันต่ำ และข้อมูลของหอยแปลง 10 kV/0.693 kV และ 10kV/0.4kV ตามลำดับซึ่งเชื่อมต่อกับบัสบาร์ช่วย B ซึ่งใช้ในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรที่จุด F3

การคำนวณหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 เป็นกรณีใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ดังนี้

1. แหล่งจ่ายจากระบบไฟฟ้า

$$Z_Q = \frac{cU_n^2}{S_{kQ}} = \frac{1.1 \cdot (220 \text{ kV})^2}{8000 \text{ MVA}} = 6.655 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นจากข้อมูลที่มีอยู่ ณ วันที่ 15/05/2563 ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\underline{Z}_{Q\min} = (0.2649 + j2.649)\Omega$$

## 2. หม้อแปลงไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.1 สามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

$$\underline{Z}_{THV} = (0.479 + j34.56)\Omega$$

$$\underline{Z}_{TLV} = (0.00367 + j0.2646)\Omega$$

## 3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\underline{Z}_G = (0.0150 + j0.2999)\Omega$$

$$K_{G,PSU} = \frac{c_{\max}}{1 + \chi_d'' \sin \varphi_{rG}} = \frac{1.1}{1 + 0.17 * 0.6258} = 0.9942$$

$$\underline{Z}_{G,PSU} = K_{G,PSU} \underline{Z}_G = 0.994(0.0150 + j0.2999)\Omega = (0.0149 + j0.2982)\Omega$$

## 4. หม้อแปลงไฟฟ้าช่วย

ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวกของทั้ง 3 เฟส คือ  $Z_A$ ,  $Z_B$  และ  $Z_C$  สามารถหาค่าได้โดยอ้างอิงค่า  $U_{TA} = 21$  kV เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ของเฟสต่างๆ ได้ดังนี้

$$\underline{Z}_A = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}) = \frac{1}{2}(0.00282 + j0.1746)\Omega = (0.00141 + j0.0882)\Omega$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}) = \frac{1}{2}(0.08044 + j2.2918)\Omega = (0.04022 + j1.1459)\Omega$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}) = \frac{1}{2}(0.08044 + j2.2918)\Omega = (0.04022 + j1.1459)\Omega$$

แปลงค่ามาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 10.5 kV (ด้าน B หรือ C) ด้วยค่า  $t_r = 21$  kV/10.5 kV ซึ่งจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าช่วย 3 ขด คือ

$$\underline{Z}_{ALV} = \underline{Z}_A \frac{1}{t_r^2} (0.000353 + j0.02205)\Omega$$

$$\underline{Z}_{BLV} = \underline{Z}_{CLV} = \underline{Z}_B \frac{1}{t_r^2} (0.0101 + j0.2865)\Omega$$

## 5. หม้อแปลงแรงดันต่ำ 2.5 MVA และ 1.6 MVA

จากรูปที่ 4.1 หม้อแปลง 5 ตัว คือ T15...T19 ซึ่งมีค่า  $S_{T} = 2.5$  MVA และ  $U_{THV} / U_{TLV} = 10$  kV/0.4 kV ซึ่งหม้อแปลงแต่ละตัวได้รับค่ากระแสลัดวงจรจากแหล่งจ่ายของกลุ่มมอเตอร์ซึ่งโครนัส จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ดังในตารางที่ 4.1

## 6. มอเตอร์ซึ่งโครนัส

ข้อมูลและการคำนวณอิมพีแดนซ์ของกระแสลัดวงจรทางคานแรงดันไฟฟ้าสูงของมอเตอร์

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$I_{kG}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}Z_{G.PSU}} = \frac{1.1 * 21kV}{\sqrt{3} * 0.2986\Omega} = 44.66kA$$

$$I_{kT}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} \left[ Z_{T.PSU} + \frac{1}{t_f^2} Z_{Qmin} \right]}$$

$$= \frac{1.1 * 21kV}{\sqrt{3} \left[ 1.1 * 0.2646\Omega + \left( \frac{21kV}{220kV} \right)^2 * 2.662\Omega \right]} = 42.30kA$$

$$I_k'' = I_{kG}'' + I_{kT}'' = 86.96kA$$

$$i_p = i_{pG} + i_{pT}$$

$$i_p = 233.53kA$$

$$I_b = I_{bG} + I_{bT} = I_{bG} + I_{kT}''; I_{bT} = I_{kT}''$$

$$I_b = 31.71kA + 42.30kA = 74.01kA$$

$$I_b = 31.71kA + 4.30kA = 74.01kA$$

การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรที่ตำแหน่ง F3

หาค่า  $I_k''$  ได้จาก

$$I_{kAT}'' = \frac{cU''}{\sqrt{3}Z_{kAT}} = \frac{1.1 * 10kV}{\sqrt{3}(0.011 + j0.3438)\Omega} = (0.649 - j18.45)kA$$

$$I_{k\Sigma(M1..M7)}'' = (0.894 - j8.075)kA; (|I_{k\Sigma(M1..M7)}''| = 8.124kA)$$

$$I_{k\Sigma(M+T,15..20)}'' = (0.799 - j2.118)kA; (|I_{k\Sigma(M+T,15..20)}''| = 2.264kA)$$

$$|I_k''| = 28.74kA$$

หาค่า  $i_p$  ได้จาก

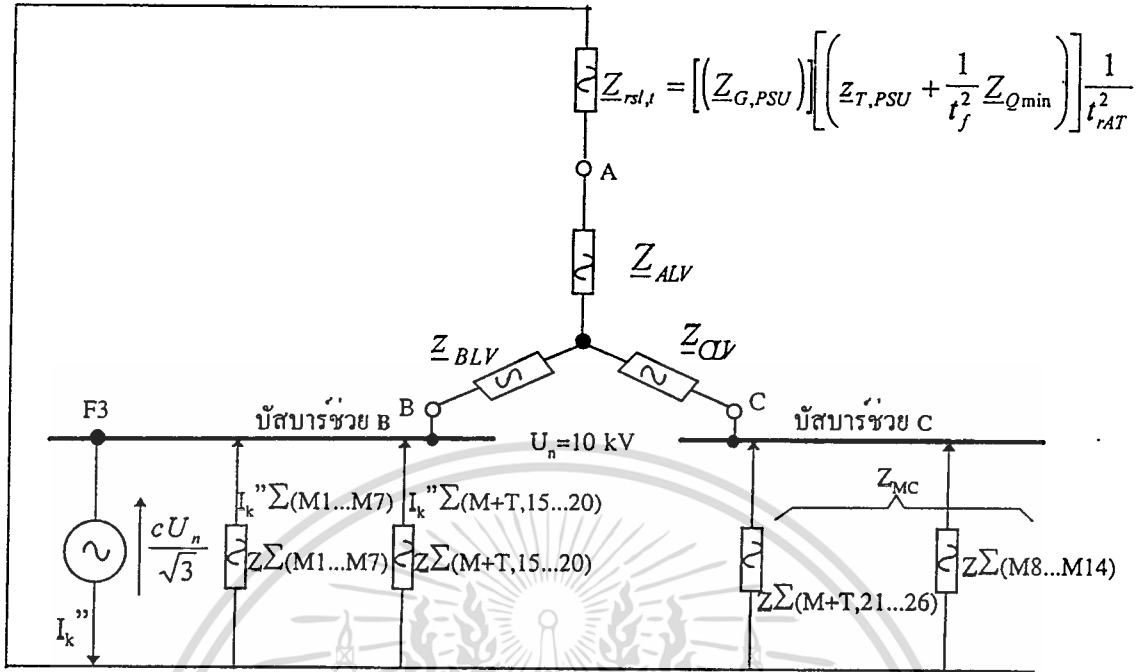
$$i_p = 1.15 \chi_{AT} \sqrt{2} I_{kAT}'' + \chi_{\Sigma(M1..M7)} \sqrt{2} I_{k\Sigma(M1..M7)}'' + \chi_{\Sigma(M+T,15..20)} \sqrt{2} I_{k\Sigma(M+T,15..20)}''$$

$$i_p = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 18.46kA + 1.732 \cdot \sqrt{2} \cdot 8.124kA + 1.34 \sqrt{2} \cdot 2.264kA = 76.30kA$$

หาค่า  $I_b$  ได้จาก

$$I_{b\Sigma(M+T,15..20)} = \mu q I_{k\Sigma(M+T,15..20)}'' = 0.77 * 0.342 * 2.264kA = 0.60kA$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงวงจรสมมูลลำดับบวกสำหรับคำนวณค่า  $I_k''$  ที่ตำแหน่ง F3

การคำนวณหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน ANSI/IEEE C37.010-1979

จะกำหนดให้ค่า  $S_{base} = 100 \text{ MVA}$

$V_{base} =$  แรงดันปกติ(Nominal Voltage) ที่บัสนั้นๆ

$$I_{base-at-F1} = \frac{100 * 1000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 220 \text{ kV}} = 263 \text{ A.}$$

$$I_{base-at-F2} = \frac{100 * 1000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 21 \text{ kV}} = 2750 \text{ A.}$$

$$I_{base-at-F3} = \frac{100 * 1000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 10 \text{ kV}} = 5774 \text{ A.}$$

## 1. ระบบไฟฟ้า

$$Z_b = \frac{kV_b^2}{MVA_b} = \frac{220^2}{100} = 484 \Omega$$

$$X_Q = \frac{6.622}{484} = 0.01368 \text{ P.U.}$$

$$R_Q = \frac{0.6622}{484} = 0.001368 \text{ P.U.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อมที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้งเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. หม้อแปลง T

$$Z_{b(LV)} = \frac{kV_b^2}{MVA_b} = \frac{21^2}{100} = 4.41\Omega$$

$$X_T = \frac{0.2646}{4.41} = 0.06 P.U.$$

$$R_T = \frac{0.00367}{4.41} = 0.000832 P.U.$$

## 3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า G

$$X_G = \frac{0.2982}{4.41} = 0.06762 P.U.$$

$$R_G = \frac{0.0149}{4.41} = 0.003378 P.U.$$

## 4. หม้อแปลงไฟฟ้าช่วย AT

$$Z_{b(A)} = \frac{kV_b^2}{MVA_b} = \frac{21^2}{100} = 4.41\Omega$$

$$Z_{b(B)} = Z_{b(C)} = \frac{kV_b^2}{MVA_b} = \frac{10.5^2}{100} = 1.1025\Omega$$

$$X_A = \frac{0.0882}{4.41} = 0.02 P.U.$$

$$R_A = \frac{0.00141}{4.41} = 0.00031973 P.U.$$

$$X_B = X_C = \frac{0.2865}{1.1025} = 0.259864 P.U.$$

$$R_B = R_C = \frac{0.0101}{1.1025} = 0.009161 P.U.$$

## 5. หม้อแปลง T15-T19, T21-T25

$$Z_{b(HV)} = \frac{kV_b^2}{MVA_b} = \frac{10^2}{100} = 1\Omega$$

$$X_{Tn} = \frac{2.3704}{1} = 2.3704 P.U.$$

$$R_{Tn} = \frac{0.367}{1} = 0.376 P.U.$$

## 6. หม้อแปลง T20, T26

$$X_{Tn} = \frac{3.694}{1} = 3.694 P.U.$$

$$R_{Tn} = \frac{0.6445}{1} = 0.6445 P.U.$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7. บัสบาร์ช่วย B และ C

$$X_B = \frac{2.424}{1} = 2.424 P.U.$$

$$R_B = \frac{0.424}{1} = 0.424 P.U.$$

$$X_C = \frac{3.27}{1} = 3.27 P.U.$$

$$R_C = \frac{0.626}{1} = 0.626 P.U.$$

## 8. มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (Asynchronous Motors) M15-M19, M21-M25 มีค่า 0.9 MW = 1207 Hp.

$$Z_b = \frac{kV_b^2}{MVA_b} = \frac{0.66^2}{100} = 0.004356 \Omega$$

$$X_d'' = \frac{0.0643}{0.004356} = 14.7612 P.U.$$

$$X_M = 1.0 X_d'' = 14.712 P.U.$$

$$\text{กรณีโมเมนตารีคิวตี้} : R_M = 14.712 * 0.42 = 6.17904 P.U.$$

$$X_M = 1.5 X_d'' = 22.1418 P.U.$$

$$\text{กรณีอินเตอร์รับตั้งคิวตี้} : R_M = 22.1418 * 0.42 = 9.299556 P.U.$$

## 9. มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ M20, M26 มีค่า 1.0 MW = 1341 Hp.

$$Z_b = \frac{kV_b^2}{MVA_b} = \frac{0.4^2}{100} = 0.0016 \Omega$$

$$X_d'' = \frac{0.0192}{0.0016} = 12 P.U.$$

$$X_M = 1.0 X_d'' = 12 P.U.$$

$$\text{กรณีโมเมนตารีคิวตี้} : R_M = 12 * 0.42 = 5.04 P.U.$$

$$X_M = 1.5 X_d'' = 18 P.U.$$

$$\text{กรณีอินเตอร์รับตั้งคิวตี้} : R_M = 18 * 0.42 = 7.56 P.U.$$

## 10. มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ M1-M14

$$Z_b = \frac{kV_b^2}{MVA_b} = \frac{10^2}{100} = 1 \Omega$$

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14
P(Hp.)	9116	4156	2011	939	711	2681	2293	6837	4756	2011	2480	939	711	2681
มอเตอร์	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1
$\Sigma X_d''$	0.8	6.5	3.3	28.6	8.33	9.9	2.9	4.1	6.5	3.5	10.9	7.2	8.3	10.1
โมเมนตารี														

เอกสารที่ส่งไว้ทั้งหมดนี้เป็นการใช้เอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$X_M$	0.8	6.5	3.5	34.3	10.0	9.9	2.9	4.1	6.5	3.5	10.9	8.6	10	10
$R_M$	0.07	0.07	0.35	3.4	1	0.99	0.3	0.4	0.56	0.35	1	0.9	1	1
อินเตอร์รับตั้ง														
$X_M$	1.2	9.8	5.3	102	30	14	4.4	6.2	9.7	5.2	16.4	25.9	30	15
$R_M$	0.12	0.98	0.53	10.2	3	1.4	0.44	0.62	0.97	0.52	0.16	0.26	0.3	0.15

ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ M1-M14

พิจารณาความผิดปกติที่ F1 :

โมเมนตารีคิวตี้

$$I_k'' = 263 * \frac{1}{0.0123} = 21.41 kA.$$

$$i_p = 2.7 * 21.41 = 58.70 kA.$$

$$\frac{X_1}{R_1} = \frac{0.0123}{0.00103} = 11.97$$

อินเตอร์รับตั้งคิวตี้

$$I_b = 263 * \frac{1}{0.012334} = 21.32 kA.$$

$$\frac{X_1}{R_1} = \frac{0.012334}{0.00103025} = 11.97$$

พิจารณาความผิดปกติที่ F2 :

โมเมนตารีคิวตี้

$$I_k'' = 2750 * \frac{1}{0.034586} = 79.51 kA.$$

$$i_p = 2.7 * 79.51 = 214.68 kA.$$

$$\frac{X_1}{R_1} = \frac{0.034586}{0.00132615} = 26.08$$

อินเตอร์รับตั้งคิวตี้

$$I_b = 2750 * \frac{1}{0.0346295} = 79.41 kA.$$

$$\frac{X_1}{R_1} = \frac{0.03462967}{0.00132649} = 21.11$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาความผิดปกติที่ F3 :

โมเมนตารีคิวดี้

$$I_k'' = 5774 * \frac{1}{0.1719} = 33.59 \text{ kA.}$$

$$i_p = 2.7 * 33.59 = 90.69 \text{ kA.}$$

$$\frac{X_1}{R_1} = \frac{0.1719}{0.0086} = 19.98$$

อินเตอร์รับตั้งคิวดี้

$$I_b = 5774 * \frac{1}{0.2037} = 28.34 \text{ kA.}$$

$$\frac{X_1}{R_1} = \frac{0.2037}{0.00926} = 21.98$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า

#### 5.1 อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า(Protection Devices)

หมายถึง อุปกรณ์ที่สามารถรับรู้การเกิดการผิดปกติ และสามารถแก้ปัญหาเมื่อเกิดการผิดปกติแล้วได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งขึ้นอยู่กับการศึกษาและประสบการณ์ในการที่จะเลือกใช้อุปกรณ์ดังกล่าว ในการออกแบบระบบไฟฟ้านั้น สิ่งที่ต้องการ คือ ให้ระบบสามารถที่จะทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยจะต้องมีพลังงานไฟฟ้าพร้อมที่จะจ่ายให้แก่เครื่องมือ และอุปกรณ์ทางไฟฟ้าได้ตลอดเวลา ดังนั้นความน่าเชื่อถือ(Reliability)จึงเป็นสิ่งสำคัญที่สุด ถ้าในระบบเกิดกระแสที่มีขนาดมากกว่าปกติ หรือกระแสเกิน(Over Current)ขึ้น ย่อมจะเกิดจากหลายสาเหตุด้วยกัน และอาจจะมีกระแสมากกว่า 100 kA ก็ได้ แต่นิยมแบ่งสาเหตุของการเกิดกระแสเกิน ดังนี้

1. โหลดเกิน(Overload)
2. ลัดวงจร(Short Circuit)

ดังนั้นเมื่อมีกระแสเกินเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า จะต้องมียุติกรณ์ที่จะสามารถเปิดวงจรออก แต่ต้องเปิดวงจรเฉพาะส่วนที่จำเป็นและน้อยที่สุด แต่มีความปลอดภัยมากที่สุด เพื่อที่จะให้อุปกรณ์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดกระแสเกินมีพลังงานไฟฟ้าใช้ต่อไปได้

โหลดเกิน หมายถึง กระแสที่มีมากกว่ากระแสปกติ และถ้ากระแสไหลผ่านในระบบไฟฟ้านานๆ ย่อมจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างมาก ซึ่งจะเป็อันตรายต่อระบบไฟฟ้า จึงต้องมีอุปกรณ์มาตัดวงจรเมื่อมีกระแสเกินที่เป็นผลมาจากโหลดเกินไหลผ่าน อุปกรณ์นี้คืออุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน(Over Current Protection Devices) โดยปกติแล้วกระแสเกินจะมีขนาดไม่เกิน 5-6 เท่าของกระแสปกติ เพราะว่าถ้าเกินมากกว่านี้ก็จะอาจจะกล่าวได้ว่าเป็นกระแสเกินที่เกิดจากการลัดวงจร

ลัดวงจร หมายถึง กระแสที่แตกต่างจากกระแสปกติ จะมีขนาดเป็นพันเท่าของกระแสปกติ

การทำงานร่วมกัน(Coordination) หมายถึง เมื่อเกิดการผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ป้องกันตัวที่ใกล้จุดที่เกิดการผิดปกติมากที่สุดจะต้องทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และต้องทำงานก่อนอุปกรณ์ป้องกันตัวอื่นๆ

หลักการทั่วไปของการทำงานร่วมกัน

1. ให้อุปกรณ์ป้องกันตัวที่ใกล้จุดที่เกิดการผิดปกติมากที่สุดทำงานก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของกรมการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 2. เมื่ออุปกรณ์ดังกล่าวทำงานแล้ว อุปกรณ์ป้องกันตัวอื่นไม่ควรทำงานไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ให้มีความต่อเนื่องของระบบไฟฟ้ามากที่สุด กล่าวคือ ไม่ควรให้อุปกรณ์ป้องกันตัดไฟฟ้า ออกจากระบบบ่อยเกินความจำเป็น และไม่ควรให้โหลดขาดไฟฟ้าเป็นบริเวณกว้าง

4. เมื่อทำการโคออดิเนท(Coordinate)แล้ว กราฟที่ได้จากการโคออดิเนทไม่ควรตัดกัน

5. เมื่ออุปกรณ์ป้องกันตัวที่ใกล้จุดที่เกิดการผิดปกติมากที่สุดไม่ทำงานเนื่องจากความผิดปกติภายในตัวอุปกรณ์ อุปกรณ์ป้องกันตัวถัดไปต้องทำงานแทนโดยเป็นแบ็คอัพ(Back up)ให้กับตัวแรก ซึ่งทำได้โดยการตั้งเวลาเซฟตี้มาร์จิน(Safety Margin)

6. การทำงานควรเป็นไปอย่างอัตโนมัติ

ชนิดของอุปกรณ์ป้องกัน

1. เซอร์กิตเบรกเกอร์

2. ฟิวส์

## 5.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์

### 5.2.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับระบบแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่า 600 V

สามารถแบ่งเป็น 4 ชนิด คือ

1. เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบอากาศ(Air Breaker)

2. เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบสุญญากาศ(Vacuum Breaker)

3. เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบน้ำมัน(Oil Breaker)

4. เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบใช้ก๊าซเติม(Gas-filled Breaker)

เซอร์กิตเบรกเกอร์เหล่านี้จะใช้ร่วมกับรีเลย์ป้องกัน เพื่อให้การทำงานเป็นไปอย่างอัตโนมัติ เพราะโดยปกติแล้วจะไม่มีอุปกรณ์ป้องกันใด ที่จะสามารถรับรู้ถึงการเกินของกระแสในตัวมันเองได้ แต่จะมีเครื่องมือหรืออุปกรณ์บางอย่างเป็นตัวทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ตัดวงจรออกไปเมื่ออยู่ในสภาพผิดปกติ

5.2.1.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบอากาศ มักใช้ติดตั้งในอาคาร โดยอาศัยอากาศเป็นตัวดับประกายการอาร์กที่เกิดขึ้นที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งยังใช้กันอย่างกว้างขวางกับการติดตั้งภายนอกที่มีชุดควบคุม สวิตช์เกียร์(Switch Gear) และอื่นๆ โดยปกติจะบรรจุอยู่ในเอนโคลอสเซอร์(Enclosure)อย่างมิดชิด เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้ปกติจะใช้กับระบบแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 2400-34500 V ขึ้นส่วนต่างๆที่ประกอบขึ้นเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้ จะถูกปกปิดไว้ในเอนโคลอสเซอร์อย่างดี เพื่อป้องกันการสัมผัสจากผู้ใช้งาน ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบสุญญากาศ เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้จะอาศัยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสสาร คือ ตัวนำที่ติดจะต้องมีอิเล็กตรอนอิสระ(Free Electron)มาก และฉนวนจะต้องมีอิเล็กตรอนอิสระน้อย หรือไม่มีเลย ดังนั้นถ้าหน้าสัมผัสมีการปิดหรือเปิดวงจรการอาร์กก็จะเกิดขึ้น แต่ปัญหานี้สามารถแก้ได้ถ้าให้หน้าสัมผัสทำงานในห้องสุญญากาศ(Vacuum Chamber) และยังไม่ค่อยมีเสียงดังในขณะที่ทำงานอีกด้วย จึงทำให้อายุการใช้งานของหน้าสัมผัสยาวออกไป และช่วยกำจัดการระเบิดของก๊าซ หรือของเหลวได้ด้วย

5.2.1.3 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบน้ำมัน เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้สามารถใช้ภายในอาคารได้ แต่ส่วนมากแล้ว ภายในอาคารมักใช้แบบระบบอากาศ เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบน้ำมันนี้จะใช้กับระบบที่มีแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 14,400V และใช้กับงานภายนอกอย่างกว้างขวาง

5.2.1.4 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบใช้ก๊าซเดิม ส่วนมากจะใช้กับระบบที่มีแรงดันไฟฟ้าสูง และระบบแรงดันไฟฟ้าสูงพิเศษ(EHV.) ใช้ก๊าซเฉื่อยเป็นตัวดับอาร์ก เช่น SF<sub>6</sub>

5.2.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับระบบแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่า 600 V .

สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

5.2.2.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดอากาศ(Air Circuit Breaker:ACB) ส่วนมากแล้วจะใช้เป็นตัวป้องกันสำหรับสายเมนทั้งหมด จะมีขนาดการทนต่อกระแสตัดวงจรสูง ส่วนอุปกรณ์เปิดวงจรที่บรรจุอยู่ภายใน หรืออุปกรณ์ตัดกระแสที่สร้างขึ้นมานั้นจะออกแบบมาเพื่อให้ตัดไฟออกได้อย่างถูกต้องตามคุณลักษณะที่ต้องการ เช่น อาจจะให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้ทำงานแบบหน่วงเวลานาน หน่วงเวลาสั้น หรือเปิดวงจรทันทีทันใดก็ได้ นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีชนิดที่สามารถถอดเปลี่ยนได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกว่า ชนิดครอว์เอาท์(Draw-out Type)

5.2.2.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดโมลด์เคส(Molded Case Circuit Breaker:MCCB) จะพบบ่อยในส่วนของ การป้องกันสายป้อนทุติยภูมิ วงจรย่อย หรือระบบเมนใหญ่ แต่กระแสผิดพลาดที่เกิดขึ้นต้องไม่สูงมากเกินไปนัก กลไกทางกลของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบนี้จะบรรจุอยู่ในกล่องที่หล่อออกมาตามลักษณะการใช้งาน การปรับตั้งการทำงานส่วนมากจะถูกปรับตั้งจากผู้ผลิต ส่วนประกอบที่สำคัญของเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้ คือ อุปกรณ์ชุดเปิดวงจร(Trip Elements) ชุดทำงานทางด้านกล(Operating Mechanism) และชุดที่สามารถจะดับอาร์กได้(Arc Extinguisher) ทั้งสามส่วนจะถูกบรรจุอยู่ในกล่องขึ้นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.3 คุณสมบัติประจำตัวของเซอร์กิตเบรกเกอร์

1. กระแสที่ทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงาน หรือกระแสฟิสิกซ์(Pickup Current) หมายถึง ค่าการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ซึ่งจะสัมพันธ์กับกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านชุดคอยล์สนามแม่เหล็ก(Magnetic Coil) และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในชุดคอยล์ก็จะทำให้เกิดการเปิดวงจรออกได้ กระแสฟิสิกซ์นี้ปกติแล้วจะมีการปรับค่าได้

2. การเปิดวงจรทันทีทันใด เป็นค่าเวลาในการที่เซอร์กิตเบรกเกอร์จะเปิดวงจรโดยไม่มี การหน่วงเวลาเลย

3. ชอร์ตทไทม์ฟิสิกซ์(Short Time Pickup) หมายถึง ค่าของกระแสที่จุดเริ่มต้นของการหน่วง เวลาสั้น

4. อันแลทซ์ไทม์(Unlatching Time) หมายถึง เมื่อมีกระแสผิดปกติเกิดขึ้น เซอร์กิตเบรก เภอร์พร้อมที่จะทำงานจนถึงเวลาสิ้นสุดของอันแลทซ์ไทม์

5. ค่าอินเตอร์รัปต์ติงคาปาซิตี(Interrupting Capacity)ของอุปกรณ์ป้องกัน หมายถึง ค่ากระแส หรือโวลต์แอมแปร์สูงสุดในขณะเริ่มเกิดอาร์กที่อินเตอร์รัปเตอร์(Interrupter) โดยที่อินเตอร์รัปเตอร์ จะสามารถทำงานตัดวงจรได้โดยไม่เกิดการชำรุดเสียหาย

## 5.3 อุปกรณ์ป้องกันแรงต่ำที่ควรรู้จัก

### 5.3.1 โมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Molded Case Circuit Breakers)

เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดดับด้วยอากาศ ซึ่งออกแบบให้ใช้งานได้โดยไม่ต้องบำรุงรักษา โดยมีตัวยึดและตัวดึงเป็นฉนวนหล่อขึ้นรูปไว้เป็นส่วนเดียวกันหมด ปกติจะตัดกระแสโดยใช้ อุปกรณ์เทอร์มอลแมกเนติก(Thermal Magnetic)อยู่ในตัว แต่ปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะพัฒนาไปสู่การใช้โซลิดสเตททริป(Solid State Trip)มากขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่พิกัดสูงๆ

ก. อุปกรณ์ทริป(Tripping Devices)

ข. ตัวดับอาร์ก(Arc Chute) ในขณะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดกระแส โดยเฉพาะที่กระแสสูงๆ จะมีอาร์ก ซึ่งเป็นก๊าซร้อนเกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องขจัดอาร์กนี้ออกไปเพื่อมิให้เกิดอันตรายแก่ตัว เซอร์กิตเบรกเกอร์เอง และต่อสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยห้องดับอาร์กจะทำหน้าที่ช่วยดับอาร์ก

ค. เทอร์มินอล(Terminal) จะต้องระบุไว้สายประเภทอะไร ทองแดงหรืออลูมิเนียม และการเลือกสายจะต้องระวังไม่ให้เกินขีดจำกัดการเพิ่มของอุณหภูมิของเทอร์มินอลด้วย

ง. อุปกรณ์ช่วยเหลือเพิ่มเติมอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชันท์ทริป(Shunt Trip)มีไว้เพื่อเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์จากตำแหน่งอื่นๆ ทำงานโดยเมื่อขดลวดชันท์ทริปได้รับการกระตุ้น ก็จะกระตุ้นกระดิ่งให้คันกลไกการทริปของเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้ทำงาน การกระตุ้นขดลวดชันท์ทริปอาจใช้แรงดันกระแสตรง 12-250 V หรือแรงดันกระแสสลับ 110-600 V ซึ่งต้องกำหนดลงไปนในรายละเอียดที่เฉพาะเจาะจงที่จะใช้

- อะลาร์มสวิตช์ (Alarm Switch) มีเพื่อแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนเมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงาน (ไม่ทำงานเมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจรโดยการสั่งงานจากมนุษย์)

- ออกซิเลียร์สวิตช์ (Auxiliary Switch) มีเพื่อแสดงตำแหน่งการทำงาน(Close-Open)ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ระยะไกล เพื่ออินเตอร์ล็อก(Interlock)ทางไฟฟ้า ฯลฯ

- อันเดอร์โวลต์เตททริป (Undervoltage Trip) ใช้เพื่อเปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อแรงดันต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ อาจเป็นระหว่าง 30-70% อันเดอร์โวลต์เตททริปมีหลักการการทำงาน คือ เมื่อแรงดันลดลงจากค่าที่ตั้งไว้ แรงจากขดลวดที่ด้านอัดสปริงไว้จะน้อยกว่า ทำให้มีแรงกระตุ้นกลไกทางกลของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังนั้นความเที่ยงตรงของอันเดอร์โวลต์เตททริปจะไม่ค่อยดี ถ้าต้องการความเที่ยงตรงมากๆ ควรใช้อันเดอร์โวลต์เตททริลีส

### 5.3.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบจำกัดกระแส

เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบจำกัดกระแสจะตัดก่อนที่กระแสจะถึงจุดสูงสุด(Peak) นั่นคือ ตัดภายในไซเคิลแรกของกระแสลัดวงจร

### 5.3.3 ตัวป้องกันมอเตอร์ชนิดตัดวงจรทันที (Instantaneous Motor-circuit Protectors)

เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดเทอร์มอลแมกเนติก โดยทั่วไปจะป้องกันวงจรมอเตอร์ได้ไม่ดี เนื่องจากในขณะที่มอเตอร์เริ่มเดินเครื่องจะมีกระแสสูง จึงมักจะต้องใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์พิักสูงกว่าเพื่อที่จะป้องกันกระแสเกินในสายหรือมอเตอร์ได้ การใช้คู่ออลิเมนต์(Dual-element), พิวด์ส่น่วงเวลาจะป้องกันวงจรมอเตอร์ได้ดีกว่า แต่มีข้อเสียคือ พิวด์สอาจขาดเพียงเส้นเดียว ทำให้มอเตอร์ทำงานไม่ครบเฟส ปัจจุบันจึงมีการผลิตเซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับป้องกันวงจรมอเตอร์ขึ้น โดยใช้โมดเคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ไม่มีเทอร์มอลทริปปิง (Thermal Tripping) คงมีเฉพาะ แมกเนติกทริปปิง(Magnetic Tripping) กล่าวคือ จะตัดเฉพาะกระแสลัดวงจร ไม่ตัดกระแสเกิน

อย่างไรก็ตามเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้จะใช้ได้เฉพาะกับวงจรมอเตอร์ที่มีสตาร์ทเตอร์ (Starter)ประกอบด้วย โอเวอร์โหลดรีเลย์(Overload Relay)รวมอยู่ในตัวควบคุมแล้วเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.3.4 โซลิตสเทททริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Solid-state Trip Circuit Breakers)

ปัจจุบันเซอร์กิตเบรกเกอร์ มีแนวโน้มจะพัฒนามาทางด้านโซลิตสเททมากขึ้นเนื่องจากสามารถปรับปรุงให้มีการใช้งานได้หลากหลายกว่า โซลิตสเทททริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยทั่วไปจะประกอบด้วย

- อุปกรณ์ดักจับกระแส ซึ่งทำหน้าที่คล้ายหม้อแปลงกระแส(CT)ป้อนเข้าสู่หน่วยการทริป (Tripping Unit) แต่ต่างกันที่หม้อแปลงกระแสจะแปลงในสัดส่วนที่คงที่ เช่น 2000/5 A แต่ อุปกรณ์ดักจับกระแสจะแปลงด้วยสัดส่วนไม่คงที่ แต่จะให้แรงดันเอาต์พุตที่เหมาะสมกับหน่วยการทริป

- หน่วยการทริปที่แปลงเส้นแรงแม่เหล็ก(Flux Transfer Shunt Trip) จะทำหน้าที่ให้อุปกรณ์ดักจับกระแสสามารถเปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าด้านสายส่งที่ขณะเกิดกระแสลัดวงจรอาจมีค่าต่ำมาก

#### 5.3.5 เพาเวอร์แอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Power Air Circuit Breakers:ACBs)

เพาเวอร์แอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์แตกต่างจากโมลคอสเซอร์กิตเบรกเกอร์ตรงที่ว่า เพาเวอร์แอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์จะมีตัวถังเป็นโลหะ มีความแข็งแรงกว่า สามารถทนกระแสลัดวงจรในช่วงเวลาสั้นได้ดี มีขนาดและน้ำหนักมากกว่า มีราคาแพงกว่าโมลคอสเซอร์กิตเบรกเกอร์ สามารถถอดเป็นชิ้นๆเพื่อการบำรุงรักษาและเปลี่ยนได้

เพาเวอร์แอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์เหมาะกับการใช้งานหนัก(Heavy Duty) เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรม หรือระบบไฟฟ้าที่ต้องการมีซีเลกติวิตี(Selectivity)เมื่อเกิดการผิดปกติทางไฟฟ้า

#### 5.3.6 ฟิวส์แรงดันต่ำ (Low-voltage Fuses)

แต่เดิมฟิวส์ทำด้วยทองแดงต่อระหว่างขั้วสาย เมื่อกระแสเกิน ลวดทองแดงดังกล่าวก็จะร้อนจนหลอมละลาย และตัดวงจรไปในที่สุด ต่อมาลวดทองแดงถูกแทนที่ด้วยตะกั่วซึ่งดีกว่าเนื่องจากมีจุดหลอมละลายต่ำกว่า ต่อมาได้มีการหุ้มฟิวส์เพื่อป้องกันการกระเด็นขณะตัดวงจร ต่อมา มีการนำแถบสังกะสีมาใช้ เนื่องจากมีความเที่ยงตรงในการวัดค่ากระแสตัดวงจรได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังละลายที่อุณหภูมิไม่สูงมาก ทำให้ฟิวส์ทำงานที่อุณหภูมิไม่สูง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันจะพบฟิวส์ที่ทำด้วยทองแดง สังกะสี หรือเงิน รูปแบบต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 ฟิวส์

ในภาวะที่ฟิวส์รับกระแสไม่เกินพิกัดกระแสปกติ ฟิวส์จะถูกออกแบบให้มีการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นได้อย่างเพียงพอก่อนที่จะถึงอุณหภูมิที่ฟิวส์จะละลาย แต่หากฟิวส์ต้องรับกระแสสูงกว่าพิกัด อุณหภูมิของฟิวส์จะสูงขึ้นเรื่อยๆ ฟิวส์จะยิ่งละลายเร็ว ในขณะที่ส่วนที่เป็นโลหะของฟิวส์หลอมละลาย บางส่วนจะหลุดลง บางส่วนก็ระเหยไป ทำให้เกิดอาร์กคร่อมช่องว่าง และอาร์กนี้เองจะช่วยเผาไหม้ให้ฟิวส์ละลายเร็วขึ้น จนกระทั่งตัวกลางรอบข้างซึ่งอาจจะเป็นอากาศหรือวัสดุผุกรอบข้าง สามารถทำให้อาร์กเย็นและดับอาร์กได้ จากหลักการนี้เองที่ทำให้ฟิวส์สามารถตัดกระแสลัดวงจรขนาดสูงมากๆ ได้ ปัจจุบันฟิวส์ที่ใช้ตัดกระแสสูงมากๆ จะมีลักษณะยาว และมีส่วนที่แคบมากขึ้น

เมื่อเกิดกระแสเกินเล็กน้อย ส่วนที่แคบอันใดอันหนึ่ง (โดยมากมักจะเป็นส่วนตรงกลาง เนื่องจากไกลจากปลายฮีทซิงค์(Heat Sink)มากที่สุด)จะละลาย และเกิดช่องว่างเพียงพอที่จะดับอาร์ก และตัดกระแสได้ แต่หากเกิดกระแสลัดวงจรขนาดสูงมาก กระแสนั้นอาจยังไม่ถูกตัดจนกว่าจุดแคบหลายจุดที่อนุกรมกันอยู่จะละลาย ซึ่งจะทำให้เกิดอาร์กหลายจุดด้วย ในขณะที่เกิดลัดวงจรสูงสุด จุดแคบทุกจุดอาจจะละลายและเกิดอาร์ก ทำให้เกิดความต้านทานสูงพอที่จะดับอาร์กและตัดกระแสได้ แต่หากเกิดกระแสลัดวงจรขนาดเกินพิกัดของฟิวส์ อาร์กจะมีพลังงานสูงมากจนฟิวส์ไม่สามารถดับอาร์กและตัดกระแสได้ ส่วนที่เป็นโลหะจะหลอมละลายอย่างรวดเร็ว จนอาจทำให้ฟิวส์เกิดการระเบิดได้

### 5.4.1 ฟิวส์แบบจำกัดกระแส (Current-limiting Fuses)

ฟิวส์แบบจำกัดกระแสใช้โลหะเงินบริสุทธิ์ 1 อันหรือมากกว่าเป็นฟิวส์ลิงค์(Fuse Link) เชื่อมระหว่างปลาย แต่เนื่องจากโลหะเงินมีราคาแพง ปัจจุบันจึงมีการสำรวจเพื่อจะนำโลหะอื่นมาใช้แทน ภายในกระบอกฟิวส์จะใส่ด้วยทรายซิลิกาควอทซ์อย่างละเอียดจนเต็มไม่ให้มีช่องว่าง เมื่อฟิวส์แต่ละเส้นขาด ความร้อนจากอาร์กจะถูกดูดกลืนโดยทรายนี้

อย่างไรก็ตามในการตัดกระแสเกิน โลหะเงินมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง คือประมาณ 961 องศาเซลเซียส ดังนั้นถ้าไม่มีการตัดแปลงบางอย่าง อุณหภูมิของฟิวส์ขณะตัดกระแสเกินจะมีค่าสูงมากจนอาจทำความเสียหายให้แก่อุปกรณ์ประกอบข้างเคียงได้ ดังนั้นจึงมีการทำปุ่มตะกั่วที่มีจุดหลอมละลายต่ำ สอดแทรกเข้าไปในแต่ละชั้นของฟิวส์ลิงค์ ในช่วงกระแสเกิน วัสดุนี้จะละลายก่อนฟิวส์ลิงค์ส่วนอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4.2 ฟิวส์แบบหน่วงเวลา (Time-delay Fuses)

ปัจจุบันฟิวส์แบบหน่วงเวลาเกือบทั้งหมดเป็นชนิดจำกัดกระแส แต่ไม่มีปุ่มตะกั่วเนื่องจากในการตัดกระแสเกินจะใช้สารหน่วงเวลาเป็นผู้ตัดกระแส สารหน่วงเวลาของฟิวส์จะหน่วงเวลาการตัดกระแสที่ 500% ของพิกัดไว้อย่างน้อย 10 วินาที โดยมีหลักการทำงานแบ่งเป็น 3 แบบดังนี้คือ

ก. ใช้สปริงง้างไว้ และยึดโดยใช้ตะกั่ว เมื่อเกิดกระแสเกิน ตะกั่วจะหลอมละลาย สปริงก็จะหลุดจากที่ยึดและตัดวงจร

ข. ใช้สารผสมซึ่งมีคุณสมบัติคงเคมเสมอ คือ ไม่อ่อนตัวและละลายอย่างช้าๆ เมื่ออุณหภูมิสูงถึงจุดหลอมละลาย ก็จะละลายอย่างรวดเร็วและตัดวงจร

ค. บางผู้ผลิตใช้วิธีเคลือบชิลด์ฟิวส์ลิงค์(Shield Fuse Link)ไว้เพื่อกันการระบายความร้อน ดังนั้นในช่วงกระแสเกิน จะเกิดความร้อนขึ้นมากจนกระทั่งฟิวส์ขาด

#### 5.4.3 กราฟฟิวส์ (Fuse Curves)

โดยทั่วไปผู้ผลิตจะจัดเตรียมข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการเลือกใช้ฟิวส์ดังต่อไปนี้คือ

ก. กราฟกระแส-เวลา โดยปกติจะเป็นกราฟเวลาการหลอมละลายโดยเฉลี่ย ไม่ใช่กราฟเวลาการเคลียร์(Clear)ทั้งหมด(ผลรวมของเวลาการหลอมและเวลาอาร์ก) ในภาวะกระแสเกิน เวลาการหลอมจะมีค่าประมาณหลายวินาที และเวลาอาร์กจะมีค่าประมาณ 0.1 วินาทีซึ่งสามารถตัดทิ้งได้เมื่อกระแสลัดวงจรมากขึ้น เวลาหลอมและเวลาอาร์กจะลดลงด้วย ในทางปฏิบัติค่าเวลาอาร์กสามารถตัดทิ้งได้ เมื่อค่าเวลาหลอมเกิน 0.1 วินาที

ข. กราฟการจำกัดกระแส จะบอกให้ทราบค่าเวลาเล็ททรู(Let Through Time)สูงสุดทันทีทันใดสำหรับฟิวส์นั้น ที่ค่ากระแสลัดวงจรค่าต่างๆ กราฟการจำกัดกระแสนี้จะบอกให้เราทราบว่าเมื่อไหร่ฟิวส์นั้นจะแปรสภาพเป็นการจำกัดกระแส ดังนั้นถ้าเราทราบค่าการทนจุดสูงสุดของอุปกรณ์ในระบบ เราก็สามารถจำกัดกระแสลัดวงจรให้สามารถป้องกันอุปกรณ์ได้อย่างปลอดภัย

ค. ข้อมูลค่า  $I^2t$  เป็นค่ากราฟ แต่ผู้ผลิตบางรายก็บอกค่า  $I^2t$  ในตาราง เพื่อที่จะนำค่านี้ไปใช้ได้อย่างสมบูรณ์ ข้อมูลจะต้องทราบทั้ง  $I^2t$  เล็ททรู และ  $I^2t$  ทำลาย(Damage) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า  $I^2t$  หลอมละลาย(Melting)

### 5.5 รีเลย์ป้องกัน

เป็นอุปกรณ์ที่จะทำงานก็คือเมื่อมีสัญญาณมากระตุ้น สัญญาณดังกล่าวได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า หรือทั้งสองอย่าง โครงสร้างของรีเลย์ประกอบด้วย ชุดของหน้าสัมผัสและชุดที่ทำให้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีเลย์ทำงาน โดยชุดที่ทำให้รีเลย์ทำงานนั้นจะได้รับสัญญาณจากชุดภาครับในระบบไฟฟ้า ชุดภาครับดังกล่าวอาจจะเป็นหม้อแปลงกระแสหรือหม้อแปลงแรงดัน หรือทั้งสอง หลังจากนั้นเมื่อรีเลย์ทำงานก็จะทำให้หน้าสัมผัสเปิดหรือปิดวงจรต่อไป การทำงานของรีเลย์ดังกล่าวมาแล้วนี้ยังไม่อาจตัดวงจรไฟฟ้าออกได้ จะต้องใช้ประกอบกับเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อตัดระบบไฟฟ้าส่วนที่มีปัญหาออกไป

พื้นฐานการทำงานของรีเลย์มี 3 อย่าง คือ

1. มีความไวต่อผลที่เกิดขึ้น (Sensitivity)
2. สามารถจะมีการทำงานร่วมกับอุปกรณ์ป้องกันตัวอื่นๆ (Selectivity)
3. มีความเร็วในการเปิดวงจร (Speed)

วันไลน์ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าจะแสดงถึง

1. ตำแหน่งและหน้าที่ของอุปกรณ์ป้องกันแต่ละตัว เช่น ฟิวส์ รีเลย์ และอุปกรณ์เปิดวงจร

ชนิดทำงานโดยตรง เป็นต้น

2. กำลังงานปรากฏ (Apparent Power) พิกัดแรงดันค่าอิมพีแดนซ์ ค่าพิกัดของหม้อแปลง เป็นต้น

3. ชนิด ผู้ผลิต และอัตราส่วนรอบของหม้อแปลงทุกตัวที่จะใช้ร่วมกับรีเลย์

4. แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร อันได้แก่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ซิงโครไนสมอเตอร์ และมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ

5. อุปกรณ์ที่ใช้ทุกตัว เช่น หม้อแปลง สายเคเบิล เซอร์กิตเบรกเกอร์ ฟิวส์ รีแอกเตอร์

6. อุปกรณ์ฉุกเฉิน

7. ค่ากระแสเวลาของรีเลย์และอุปกรณ์ป้องกันตัวอื่นๆ

8. แผ่นป้ายประจำเครื่อง ซึ่งจะแสดงพิกัดของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อิมพีแดนซ์ไดอะแกรม จะแสดงถึง

1. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply)
2. อิมพีแดนซ์ของบัส (Bus Impedance)
3. หม้อแปลงและ/หรืออิมพีแดนซ์ของรีแอกเตอร์
4. อิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล
5. ระดับแรงดันไฟฟ้า

โดยปกติแล้ว เซอร์กิตเบรกเกอร์จะใช้เวลาในการเปิดวงจรประมาณ 5-8 ไซเคิล ส่วนในกรณีที่ใช้กับแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 600 V จะสามารถปรับแต่งการทำงานได้ โดยอาจเป็นแบบหน่วงเวลานาน หรือทำงานแบบทันทีทันใดเมื่อมีกระแสเกินไหลผ่านตัวมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้งานกับแรงดันไฟฟ้าที่มากกว่า 600 V จะคำนึงถึงค่าพิคในชั่วขณะหนึ่ง(Momentary Duty Rating) ซึ่งจะเป็นช่วงที่ต้องพิจารณาถึงว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถรับค่าความเค้นทางกล และความร้อนที่จะเกิดขึ้นเมื่อกระแสลัดวงจรสูงสุดไหลผ่านได้หรือไม่ โดยช่วงที่พิจารณาก็คือช่วง 1/2 ไซเคิลแรกของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั่นเอง ส่วนสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอีกค่าก็คือ พิกัดของการทนได้ต่อกระแสลัดวงจร(Interrupting Duty Rating) โดยเป็นการพิจารณาในช่วงไซเคิลที่ 4,5 หรือ 8 ไซเคิลตามลำดับ

## 5.6 การทำงานของวงจรผสม (Circuit Combination)

ในระบบแรงดันไฟฟ้าต่ำ อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน หรือกระแสลัดวงจรก็คือ ฟิวส์ และเซอร์กิตเบรกเกอร์ สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ซึ่งจะมีอุปกรณ์การทำงาน คือ รีลีส(Releases) หรืออุปกรณ์ทริปปีง อันจะประกอบด้วยเทอร์มอลทริปปีง และอิเล็กทรอนิกส์ทริปปีง

ก) เซอร์กิตเบรกเกอร์ พบมากในการใช้งานลักษณะต่างๆ ต่อไปนี้เมื่อ

- 1.เส้นการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ สามารถปรับได้ตามความต้องการ เพื่อให้เกิดการ ทำงานแบบเลือกตัดได้ง่าย เพื่อป้องกันกระแสเกินและการลัดวงจร
- 2.เมื่อเกิดกระแสเกิน หรือการลัดวงจรขึ้นบ่อยๆ
- 3.เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น สามารถตัดความผิดปกติทุกๆเฟสออกได้พร้อมๆกัน ซึ่งจะไม่มีการทำงานตัดวงจรออกเพียงเฟสใดเฟสหนึ่งเหมือนกับการใช้ฟิวส์
- 4.พร้อมที่จะกลับมาทำงาน ได้อีกครั้ง หลังจากที่ได้ทำงานไปแล้วครั้งหนึ่งหรือหลังจากเมื่อขจัดความผิดปกตินั้นๆออกไปเรียบร้อยแล้ว
- 5.เมื่อต้องการควบคุมการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์จากระยะทางไกล
- 6.เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น สามารถตัดวงจรที่มีกระแสสูงๆนั้นได้
- 7.เมื่อแรงดันของสายหายไป จะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานตัดวงจรออกในขณะที่ไม่มีแรงเคลื่อนปกติมาปรากฏตามสภาวะปกติ
- 8.เมื่อมีความต้องการใช้สัญญาณเกิดขึ้นช่วงจังหวะการทำงาน หรือการทริปของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เพื่อนำสัญญาณการทำงานไปใช้ในการควบคุมกับวงจรส่วนอื่นต่อ หรือใช้เป็นสัญญาณเตือนภัย(Warning Signal) ได้
- 9.สามารถสับกระแสเข้าที่มีขนาดค่าสูง ๆ ได้แก่ มอเตอร์ คอนเดนเซอร์หรือโหลดอื่น ๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. อาจจะเป็นไปได้ว่า เมื่อสัปดาห์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์เข้าไปหาโหลด โดยที่ โหลดนั้นมีความผิดปกติเกิดขึ้นอยู่ก่อนแล้ว เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะต้องสามารถตัดความผิดปกติ นั้นออกไปได้อีกในทันทีทันใด

ข) ฟิวส์ จะพบมากในการใช้งานลักษณะต่างๆดังต่อไปนี้เมื่อ

1. ต้องการระบบป้องกันอย่างหยบๆ
2. เมื่อไม่มีการตัดต่อวงจรนั้นบ่อยๆ
3. เมื่อไม่ค่อยจะมีกระแสเกินเกิดขึ้นบ่อยๆ
4. เมื่อกระแสลัดวงจรมีค่าสูงๆ และไม่ต้องการใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นตัวตัดวงจร

เพราะราคาที่สูงของเซอร์กิตเบรกเกอร์

5. พื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์มีขนาดใหญ่ไม่เพียงพอสำหรับที่จะติดตั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์

6. ต้องการใช้ในการกำหนดขอบเขตของค่าทรานเซียนท์ของกระแสลัดวงจร โดยเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

โดยปกติแล้วฟิวส์จะมีราคาถูกกว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์หลายเท่า แต่ข้อเสียของมันก็คือ ต้องเปลี่ยนฟิวส์ตัวใหม่อยู่เสมอเมื่อฟิวส์ตัวเก่าขาดไป ทำให้เกิดความไม่สะดวกขึ้นและเสียเวลาที่ต้องใช้ไปในการเปลี่ยนฟิวส์ แต่เป็นสิ่งที่แน่นอนว่าทั้งฟิวส์ และเซอร์กิตเบรกเกอร์ มีทั้งข้อดีและข้อเสียอยู่ในตัวของมัน เราจะต้องพยายามนำเอาแต่ข้อดีทางเทคนิคของอุปกรณ์ทั้งสองมาใช้งานร่วมกัน ดังนั้นจะได้การทำงานของอุปกรณ์ทั้งสองแบบที่ร่วมกันทำงาน ซึ่งเรียกว่า “การทำงานแบบผสม” ขึ้นระหว่างฟิวส์ที่ต่ออยู่หน้าเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยที่อุปกรณ์ทั้งสองจะอยู่ป้องกันวงจรหรือสายไฟฟ้าเดียวกัน

ขอบเขตของการใช้วงจรแบบผสมในการทำงาน

เมื่อเกิดค่ากระแสลัดวงจรที่มีค่าสูงขึ้นแล้ว ก็จะเป็นเหตุที่จะทำให้ฟิวส์ขาดลง เมื่อเป็นเช่นนี้ ห้ามมิให้เกิดความเสียหายใดๆขึ้นกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ หรือทำให้หน้าคอนแทกใหญ่(Main Contact) เกิดการหลอมละลายติดกัน ถ้าหากว่ากระแสลัดวงจรนั้นมีค่าสูงเกินกว่าค่าฟิวส์ที่ติดตั้งไว้รับตั้งคาปาซิทีซีของเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นๆ แรงอันเกิดจากกระแสลัดวงจรค่าสูงๆนี้ อาจจะมีค่ามากกว่าแรงดึงคอนแทกกลับ อันเกิดจากแรงสปริงดึงกลับ เพื่อให้หน้าคอนแทกพยายามเบียดออก ในช่วงเวลาขณะนี้กระแสลัดวงจรยังคงไหลผ่านไฟอาร์ก(Arc Flame)ที่เกิดขึ้นระหว่างหน้าสัมผัสของคอนแทก จวบจนกระทั่งฟิวส์ขาดลง ซึ่งฟิวส์ก็ต้องใช้เวลาเช่นเดียวกัน

อันตรายของการหลอมละลายติดเข้าด้วยกันของหน้าคอนแทก สามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้ก็ต่อเมื่อ หน้าสัมผัสของคอนแทกพยายามแยกออกจากกันอยู่ในขณะหรือระยะเวลาที่จุดสัมผัสนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ หากมีการคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังไม่หลอมเหลวหรือว่ายังคงอ่อนอยู่ ในกรณีนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งไว้มีความไวมากพอสมควรและทำให้กลไกสวิตชิง หรือแลทซ์ ทำงานเพื่อตัดวงจรที่ผิดปกติอยู่นั้นออกไป

ในรายละเอียดทางด้านเทคนิคที่ให้มากับเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้น บางครั้งจะให้ค่าขนาดสูงสุดของกระแสทำงานปกติ( $I_N$ )ของฟิวส์ที่สามารถนำมาต่อข้างหน้าเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อทำงานร่วมกัน

ถ้าเราสังเกตรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบโครงงานต่างๆ จะพบว่าค่าขนาดกระแสหลอมละลาย(Peak Melting Current)ของฟิวส์เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรขนาดค่าสูงๆ สามารถให้อิมพัลส์(Impulse)ให้แก่อาร์มาเจอร์ของอุปกรณ์ตัดตอนทันทีทันใดภายในเซอร์กิตเบรกเกอร์ขึ้นได้ ซึ่งลักษณะที่ช่วยกันในการทำงานของฟิวส์เช่นนี้ จะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ได้รับโหลดอันเกิดจากกระแสลัดวงจรค่าสูงๆลดน้อยลง

ดังนั้นวงจรผสมที่ประกอบขึ้นด้วยฟิวส์ และเซอร์กิตเบรกเกอร์ จึงถูกนำมาใช้ในการป้องกันอุปกรณ์ทางไฟฟ้าร่วมกัน ซึ่งใช้มากในระบบการติดตั้งทางไฟฟ้า เพราะมันมีข้อดีต่างกันดังต่อไปนี้

- สามารถตัดวงจรออกได้ทุกเฟส
- มีความพร้อมที่จะกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง หลังจากการเกิดทำงาน(Trip) เมื่อเกิดกระแสเกิน หรือเกิดกระแสลัดวงจรขึ้น
- มีความสามารถในการตัดวงจรได้สูง โดยเสียค่าใช้จ่ายน้อย

## 5.7 สรุปหลักการของการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าเพื่อให้มีการทำงานร่วมกันในระบบไฟฟ้า

จะต้องประกอบไปด้วย

1. วันไลน์โคออร์เดชัน จะระบุถึงชนิดและพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันทุกชนิดที่ใช้ในระบบไฟฟ้า ข้อมูลโหลด ข้อมูลหม้อแปลง ข้อมูลสายตัวนำ และค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

2. อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าชนิดพิเศษ ต้องเป็นไปตามกฎข้อบังคับของ NEC , ANSI เช่นในกรณีหม้อแปลง อุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งจะต้องพิจารณาถึงจุดแอนซี(ANSI Point)ของหม้อแปลง กระแสแมกเนติกอินรัช(Magnetic Inrush Current) หรือกระแสสตาร์ทมอเตอร์

3. การเลือกสเกล(Scale) โดยในการเลือกสเกลเพื่อเป็นประโยชน์ในการเขียนคุณสมบัติประจำตัวของอุปกรณ์ป้องกันลงในแผ่นสเกลนั้น โดยปกติทางด้านซ้ายมือของกระดาษสเกล ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ป้องกัน ณ ตำแหน่งนี้จะมีขนาดเล็ก แต่ถ้าอยู่ทางด้านขวามือของกระดาษสเกล อุปกรณ์ป้องกันจะมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้สเกลของกระแสยังจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าอีกด้วย

4. จุดคงที่ โดยในกระดาษสเกลซึ่งเป็นสเกลล็อก-ล็อก(Log-Log Scale) อุปกรณ์ป้องกันจะมีคุณสมบัติประจำตัวที่แสดงด้วยจุดที่คงที่ได้

5. การเริ่มทำการออกแบบ โดยทั่วไปจะเริ่มต้นจากอุปกรณ์ป้องกันของวงจรย่อยไล่เรียงขึ้นไปจนถึงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

6. คุณสมบัติของอุปกรณ์ป้องกันที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างกัน จะต้องหาความสัมพันธ์ของระดับแรงดันไฟฟ้าเหล่านั้น เช่น หม้อแปลง 75 kVA, 480 V/240 V กระแสทางด้านแรงต่ำมีค่า 225 A ดังนั้นกระแสทางด้านแรงสูงจะมีค่า  $225 \times (240/480) = 112.5$  A เป็นต้น

7. เลือกพิกัดและการปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน โดยปกติจะเลือกขนาดของอุปกรณ์ป้องกันที่ค่าต่ำสุดก่อน โดยอุปกรณ์ป้องกันที่มีขนาดต่ำสุดนี้ยอมให้กระแสปกติไหลผ่าน แต่จะต้องทำงานเปิดวงจรเมื่อมีกระแสผิดปกติไหลผ่านตัวมัน

### 5.7.1 ข้อมูลที่จำเป็นที่ต้องใช้ในการศึกษาถึงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า

จะประกอบไปด้วย

1. ข้อมูลโหลด เช่น กระแสโหลดสูงสุดที่ไหลในวงจร กระแสกรณีที่เกิดขึ้นขณะสับโหลดทันที หรือกระแสอินรัช ซึ่งกระแสนี้เป็นกรณีพิเศษที่อาจจำเป็นต้องนำมาพิจารณา

2. หม้อแปลง ข้อมูลประกอบไปด้วยพิกัดกำลัง แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ การต่อวงจรว่าเป็นแบบใด เช่น เดลต้า-เดลต้า(Delta-Delta) , เดลต้า-สตาร์(Delta-Star) หรืออื่นๆ เปรอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ กระแสแมกเนติกอินรัช ชนิดของหม้อแปลงว่าเป็นแบบแห้ง แบบน้ำมันท่วม เต็ม หรือขนาดของการจ่ายโหลดเกิน

3. มอเตอร์ ข้อมูลประกอบไปด้วย แรงม้า กระแสพิกัด กระแสล็อกโรเตอร์ ค่าเซอร์วิสแฟกเตอร์(Service Factor) เวลาในการสตาร์ท ชนิดของการสตาร์ท

4. บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ ซึ่งจะทำได้ข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น พิกัด ชนิด การปรับแต่งอุปกรณ์ การปรับแต่งอุปกรณ์บางตัว

5. กระแสลัดวงจร ซึ่งส่วนมากจะพิจารณาถึงกระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีลัดวงจรแบบ 3 เฟส และกระแสลัดวงจรควรจะทราบค่า ณ ทุกๆตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน

6. คุณสมบัติของกระแส-เวลาของอุปกรณ์ ซึ่งอุปกรณ์ป้องกันทุกตัวจะต้องมี และสามารถเขียนลงในกระดาษกราฟชนิดล็อก-ล็อกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เซอร์กิตเบรกเกอร์ ประกอบด้วย ชนิด บริษัทผู้ผลิต ขนาดเฟรม พิกัดกระแสหรือพิกัดกระแสของอุปกรณ์ตรวจสอบ ค่าการปรับแต่งแบบหน่วงเวลานาน หน่วงเวลาสั้น และแบบทันทีทันใด เป็นต้น

8. รีเลย์ป้องกันกระแสเกิน ประกอบด้วย ชนิด บริษัทผู้ผลิต ค่าการปรับกระแสเปิดวงจร ค่าหน่วงเวลา ค่าการปรับแต่งให้ทำงานทันทีทันใด อัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสที่ใช้ร่วมกับรีเลย์

9. ฟิวส์ ประกอบด้วย ชนิด บริษัทผู้ผลิต พิกัดกระแสต่อเนื่อง

10. สายเคเบิลหรือสายตัวนำ ประกอบด้วย จำนวนตัวนำต่อเฟส เดินในท่อ หรือเดินลอยในอากาศ ชนิดของตัวนำ(ทองแดงหรืออะลูมิเนียม) ชนิดของฉนวน ขนาดกระแสสูงสุด การทนได้ต่อกระแสลัดวงจร

11. บัสเวย์ ประกอบด้วย ขนาดกระแสสูงสุด

12. แผงย่อย ประกอบด้วย ขนาดกระแส

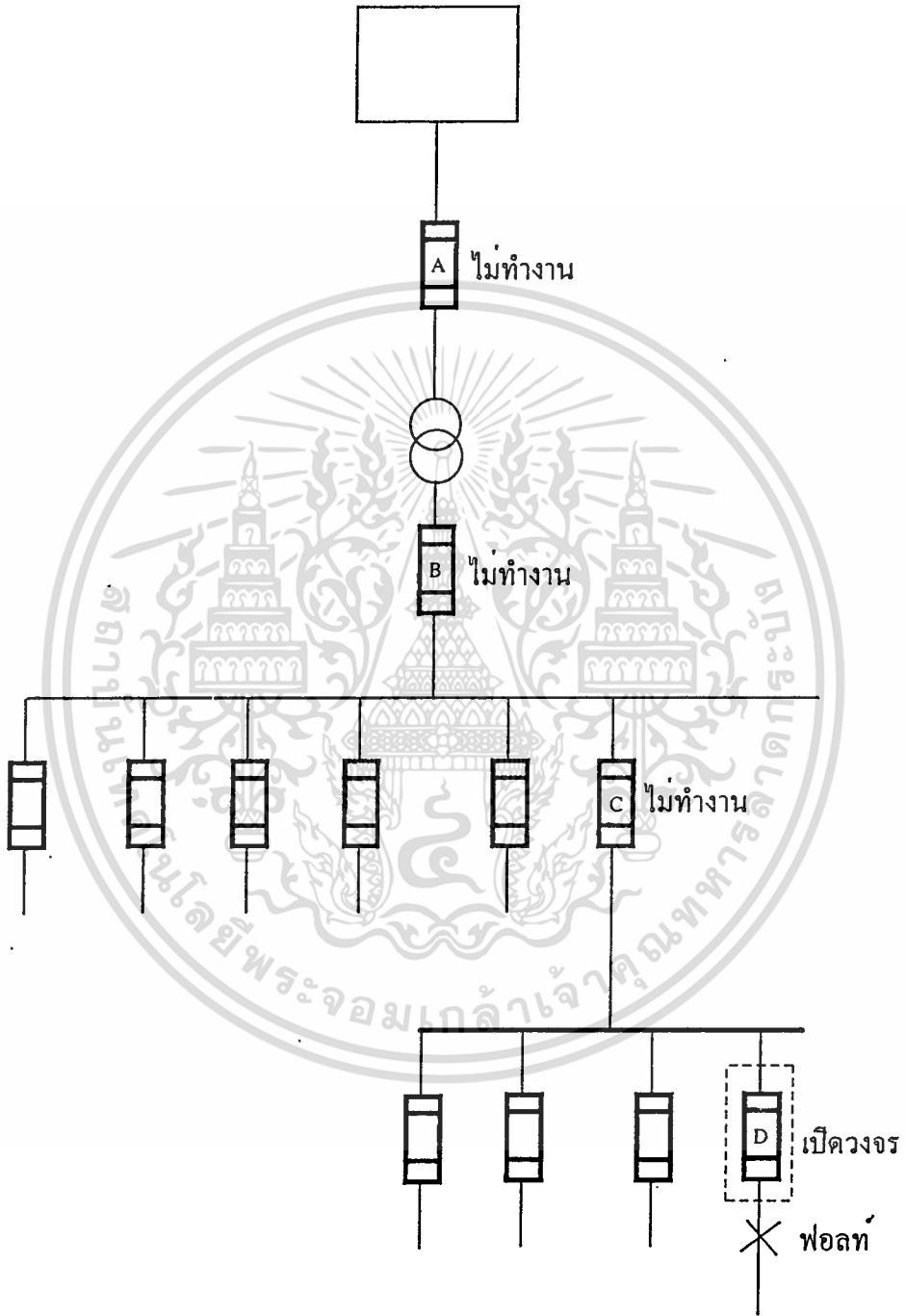
รูปที่ 5.1 แสดงซีเล็กทีฟโคออดิเนชัน(Selective Coordination) ความผิดปกติที่บรานซ์ (Branch) จะทำให้ฟิวส์ D เปิดวงจร โดยที่ฟิวส์ A,B,C ยังคงทำงานตามปกติ

## 5.8 ยกตัวอย่างการโคออดิเนท

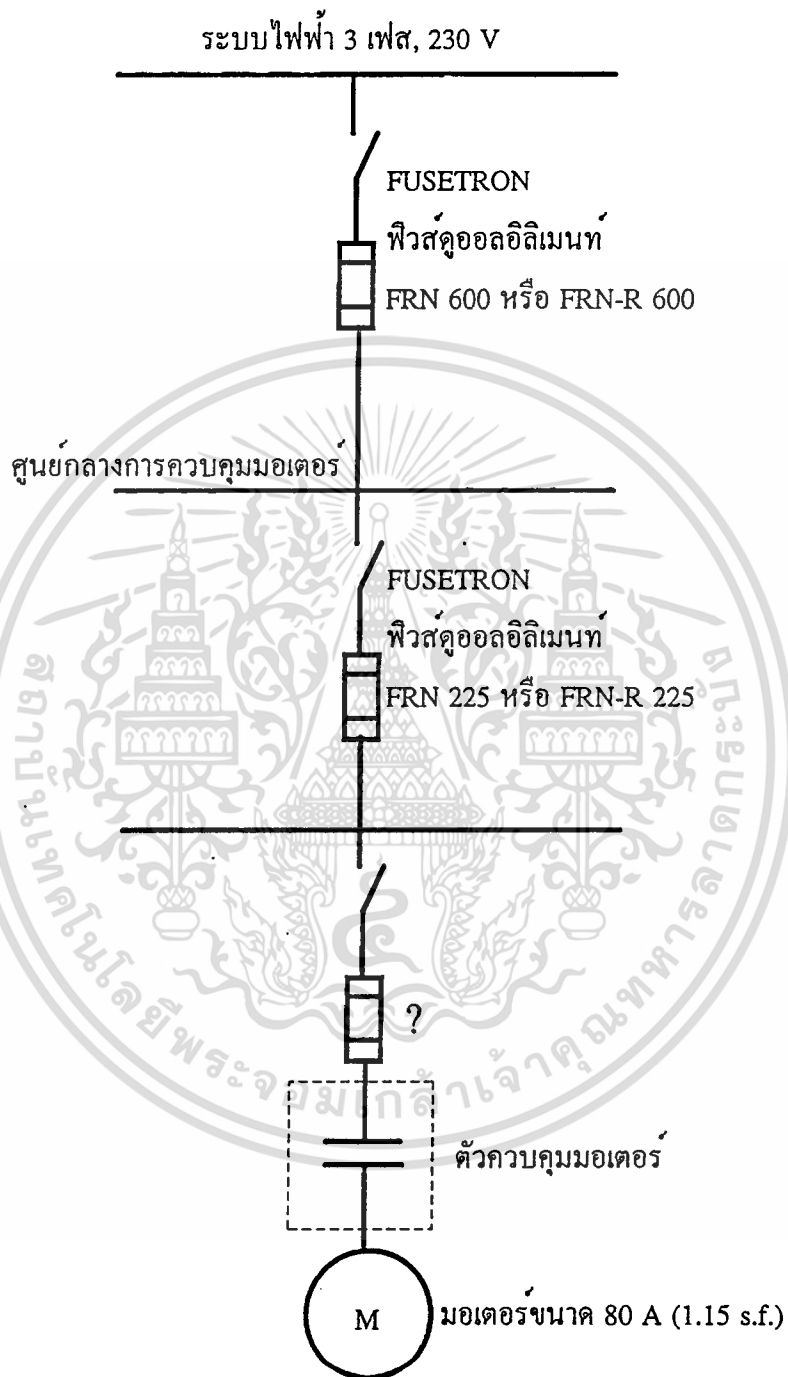
- จากวงไลน์ไดอะแกรมตามรูปที่ 5.2 ศูนย์กลางควบคุมมอเตอร์(Motor Control Center) จ่ายกระแส 225 A และมอเตอร์ขนาดใหญ่ที่สุดจ่าย 50 A ที่โหลดเต็มที่
- ใช้ฟิวส์ FRN 100 หรือ FRN-R 100 สำหรับมอเตอร์ (ต้องเกิดที่ 125% ของโหลดเต็มที่)
- ใช้ฟิวส์ขนาด 225 A สำหรับช่วงถัดขึ้นมา (FRN 225 หรือ FRN-R 225)
- ใช้ฟิวส์ขนาด 600 A สำหรับช่วงบนสุด (FRN 600 หรือ FRN-R 600)

ความผิดปกติที่ศูนย์กลางควบคุมมอเตอร์จะถูกกำจัดโดย 100 A FUSETRON ฟิวส์ดูอลลิลิเมนต์ (FRN 100 หรือ FRN-R 100 ) โดยที่ฟิวส์ตัวอื่นไม่ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเชิงวิชาการซึ่งจะเผยแพร่โดยไม่ระบุชื่อให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างซีเล็กต์ฟโคออดิเนชัน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 5.2 วันไลน์ไดอะแกรมของตัวอย่างในหัวข้อที่ 5.8 ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

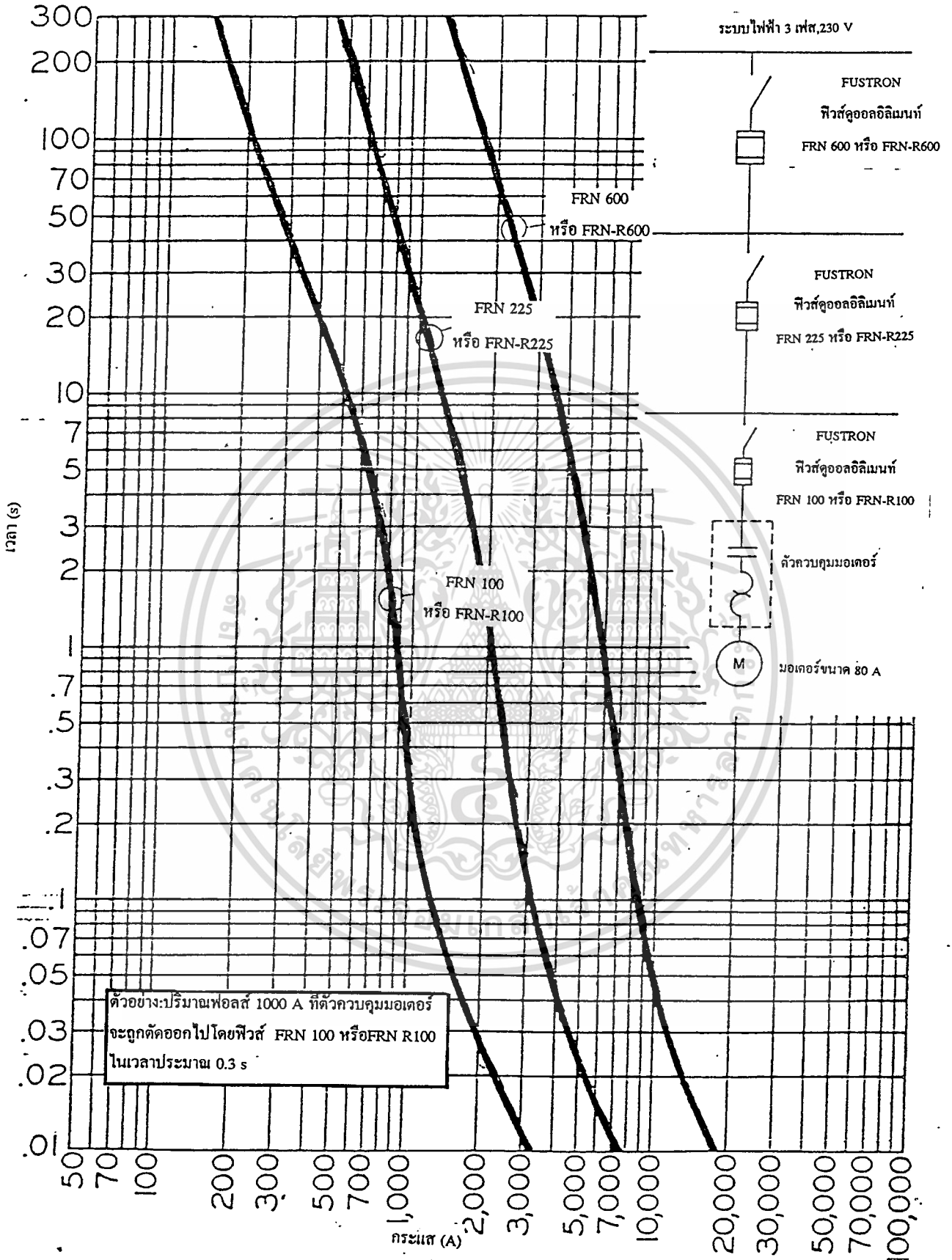
## 5.9 การวิเคราะห์การทำงานร่วมกัน

เราสามารถวิเคราะห์การทำงานร่วมกันบนกราฟล็อก-ล็อกของมาตรฐาน NEMA ได้ซึ่งแสดงคุณสมบัติของกระแส-เวลาลงบนกระดาษกราฟ ถ้ามีการตัดกันของกราฟ แสดงว่าจะเป็นการนอลซีเลกตีฟ(Nonselective) สำหรับบางค่าที่มีการกระแสเกิน

การเขียนกราฟได้แสดงไว้ในรูปค่าเฉลี่ยของการหลอมละลายของฟิวส์ ถ้ามีกระแสเกินที่ 1000 A จะทำให้ฟิวส์ FRN 100 หรือ FRN-R 100 เป็ดวงจรในเวลา 0.3 วินาที ในขณะที่ฟิวส์ FRN 225 หรือ FRN-R 225 จะเป็ดวงจรในเวลา 22 วินาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 5.3 กราฟแสดงการ โค้อคิเนท ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### วิธีการใช้โปรแกรม

สำหรับผู้ใช้งานโปรแกรมเริ่มจาก

#### 6.1 ส่วนการคำนวณ

6.1.1 เลือกเพาเวอร์คอมโพเนนต์(Power Component) เพื่อที่จะสร้างระบบไฟฟ้าจำลองขึ้นจากคอมโพเนนต์ย่อย อันได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้า, หม้อแปลง, สายส่ง, มอเตอร์, โหลด หรือแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับวันไลน์ไดอะแกรมของผู้ใช้โปรแกรม

6.1.2 ทำการใส่ข้อมูลของอุปกรณ์ชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในวันไลน์ไดอะแกรมของผู้ใช้โปรแกรม โดยใส่ในช่องใส่ข้อมูลที่สร้างขึ้น ให้ครบถ้วนและถูกต้องตามสภาพความเป็นจริงที่ใช้งานโดยทั่วไป

6.1.3 กดปุ่ม คำนวณ เพื่อให้คอมพิวเตอร์ทำการคำนวณค่ากระแสโหลดและค่ากระแสลัดวงจร ซึ่งจะแสดงผลออกทางหน้าจอของระบบไฟฟ้าจำลองที่สร้างขึ้น โดยผู้ใช้เพียงแต่คลิกเมาส์(Click Mouse) ณ ตำแหน่งต่างๆที่ต้องการทราบผลจากการคำนวณเท่านั้น ผลจากการคำนวณจะปรากฏค่ากระแสลัดวงจรทั้งจากมาตรฐาน IEC และ IEEE ให้เห็นไปพร้อมกัน เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเปรียบเทียบผลจากการคำนวณได้ง่ายยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังแสดงค่าแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนั้นด้วย

#### 6.2 ส่วนการเลือกอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ามาทำงานร่วมกัน

6.2.1 จากระบบไฟฟ้าจำลองที่สร้างขึ้นจากส่วนการคำนวณ ผู้ใช้ต้องเลือกตำแหน่งที่จะทำการเลือกอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ามาทำงานร่วมกัน(Coordination) จากนั้นคอมพิวเตอร์จะแสดงค่ากระแสโหลด และค่ากระแสลัดวงจรซึ่งคำนวณได้จากมาตรฐาน IEEE เรียบร้อยแล้วมาแสดง ณ ตำแหน่งนั้น เหตุผลที่เลือกค่ากระแสลัดวงจรจากมาตรฐาน IEEE เพราะเป็นมาตรฐานที่มีจุดประสงค์ในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรเพื่อติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะ

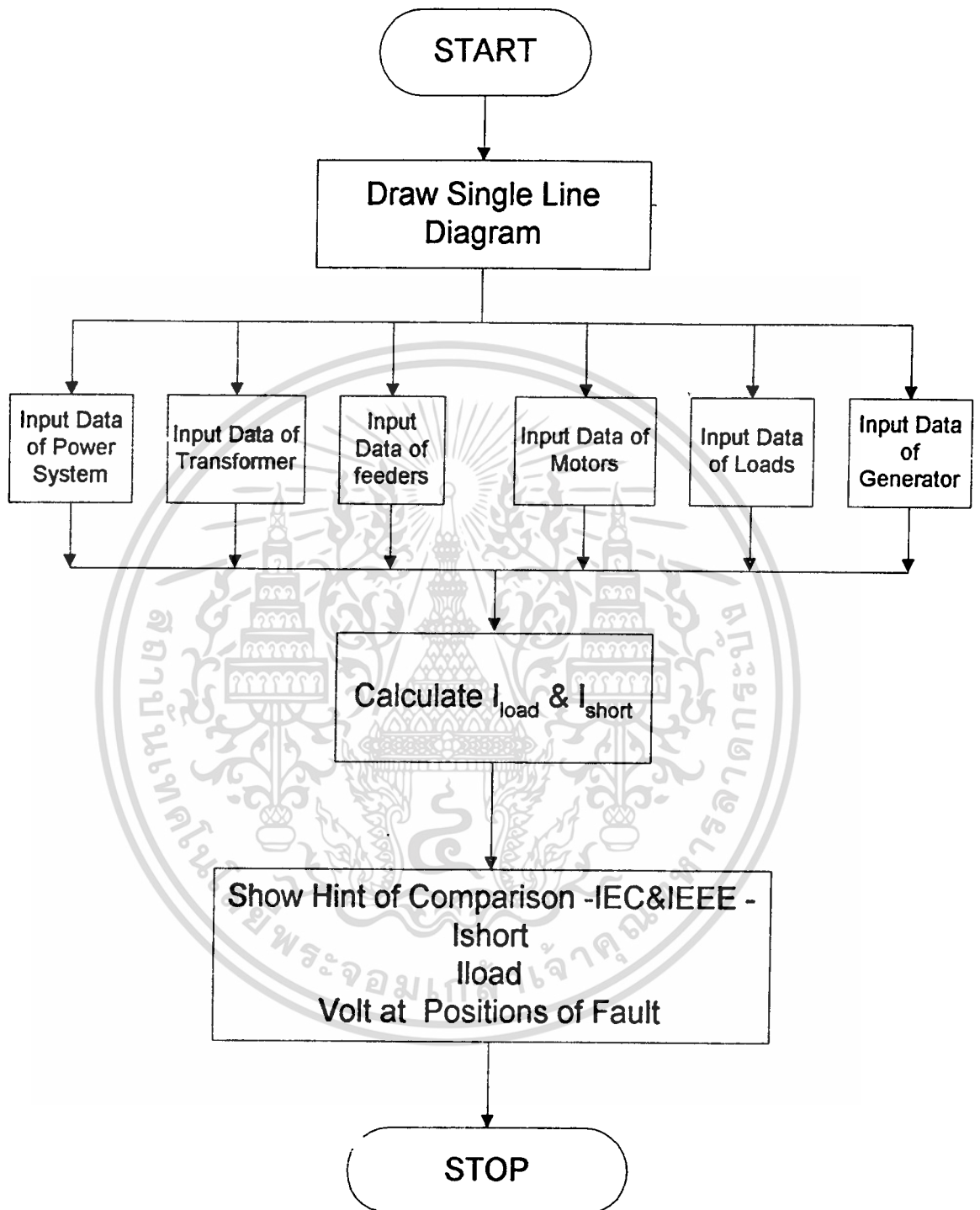
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 เลือกอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าจากรายการชนิดของอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ อันได้แก่ ฟิวส์ รีเลย์ และเซอร์กิตเบรกเกอร์ ที่มีให้เลือกใช้แล้วในบล็อก(Block) ซึ่งขณะที่ผู้ใช้เลื่อนแถบสว่างโดยการใช้ปุ่มลูกศรหรือใช้เมาส์คลิกเพียงครั้งเดียว รายละเอียดของอุปกรณ์ที่กำลังพิจารณาอยู่ จะปรากฏขึ้นที่แถบด้านล่างของหน้าจอ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถใช้ประกอบการเลือกอุปกรณ์ป้องกันมาทำงานร่วมกัน หากผู้ใช้ต้องการเลือกอุปกรณ์ตัวนั้นก็ทำได้โดยการนำเมาส์ไปดับเบิลคลิก(Double Click)ที่ชื่อของอุปกรณ์ป้องกันตัวนั้น ซึ่งคอมพิวเตอร์จะแสดงกราฟของอุปกรณ์ป้องกันบน แกนล็อก-ล็อก(Log-log Axis) ที่สร้างขึ้น

6.2.3 หากกราฟที่แสดงผลการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทับซ้อนกัน ผู้ใช้สามารถลบเส้นกราฟของอุปกรณ์ที่ไม่ต้องการทิ้งได้ เพียงแค่เมาส์ไปดับเบิลคลิกที่ตำแหน่งของอุปกรณ์ป้องกันที่เลือกไปแล้วในแผงรายการของอุปกรณ์ที่เลือก จากนั้นจึงทำการเลือกอุปกรณ์ป้องกันตัวใหม่เพื่อให้ได้อุปกรณ์ป้องกันที่สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างเหมาะสมต่อไป

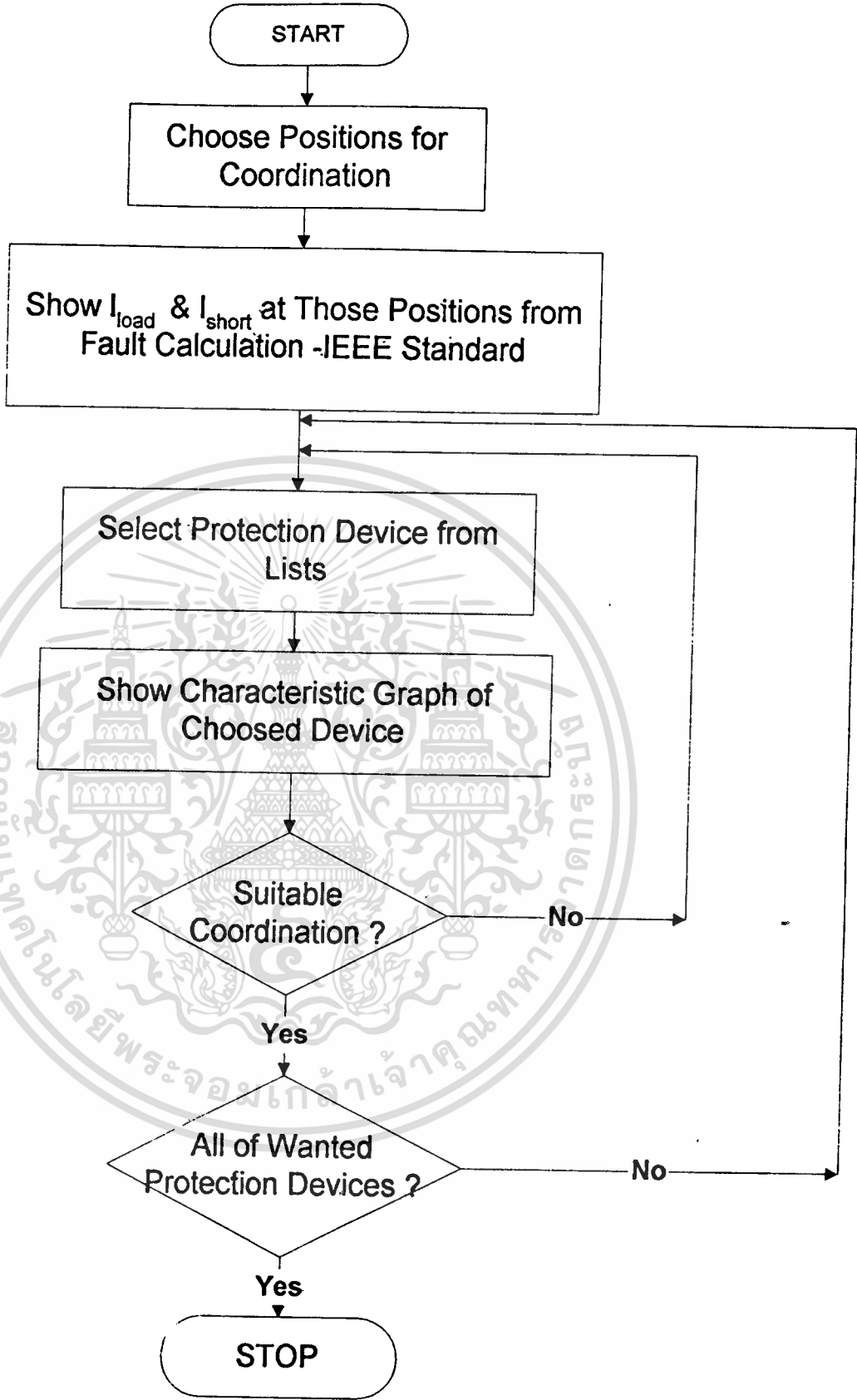


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



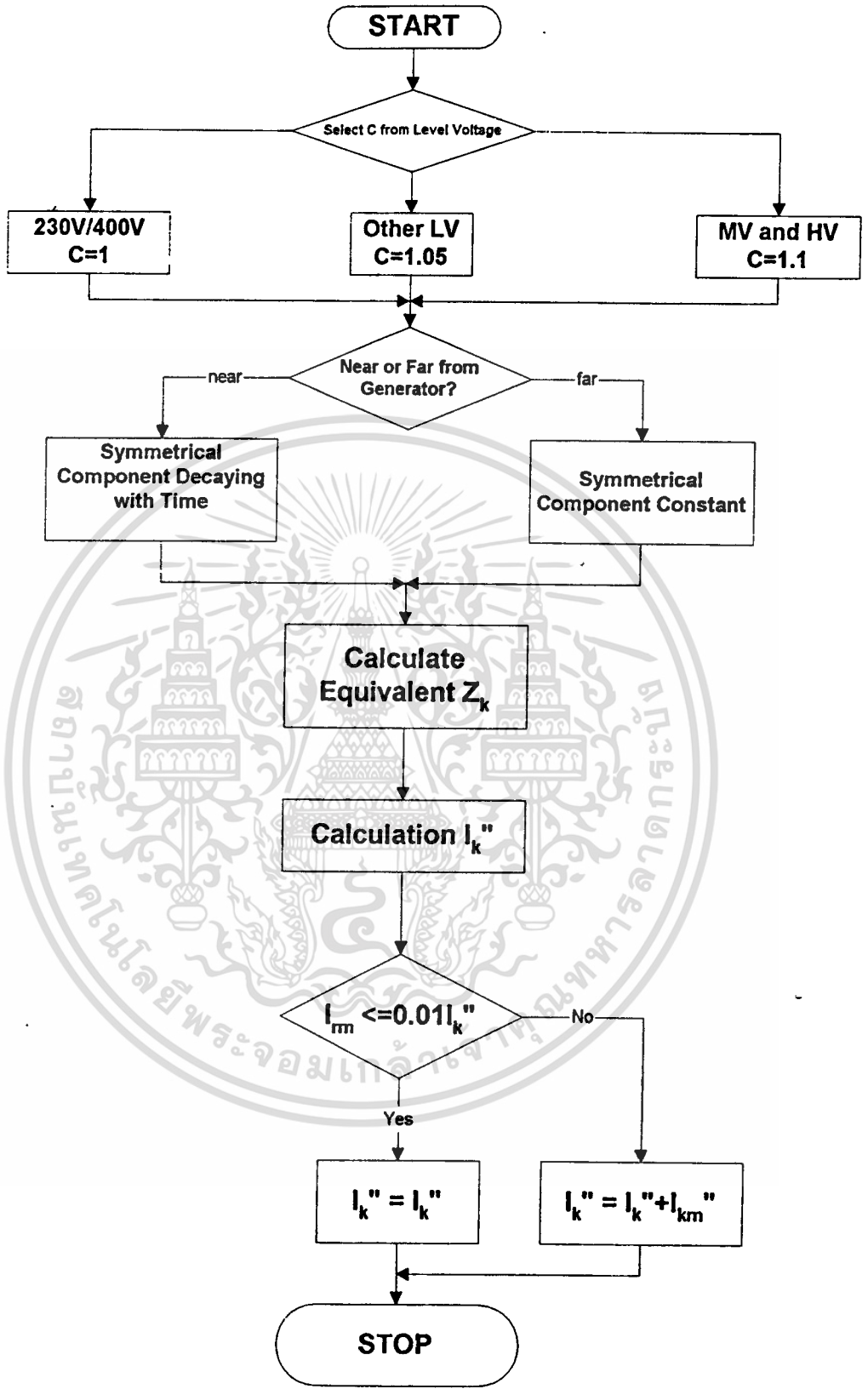
รูปที่ 6.1 โฟลว์ชาร์ท(Flow Chart) การใช้โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **เพื่อกำหนดค่ากระแสโหลดและกระแสลัดวงจร** ถ้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

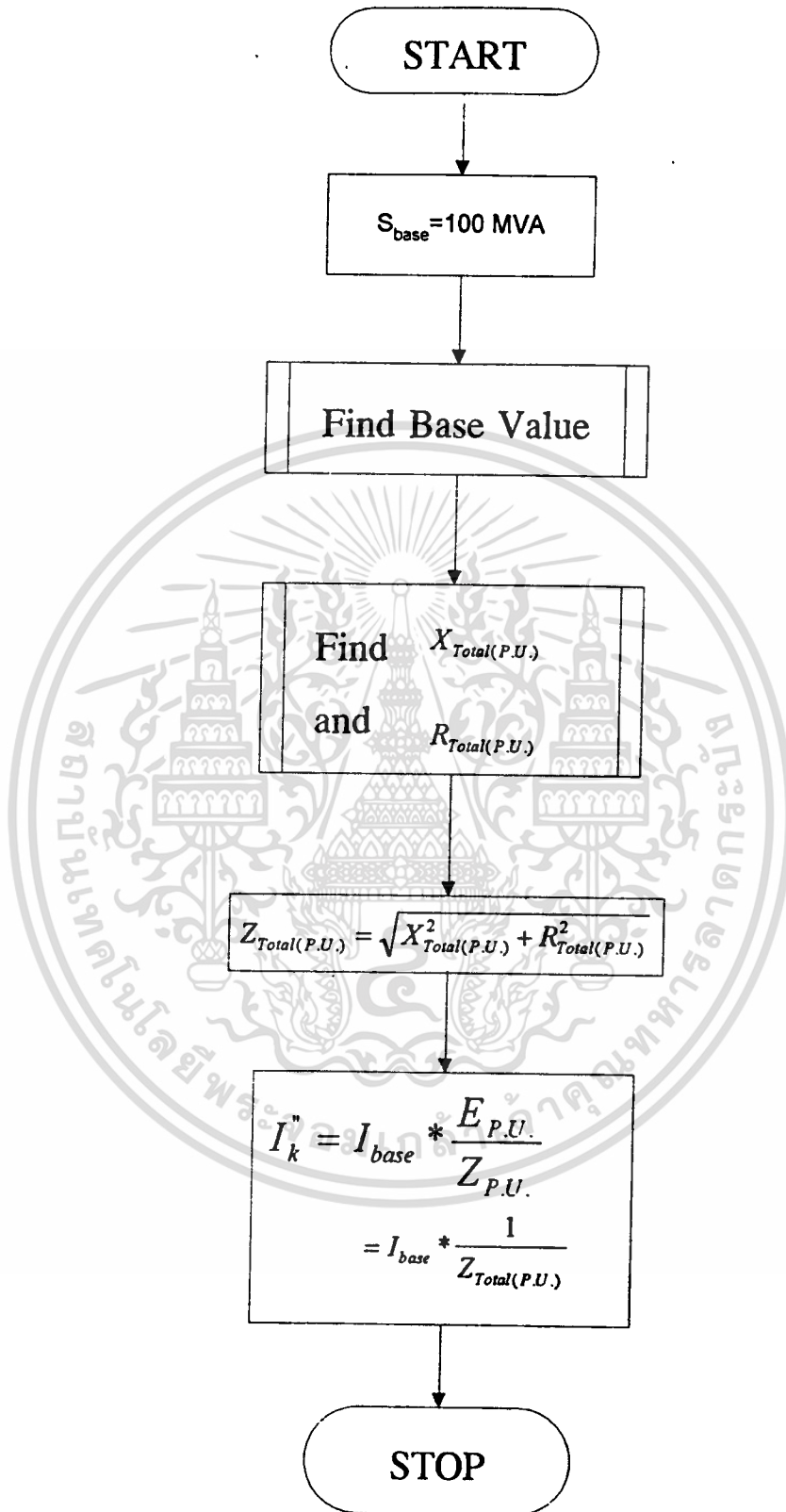


รูปที่ 6.2 โฟลว์ชาร์ทแสดงการใช้โปรแกรมในการ ใ้เลือกชนิดของอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า

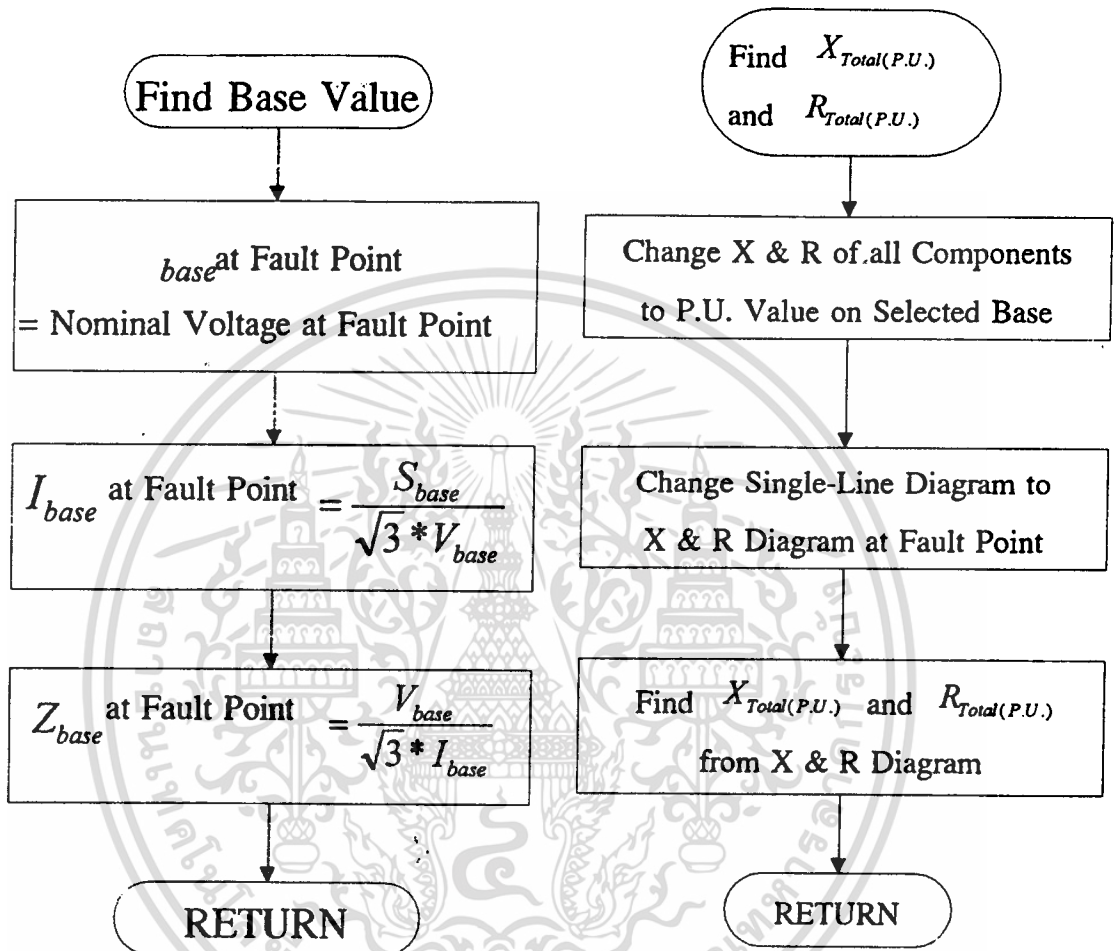
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 6.3 ไฟล์เวิร์กแสดงการเขียนโปรแกรมเพื่อหาค่ากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

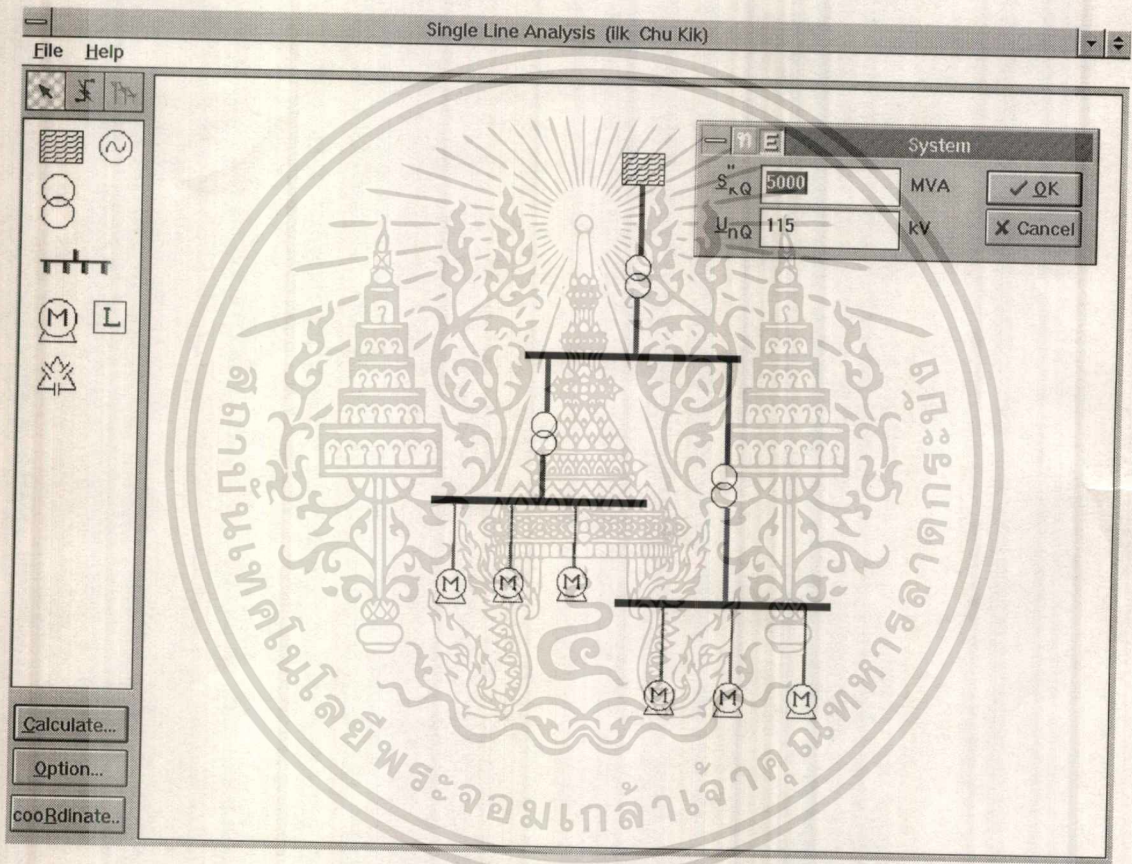


รูปที่ 6.4 โฟลว์ชาร์ทแสดงการเขียนโปรแกรมเพื่อหาค่ากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยพลังงานเพื่อการค้า และผู้รู้ทั้งหมดของสถาบันฯ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 โฟลว์ชาร์ทแสดงการเขียนโปรแกรมเพื่อหาค่ากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE (ต่อ)

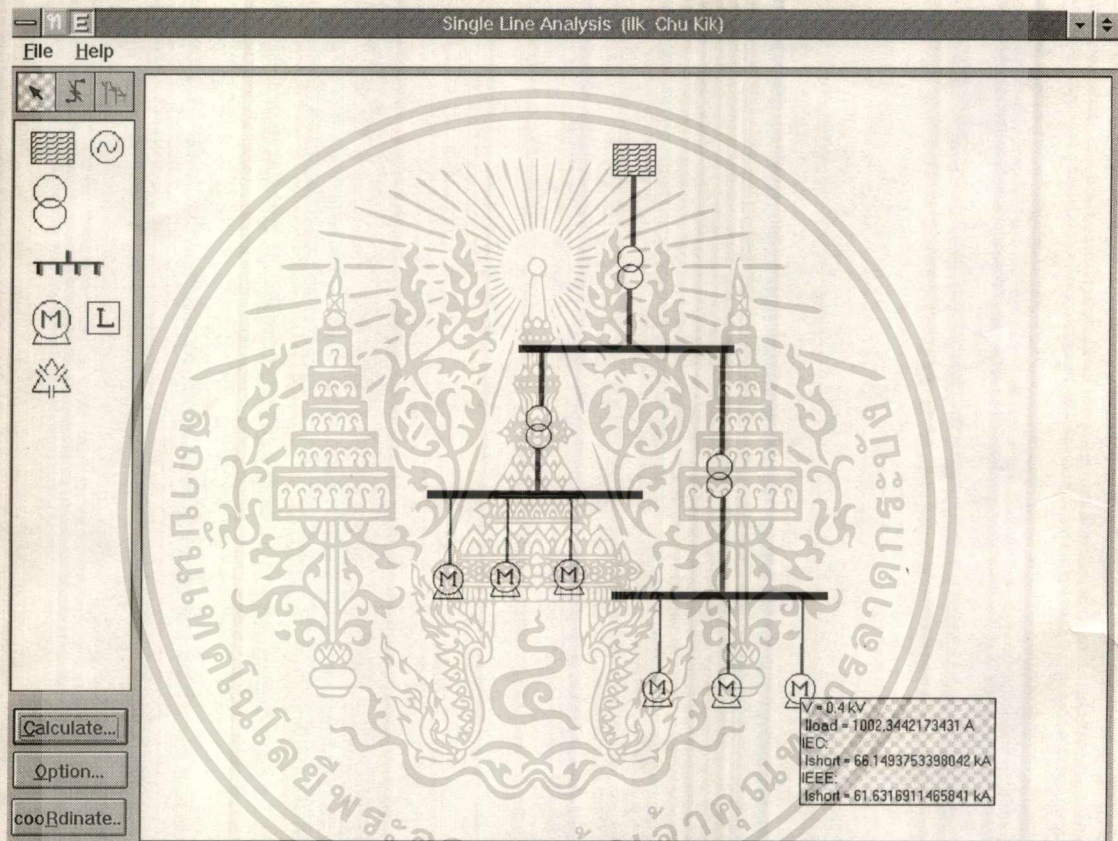
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลทั้งหมด ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



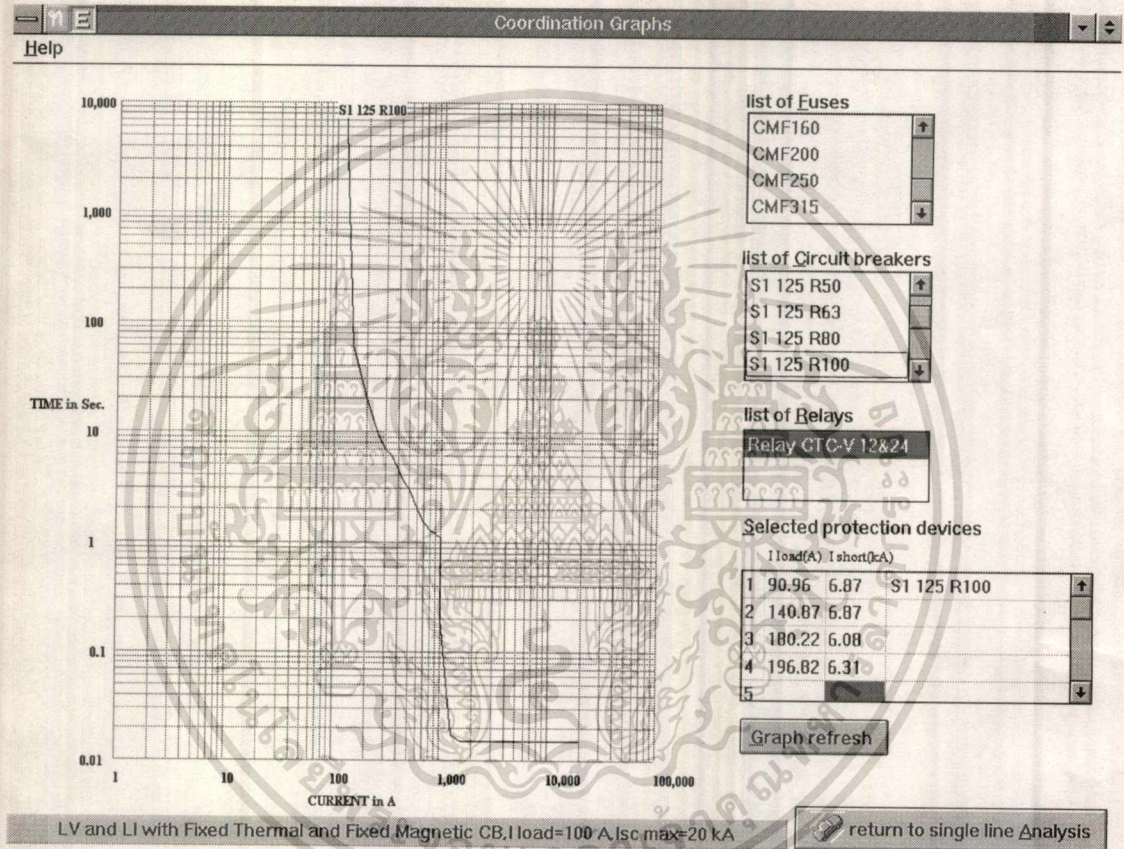
รูปที่ 6.6 แสดงการป้อนข้อมูลของอุปกรณ์ในวันไลน์โคอะแกรมที่วาดเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (ในรูปเป็นการป้อนข้อมูลในส่วนของระบบไฟฟ้า)

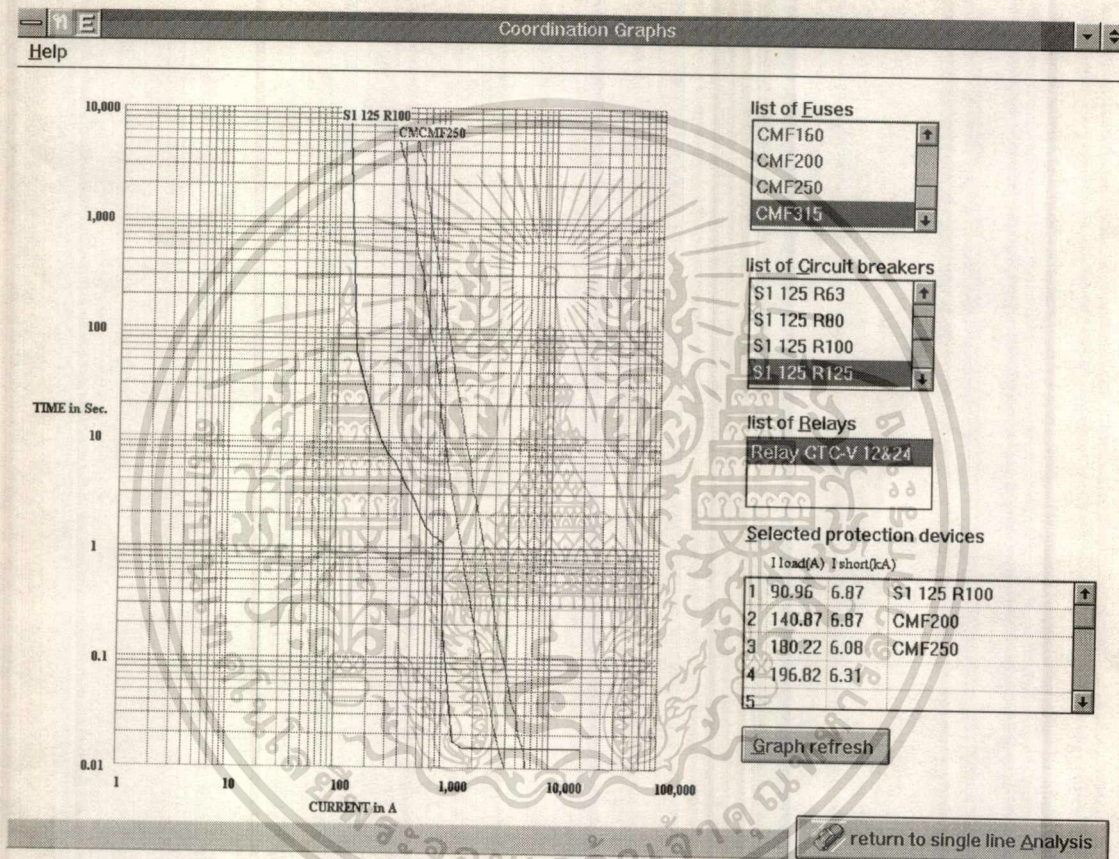
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 แสดงผลการคำนวณกระแสปกติ และกระแสลัดวงจรที่ได้จาก 2 มาตรฐาน ณ ตำแหน่ง  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**วงจรย่อยที่จ่ายไปยังโหลด(Load)**  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

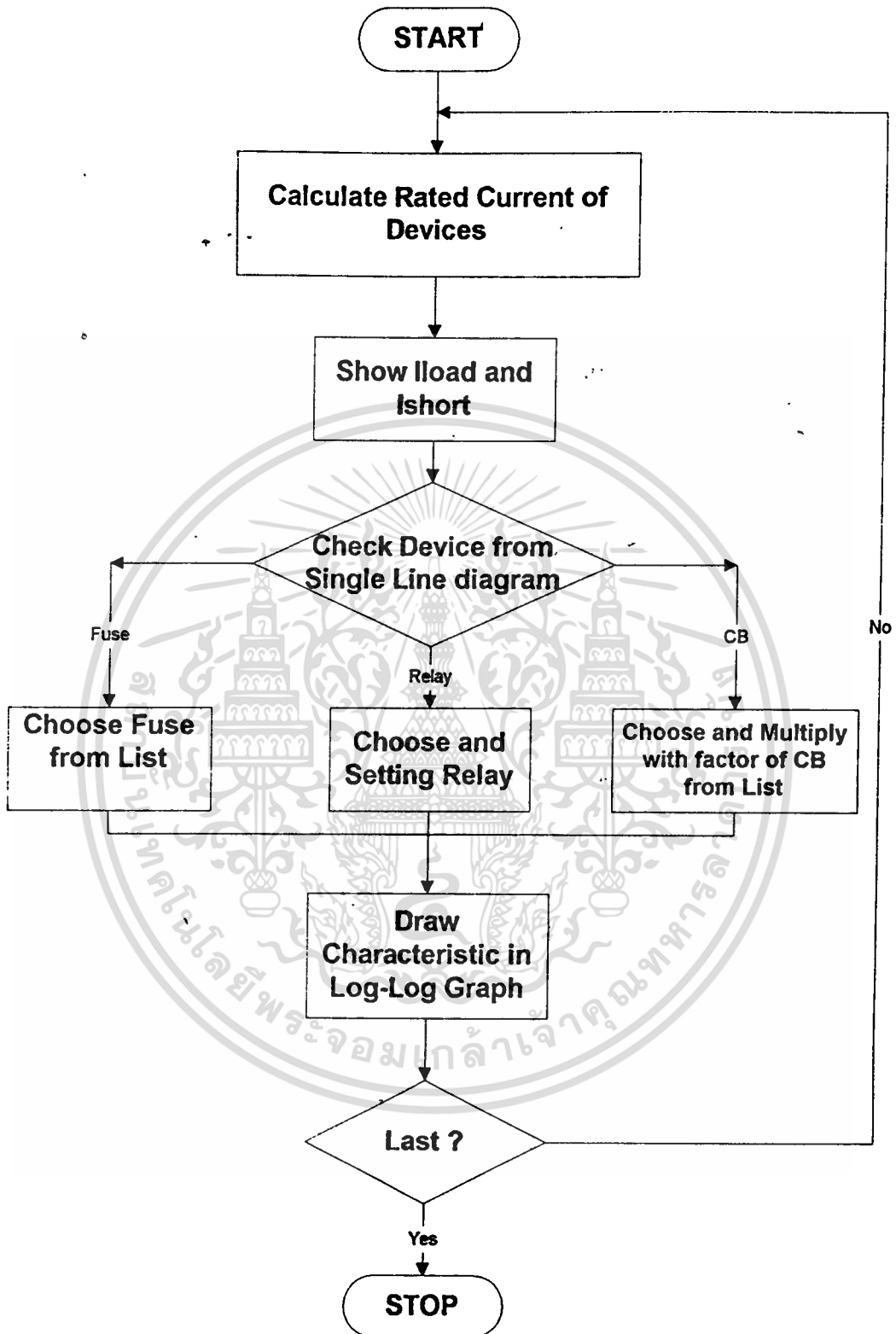


รูปที่ 6.8 แสดงกราฟอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าตัวแรกที่ได้ทำการเลือก  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
โดยไม่รูปได้ทำการเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์  
ไม่ทำการตีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.9 แสดงกราฟการเลือกอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ามาทำการ โคออดินเทกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยในรูปทำการเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ร่วมกับฟิวส์ 2 ตัว ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 โฟลว์ชาร์ทแสดงการเขียนโปรแกรมเพื่อแสดงการโคออดิเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้เป็นเขียนโปรแกรมคำนวณและเปรียบเทียบวิธีการหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 และ ANSI/IEEE C37.010-1979 พร้อมแสดงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

โครงการนี้ไม่สามารถสำเร็จล่วงไปได้ด้วยดี หากมิได้รับคำแนะนำและข้อมูลอันเป็นประโยชน์จากผู้ทรงคุณวุฒิ ดังต่อไปนี้

- 1.รศ.ศุภี บรรจงจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
  - 2.อ.ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
  - 3.ผศ.มณฑล สีสานจินดาไกรฤกษ์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
  - 4.คุณสนธยา วิศวกรแผนกออกแบบลูกค้ารายใหญ่ ฝ่ายบริการอุปกรณ์ไฟฟ้า กฟน.
  - 5.คุณภูษิต วิศวกรฝ่ายออกแบบสถานีย่อย กฟน.
  - 6.คุณวศิน ปุณยกนก โปรแกรมเมอร์บริษัท KERNEL จำกัด
- นอกจากนี้ยังมีเพื่อนๆภาคคอมพิวเตอร์ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี ซึ่งทางคณะผู้จัดทำโครงการ ใคร่ขอกราบขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิดังกล่าวข้างต้น มาไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ศุทธิ บรรจงจิตร, "หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง(ฉบับปรับปรุงและเพิ่มเติม)", บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด(มหาชน), 2537.
- [2] รศ.ศุทธิ บรรจงจิตร, "อุปกรณ์และการติดตั้งในงานระบบไฟฟ้ากำลัง", บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด(มหาชน), 2537.
- [3] เกรียงไกร ปิยะธำรงชัย, เกรียงศักดิ์ จารุรัตน์ธาดา, "Electrical Design 1", 2536.
- [4] ผศ.ประสิทธิ์ พิทยาพัฒน์, "Short-Circuit Current Calculation", คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ร่วมกับสมาคมช่างเหมาไฟฟ้าไทย, กรกฎาคม 2537.
- [5] Alberto Berizzi, Stefano Massucco, Andrea Silvestri And Dario Zaninelli, "Short-Circuit Current Calculation : A Comparison Between Methods Of IEC And ANSI Standards Using Dynamic Simulation As Reference", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 4, July/August 1994.
- [6] IEC, "IEC Technical Committee No.73", IEC 909-1, 1988.
- [7] IEC, "IEC Technical Committee No.73", IEC 909-2, 1988.
- [8] ANSI/IEEE C37.010-1979 (Revision of ANSI/IEEE C37.010-1972), "American National Standard Application Guide for AC High-voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis 1979 Consolidated Edition", American National Standards Institute Inc., 1979.
- [9] Phelps Dodge, "Phelps Dodge's Design Manual on Electrical Conductor for Interior Wiring", Phelps Dodge Thailand Limited, First Edition December 1992.
- [10] Square D, "All About Trip Curve", Square D Company (Thailand) Limited, March 1992.
- [11] Neil J. Rubenking, "Delphi Programming For Dummies", IDG Books Worldwide Inc., March 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ศุติ บรรจงจิตร  
อ.ชาย ชมภูอินไหว

## ผู้จัดทำโครงการ



นางสาวเกษศิริรินทร์ อันพันลำ

ที่อยู่ : 492/3 ถ.ศรีสวัสดิ์ดำเนิน ต.ตลาด อ.เมือง

จ.มหาสารคาม 44000

โทร : (043)-723198



นางสาวจุฑารัตน์ เกิดจันทร์

ที่อยู่ : 133/2 ม.1 ต.กะแตะ อ.กาญจนดิษฐ์

จ.สุราษฎร์ธานี 84160

โทร : (077)-244381



นายนพดล แซ่ตั้ง

ที่อยู่ : 42 ถ.สามชัย อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

โทร : (074)-244493,230197

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้