แบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส

Model of Protection Equipment for Three-Phase Transmission Line

นายกฤษณะ สุขสุดา

นายเกียรติพงษ์ พิพัฒน์พงษ์

นายธเนษฐ เลนะพันธ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์	แบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส	
Thesis Title	*Model of Protection Equipment for Three-Phase Transmission Line*	
โดย	นายกฤษณะ สุขสุดา	055250403022-2
	นายเกียรติพงษ์ พิพัฒน์พงษ์	055250403031-3
	นายธเนษฐ เลนะพันธ์	055250403012-3
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์	ลายมือชื่อ
อาจารย์จตุรงค์ จตุรเชิดชัยสกุล	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภาวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	
อาจารย์สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์	
ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	

วัน / เดือน /ปี ที่สอบ 28 กุมภาพันธ์ 2556 เวลา 9.40 – 10.15 น
สถานที่สอบ ณ อาคาร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ชั้น 2 (ห้อง 3201)

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า รับรองแล้ว

(ดร.ณัฐพงศ์ พันธุนะ)
หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อปริญญานิพนธ์	แบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส
โดย	นายกฤษณะ สุขสุดา
	นายเกียรติพงษ์ พิพัฒน์พงษ์
	นายธเนษฐ เลนะพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอ การออกแบบและสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟสโดยใช้รีเลย์แรงดันในการป้องกัน โดยอุปกรณ์ป้องกันสามารถป้องกันสายส่งจากการเกิดแรงดันเกินและแรงดันต่ำบนสายส่งได้

การออกแบบและสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟสนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อ สร้างแบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส เพื่อให้เข้าใจหลักการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังและเพื่อให้เข้าใจวิธีการใช้อุปกรณ์ป้องกันสายส่งสามเฟสที่ถูกต้อง

จากการทดลองแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันสามารถป้องกันสายส่งจากการเกิดแรงดันเกินและแรงดันต่ำบนสายส่งได้

Project Report Title	: Model of Protection Equipment for Three-Phase Transmission Line
By	: Mr.Krisana Sooksuda
	: Mr.Kaittiphong Pipatphong
	: Mr.Tanate lanapun
Project Report Advisor	: Dr.Nattachote Rugthaicharoencheep
Department of	: Electrical Engineering
Faculty	: Engineering
Academic Year	: 2012

Abstract

This project report proposes a design and construction of model of protection equipment for three-phase transmission line by voltage relay for protect. By protection equipment can protect the transmission line from over voltage and under voltage on the transmission line

The objective of design and construction model of protection equipment for three-phase transmission line. The objective for construction model of protection equipment for three-phase transmission line. For understand power system protection principles. And understand using to protection equipment for three-phase transmission line correct.

From experimentation model of protection equipment could protect over voltage and under voltage on the transmission line

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญานิพนธ์มาโดยตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาปริญญานิพนธ์ และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์กับงานปริญญานิพนธ์ รวมถึงการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณครูและอาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ได้ให้ความรู้ในการศึกษาจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ได้ให้เงินทุนโครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์ในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบุพการีเป็นอย่างสูงที่ได้สนับสนุนทั้งทางด้านการเงิน ทางด้านกำลังใจและความหวังดีที่มีให้กับคณะผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ตลอดมา

กฤษณะ สุขสุดา
เกียรติพงษ์ พิพัฒน์พงษ์
ธเนฐ เลนะพันธ์

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญรูป	ฌ
บทที่ 1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	2
1.4 แนวทางการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	3
2.2 หลักการทั่วไป	3
2.3 รีเลย์	12
2.4 พารามิเตอร์ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า	19
2.5 สายส่งกำลังไฟฟ้า	20
บทที่ 3. การออกแบบและประกอบสร้าง	
3.1 บทนำ	25
3.2 โฟลว์ชาร์ต	25
3.3 กรอบแนวความคิด	26
3.4 การออกแบบและประกอบสร้าง	26

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	**หน้า**
บทที่ 4. การทดลอง	
4.1 บทนำ	39
4.2 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	39
บทที่ 5. สรุปผลการทดลอง ปัญหาและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	43
5.2 ปัญหา	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
บรรณานุกรม	46
ภาคผนวก ก	47
ภาคผนวก ข	49
ประวัติผู้เขียน	51

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แนวทางการดำเนินงาน	2
4.1	ผลการทดลองการปรับตั้งค่า Configurable rated voltage (Ue) เท่ากับ 400 และ 380	39
4.2	ผลการทดลองการปรับตั้งค่า voltage max (%Ue) เท่ากับ 105	40
4.3	ผลการทดลองการปรับตั้งค่า voltage min (%Ue) เท่ากับ 95	41

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การแบ่งเขตป้องกันสำหรับรีเลย์หลักในระบบไฟฟ้า	8
2.2	การต่อหม้อแปลงกระแสเพื่อจัดให้เขตป้องกันคาบเกี่ยวกัน	8
2.3	ระบบสายส่ง	9
2.4	คอนแทคของรีเลย์	16
2.5	คอนแทคของรีเลย์	16
2.6	ทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	19
2.7	พารามิเตอร์ของสาย	20
2.8	ภาพตัดขวางของเคเบิลแบบ ACSR	22
3.1	โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส	25
3.2	กรอบแนวความคิด	26
3.3	Voltage Relay รุ่น PMV70	27
3.4	Wiring diagram ของ Voltage Relay รุ่น PMV70	27
3.5	ตัวต้านทาน	28
3.6	ตัวเหนี่ยวนำ	29
3.7	ตัวเก็บประจุ	30
3.8	Single line Diagram ของแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส	31
3.9	ด้านหน้าของตู้คอนโทรล	31
3.10	ด้านหลังของฝาตู้คอนโทรล	32
3.11	ชั้นบนของตู้คอนโทรล	32
3.12	ชั้นกลางของตู้คอนโทรล	32
3.13	ชั้นล่างของตู้คอนโทรล	33
4.1	ผลการทดลองการปรับตั้งค่า Configurable rated voltage (Ue) เท่ากับ 400	39
4.2	ผลการทดลองการปรับตั้งค่า Configurable rated voltage (Ue) เท่ากับ 380	40
4.3	operating value ที่การปรับตั้งค่า Ue เท่ากับ 380 และ voltage max (%Ue) เท่ากับ 105	41
4.4	release value ที่การปรับตั้งค่า Ue เท่ากับ 380 และ voltage max (%Ue) เท่ากับ 105	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.5	operating value ที่การปรับตั้งค่า Ue เท่ากับ 380 และ voltage min (%Ue) เท่ากับ 95	41
4.6	release value ที่การปรับตั้งค่า Ue เท่ากับ 380 และ voltage min (%Ue) เท่ากับ 95	42
4.7	แรงดันไฟฟ้าต้นสาย (V_S) และ แรงดันไฟฟ้าปลายสาย (V_R)	42

บทที่ 1
บทนำ

อุปกรณ์ป้องกันสายส่งกำลังไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อระบบส่ง และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่จะช่วยในการป้องกันความเสียหายหรือผลกระทบต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นได้อันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตไฟฟ้า ภัยทางธรรมชาติและสิ่งมีชีวิต ซึ่งส่งผลเสียทำให้เกิดความไม่ปกติของแรงดัน กระแสไฟฟ้าและความถี่ในระบบส่ง และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานไฟฟ้ากลายเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ในปัจจุบันและการพัฒนาประเทศปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในอัตราที่สูงขึ้นเรื่อยๆ อันเนื่องมาจากการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจและสังคมรวมทั้งการพัฒนาทางด้านต่างๆของประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านการพัฒนาอุตสาหกรรม เมื่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าขยายตัวมากยิ่งขึ้น ในขณะที่เกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ย่อมเกิดผลเสียหายต่อระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบไฟฟ้าใหญ่ขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลขณะลัดวงจรจะสูงมาก เพื่อที่จะป้องกันระบบไฟฟ้าให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น แก่ระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้ากรณีระบบผิดปกติ อุปกรณ์ป้องกันจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะช่วยในการป้องกันผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้น แต่การที่จะใช้อุปกรณ์ป้องกันให้ถูกต้องนั้นจำเป็นจะต้องรู้ถึงหลักการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันแต่ละตัวอย่างแท้จริงด้วยเหตุนี้จึงมีความประสงค์ที่จะสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟสนี้ขึ้นมา เพื่อใช้ในการทดลอง เรียนรู้ วิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นและนำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการทำงานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างแบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส
2. เพื่อให้เข้าใจหลักการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง
3. เพื่อให้เข้าใจวิธีการใช้อุปกรณ์ป้องกันสายส่งสามเฟสที่ถูกต้อง

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1. สร้างแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส จำนวน 1 ชุด
2. วัดค่าต่างๆ จากแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟสได้ เช่น ค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า
3. อุปกรณ์ป้องกันสามารถตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบสายส่งสามเฟสได้
4. มีเอกสารประกอบการทดลอง

1.4 แนวทางการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2555															
	มิ.ย.		ก.ค.		ส.ค.		ก.ย.		ต.ค.		พ.ย.		ธ.ค.		ม.ค.	
1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน																
2. ออกแบบและจัดซื้ออุปกรณ์																
3. สร้างแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส																
4. ตรวจสอบความถูกต้องของโครงงาน																
5. ทดสอบและบันทึกผลการทดลอง																
6. ปรับปรุงและแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ																
7. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง																
8. เรียบเรียงเอกสาร																
9. จัดทำปริญญานิพนธ์																

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส
2. เข้าใจหลักการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง
3. เข้าใจวิธีการใช้อุปกรณ์ป้องกันสายส่งสามเฟสที่ถูกต้อง

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยทฤษฎีด้านหลักการทั่วไปของระบบป้องกัน รีเลย์ป้องกันและสายส่งกำลังไฟฟ้า

2.2 หลักการทั่วไป

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นต่อชีวิตมนุษย์ เมื่อมนุษย์พยายามพัฒนาเพื่อยกระดับความเป็นอยู่ให้ดีขึ้น ก็ย่อมมีความต้องการใช้พลังงานมากขึ้นเป็นเงาตามตัว พลังงานไฟฟ้าก็เป็นพลังงานรูปหนึ่ง ที่จำเป็นต่อมนุษย์ในปัจจุบัน และความต้องการในพลังงานรูปนี้ก็มีมากขึ้นในอัตราส่วนที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาด และสะดวกในการใช้ จึงมีการ พัฒนาระบบการผลิต การส่ง และการจ่ายพลังงานไฟฟ้ากันอย่างกว้างขวาง โดยพยายามจะให้ผู้ใช้สามารถมีพลังงานไฟฟ้า ใช้ได้ตลอดเวลา ซึ่งการจัดเช่นนี้เป็นลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งของพลังงานไฟฟ้า คือ ผู้ใช้จะสามารถใช้พลังงานไฟฟ้าได้ทันที โดยไม่ต้องแจ้งให้ผู้ผลิตทราบล่วงหน้าว่าจะใช้ เป็นต้นว่าต้องการใช้แสงสว่าง ก็เพียงแต่กดสวิทช์เปิดไฟฟ้า หรือต้องการ พลังงานขับเคลื่อนก็สตาร์ทมอเตอร์ขึ้น เป็นต้น พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงาน ที่เก็บสะสมไว้ไม่ได้ ยกเว้นในกรณีที่สะสมไว้ ในจำนวนน้อย เช่น ในกรณีของแบตเตอรี่ ดังนั้น การทความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีปริมาณเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ทำให้ผู้บริการจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ควบคุมที่สามารถปรับให้ได้พลังงานในปริมาณพอเหมาะอยู่ตลอดเวลา

เมื่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นเรื่อย ๆ ความต้องการที่จะต้องมีระบบที่เชื่อถือได้ก็มีมากขึ้นตามไปด้วย ใน ปัจจุบันนี้มีอุตสาหกรรมหลายอย่างทำงานโดยพึ่งพลังงานไฟฟ้าแต่เพียงอย่างเดียว นอกจากนั้น ที่อยู่อาศัย และสำนักงานก็ใช้ พลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก การสูญเสียพลังงานไฟฟ้า ถึงแม้จะชั่วคราวก็อาจนำความเสียหายมาให้ได้มาก เนื่องจาก ระบบพลังงานไฟฟ้านี้มนุษย์เป็นผู้คิด และประดิษฐ์ขึ้นมา จึงไม่สามารถจะเชื่อถือได้อย่างสมบูรณ์ การที่บริการไฟฟ้าใน บางส่วนจะขาดหายไปชั่วคราวก็ยังคงมีอยู่เรื่อย ๆ แต่ผู้ให้บริการก็ได้พยายามขจัดการขาดหายของบริการนี้ให้ลดน้อยลง และพยายามไม่ให้กินวงกว้างมากนัก

เมื่อพูดถึงระบบพลังงานไฟฟ้า คนส่วนใหญ่ก็มักจะนึกถึงอุปกรณ์ชิ้นใหญ่ ๆ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง ไฟฟ้า ระบบสายส่งแรงสูง เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ก็เป็นหัวใจของระบบ และเป็นส่วนที่ต้องใช้เงินลงทุนสูง แต่การที่ จะได้มาซึ่งบริการที่ดีตามความต้องการดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ก็จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อื่นในระบบเหมือนกัน ระบบรีเลย์ ป้องกันก็เป็นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบพลังงานไฟฟ้าเป็นอย่างมาก

การที่จะเข้าใจถึงความจำเป็นในการออกแบบ และการใช้ระบบรีเลย์ป้องกันนั้นอาจจะต้องพิจารณาถึงลักษณะที่ สำคัญของระบบพลังงานไฟฟ้าสักเล็กน้อยก่อน ลักษณะดังกล่าวนี้อาจจะจัดรวมกันเป็น 3 ลักษณะใหญ่ได้ดังนี้ คือ

ก. การทำงานตามปกติของระบบ

ข. การป้องกันไม่ให้เกิดการทำงานผิดปกติ หรือความเสียหายทางไฟฟ้า

ค. การจำกัดขอบเขตความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการทำงานผิดปกติทางไฟฟ้า

การทำงานตามปกติของระบบ หมายถึง การออกแบบสร้าง และจัดหาอุปกรณ์ให้เพียงพอที่จะให้บริการตามความ ต้องการใช้ไฟฟ้าที่มีในปัจจุบัน และการจัดเตรียมไว้สำหรับความต้องการในอนาคต โดยที่ในการนี้จะสมมติว่าไม่มีการทำงาน ผิดพลาดของอุปกรณ์ หรือของคนควบคุม ไม่มีการชำรุดเสียหายของอุปกรณ์ หรือไม่มีอุบัติเหตุทางธรรมชาติเลย ในการทำงานตามปกติของระบบนี้จะต้องคำนึงถึงการเลือกใช้แหล่งพลังงานที่เหมาะสม การจัดหาตำแหน่งที่เหมาะสม สำหรับ โรงไฟฟ้าแบบต่างๆ การส่งพลังงานจากแหล่งผลิตไปยังแหล่งที่ใช้ การศึกษาลักษณะความต้องการพลังงานไฟฟ้า และการวางแผนสำหรับการขยายระบบในอนาคต ระบบการวัด (metering) การปรับ และควบคุมแรงดันไฟฟ้า และความถี่ การดำเนินงานของระบบ และการบำรุงรักษาตามปกติ การจะให้ได้มาซึ่งการทำงานตามปกติของระบบในลักษณะดังที่ได้กล่าว มานี้ จะต้องมีการลงทุนสูง คือ จะเป็นส่วนที่ต้องลงทุนสูงที่สุดในการสร้างระบบพลังงานไฟฟ้า แต่ถ้าทำเพียงแค่นี้ก็ยังไม่ เพียงพอที่จะให้ได้มา ซึ่งระบบพลังงานไฟฟ้าที่ดี และเหมาะสมกับความต้องการในปัจจุบัน คือ เมื่อเกิดการขัดข้องหรือ ชำรุดเสียหายขึ้นในอุปกรณ์แล้วจะทำให้ต้องสูญเสียพลังงานไฟฟ้าไป จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่จะจำกัดขอบเขตความเสียหาย ที่อาจจะเกิดขึ้นต่ออุปกรณ์เหล่านี้ และตัดวงจรตรงส่วนที่ชำรุดออกจากระบบอย่างรวดเร็วทันการ

การแก้ปัญหาที่อาจทำได้ 2 วิธี คือ

1. ออกแบบระบบ และเลือกใช้อุปกรณ์ซึ่งมุ่งหวังที่จะป้องกันมิให้เกิดความเสียหายขึ้น
2. ออกแบบ และใช้อุปกรณ์ที่มุ่งหวังจะลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการทำงานผิดปกติ เช่น การลัดวงจร ในระบบไฟฟ้า

ในปัจจุบันก็มีการใช้วิธีการทั้งสองนี้ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสม การออกแบบ และเลือกใช้ อุปกรณ์เพื่อป้องกันความเสียหายไม่ให้เกิดขึ้นเลยนั้น จะต้องเสียค่าลงทุนสูงมาก และ ในบางกรณีก็อาจทำไม่ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมที่สุด คือ ออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์เพื่อป้องกันความเสียหาย เท่าที่จะทำได้ เช่น การใช้ฉนวนที่เหมาะสม การใช้อุปกรณ์ดักฟ้าผ่า (lightning-arrester) การออกแบบเพื่อลดโอกาสที่ จะเกิดการลัดวงจรลงให้น้อยที่สุด การดำเนินการควบคุม (operation) และการบำรุงรักษาที่ดี ฯลฯ ซึ่งทั้งนี้ย่อมแล้วแต่ความเหมาะสมทางด้าน

ค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนที่จะได้รับ โดยจะยอมให้มีการทำงานผิดปกติขึ้นบ้างและเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะต้องมีการใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมเพื่อจำกัดผลเสียหายต่อชีวิต ต่ออุปกรณ์ และบริการให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้วิธีการ หลังนี้ก็คือ การออกแบบระบบให้สามารถลดผลเสียอันสืบเนื่องมาจากการทำงานผิดพลาดให้ลดน้อยลง เช่น ออกแบบระบบให้มีค่ากระแสลัดวงจรอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ การใช้อุปกรณ์บางอย่างเพื่อลดค่ากระแสลัดวงจร เช่น ขดลวดรีแอคแทนซ์ปิเตอร์เซน (Petersen coil) การออกแบบ และใช้ระบบรีเลยป้องกัน ที่เหมาะสม และเชื่อถือได้ ใช้ไกตัดวงจร (circuit breaker) ที่เหมาะสม ฯลฯ

ดังนั้น จะเห็นว่าระบบรีเลย์ป้องกัน คือ ระบบหนึ่งที่จะช่วยลดความเสียหายต่ออุปกรณ์ และบริการให้ลดน้อยลง เมื่อเกิดการลัดวงจร หรือการทำงานผิดปกติในระบบได้ แต่การจะลดความเสียหายหรือทำให้ระบบทำงานดีขึ้นนี้ก็มิใช่เนื่องจาก ระบบรีเลย์ป้องกันเพียงอย่างเดียว ระบบอื่นที่เกี่ยวข้องก็จะต้องดีด้วย ดังนั้น การพิจารณาเลือกใช้ระบบรีเลย์ป้องกันให้ได้ ผลดีนั้น จะต้องพิจารณาลักษณะอื่น พร้อมกันไปด้วยมิใช่ว่าเมื่อออกแบบระบบเรียบร้อยแล้วก็จะออกแบบระบบ รีเลย์ป้องกัน

หน้าที่ของระบบรีเลย์ป้องกัน คือ จะต้องแยกส่วนใดส่วนหนึ่งออกจากระบบทันที เมื่อเกิดมีการลัดวงจรขึ้น หรือ เมื่อเริ่มมีการทำงานผิดปกติเกิดขึ้น ซึ่งอาจจะทำความเสียหาย หรือทำให้การทำงานของระบบไม่เป็นไปด้วยดี ในการที่จะ ทำเช่นนี้จะต้องมีไกตัดวงจร ซึ่งมีขนาดที่เหมาะสมและสามารถที่จะตัดกระแสนั้น ได้เข้าช่วยด้วย หรือจะพูดอีกอย่างหนึ่ง ก็คือ รีเลย์ป้องกันเป็นตัวที่คอยสอดส่องดูแลว่ามีการทำงานผิดปกติ หรือการลัดวงจรเกิดขึ้นหรือไม่ คือ ทำหน้าที่เหมือน เป็นยาม ถ้าไม่มีอะไรผิดปกติก็จะอยู่เฉย แต่ถ้ามีอะไรผิดปกติเกิดขึ้น เช่น การลัดวงจร ซึ่งถ้ารุนแรงพอ สมควร (แล้วแต่ จะกำหนด) รีเลย์ก็จะสั่งให้ไกตัดวงจรที่มันควบคุมอยู่ทำการตัดวงจรทันที (โดยปกติคือ จะปิดคอนแทคของวงจรปลดปล่อย หรือ ทริพ (trip circuit) ของไกตัดวงจร) ไกตัดวงจรก็จะจัดการเปิดวงจรเพื่อแยกเอาส่วนที่เกิดการทำงานผิดปกตินั้นออก จากระบบทันที เพื่อไม่ให้ความเสียหายลุกลามออกไป หรือทำให้ระบบทำงานไม่ได้ ซึ่งในการนี้จะต้องจัดวางไกตัดวงจรไว้ ในตำแหน่ง ซึ่งสามารถแยกเอาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง บัส (bus bar) สายส่ง ฯลฯ ออกจากระบบได้ตามต้องการ นอกจากนั้น ไกตัดวงจรเหล่านี้ยังต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะทนค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นและสามารถตัดกระแส นั้น ๆ ได้โดยไม่ชำรุดเสียหาย

หน้าที่อีกอย่างหนึ่งของรีเลย์ป้องกัน คือ บอกตำแหน่งและชนิดของการทำงานผิดปกติที่เกิดขึ้น ข้อมูลเหล่านี้ นอกจากจะช่วยให้การซ่อมแซมเร็วขึ้นแล้ว ยังจะช่วยทำให้สามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบในการวิเคราะห์ ว่าระบบป้องกัน ที่ออกแบบไว้นั้นมีความเหมาะสมเพียงใด ซึ่งก็รวมถึงระบบรีเลย์ป้องกันด้วย

ระบบพลังงานไฟฟ้าที่ดีนั้นจะต้องมีการป้องกันที่เหมาะสม ซึ่งความเหมาะสมดังกล่าวนี้ ก็เป็นเรื่องที่พูดลำบาก อาจจะคิดว่าระบบการป้องกันนั้นควรจะออกแบบให้ดีที่สุด และมากที่สุดเท่าที่

จะทำได้ เพื่อป้องกัน และลดความเสียหายให้ เหลือน้อยที่สุด แต่การทำเช่นนี้ต้องใช้เงินลงทุนสูงเกินไปจนไม่คุ้มกับผลตอบแทนที่จะได้รับ แต่ถ้าใช้ระบบป้องกันให้น้อย ที่สุดเพื่อลงทุนน้อยก็อาจจะไม่ดี คือ ความเสียหายอาจจะเกิดขึ้น หรือมีผลเสียหายอย่างร้ายแรง รายจ่ายในการซ่อมแซมก็ อาจสูงมากด้วย ถ้าเครื่องชำรุดมาก ดังนั้น วิธีที่ดีควรจะดำเนินไปในทางสายกลาง ซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมของแต่ละระบบ และการพิจารณาผลดีและผลเสีย ซึ่งเนื่องจากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างค่าใช้จ่ายในการลงทุน และผลตอบแทนที่จะได้รับ การกระทำเช่นนี้ไม่ใช่เรื่องง่าย และบางครั้งก็บอกไม่ได้แน่นอนว่าจะต้องเป็นอย่างไร ซึ่งวิธีการจริงๆ แล้ว จะขึ้นอยู่กับลักษณะและความสำคัญของระบบ และการตัดสินใจของผู้ออกแบบ หรือพูดอีกอย่างหนึ่ง ระบบรีเลย์ป้องกันเหมือนกับการประกันภัย ซึ่งผู้ใช้จะต้องชั่งใจดูว่าจะประกันถึงขนาดไหนจึงจะเพียงพอ ถ้าประกันมากผลอาจจะดีกว่า แต่ต้อง เสียเงินมาก ถ้าประกันน้อย ถึงแม้จะเสียเงินน้อยแต่ถ้าเกิดความเสียหายก็จะได้ผลตอบแทนน้อยมากจนไม่คุ้ม ฉะนั้น การออกแบบระบบรีเลย์ป้องกันนอกจากจะเป็นศาสตร์อันหนึ่งแล้ว ยังอาจถือได้ว่าเป็นศิลปะด้วยเหมือนกัน

ระบบรีเลย์ที่ใช้ในการป้องกันการทำงานผิดปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลัดวงจรนั้น แบ่งออกเป็น 2 ชั้น ดังนี้คือ

ก. ระบบรีเลย์หลัก หรือชั้นต้น (primary relaying) ซึ่งเป็นระบบที่จะทำงาน เป็นอันดับแรกเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น

ข. ระบบรีเลย์รอง หรือชั้นที่สอง (secondary or back-up relaying) ซึ่งจะทำงานก็ต่อเมื่อระบบรีเลย์ชั้นต้นไม่ทำงาน

2.2.1 ระบบรีเลย์หลักหรือชั้นต้น ในการป้องกันระบบไฟฟ้านั้นจะต้องออกแบบจัดระบบรีเลย์ให้สามารถป้องกันได้ทั้งระบบ ไม่ว่าการลัดวงจรจะเกิดขึ้นที่ใด รีเลย์จะต้องสามารถรู้ และสั่งให้มีการตัดวงจรส่วนที่เสียออกจากระบบได้ โดยพยายามแยกส่วนที่เสียออกให้น้อยที่สุด เท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ได้มาซึ่งการป้องกันนี้ โดยมากจะแบ่งเขตป้องกันออกเป็นเขต ๆ แล้วจัดรีเลย์ให้ป้องกันในแต่ละเขตของตน เขตที่จัดแบ่งโดยมากจะจัด ดังนี้

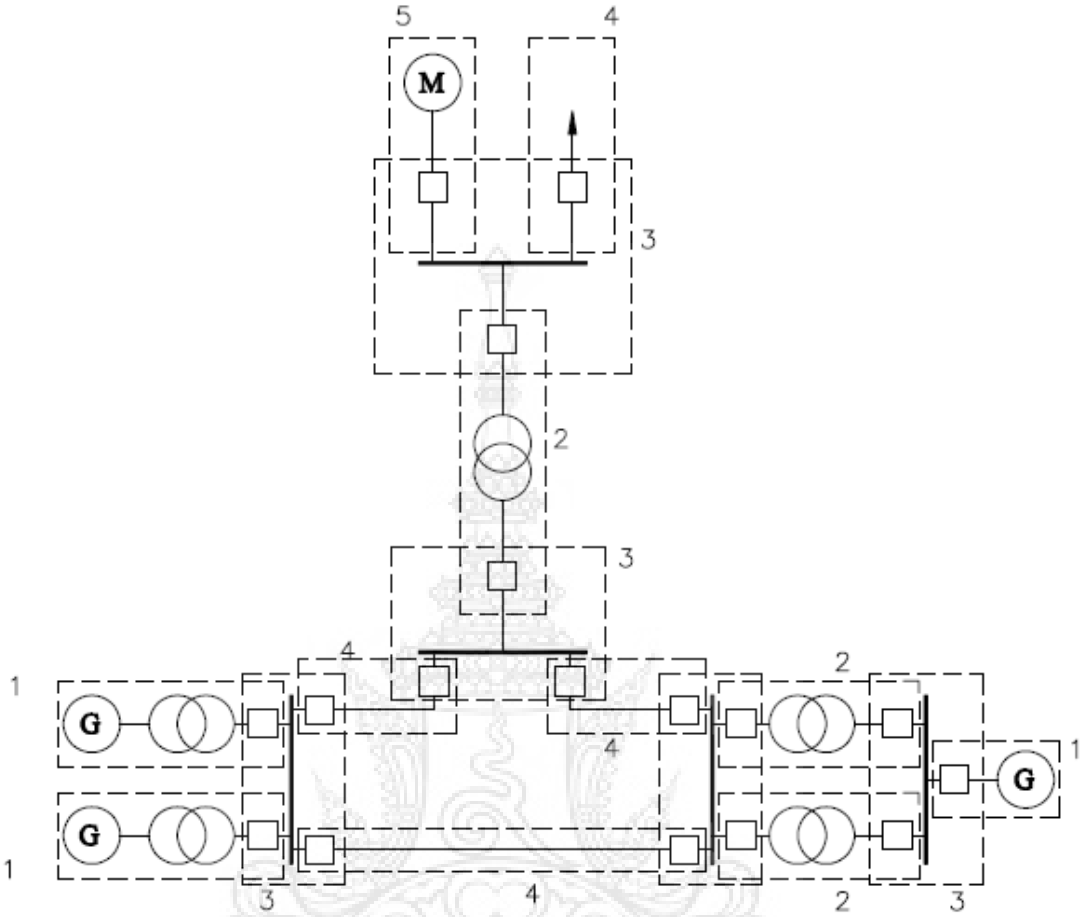
1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า-หม้อแปลง ที่ทำงานเป็นหน่วยเดียวกัน (generator or generator transformer unit)
2. หม้อแปลง (transformer)
3. บัส (bus-bar)
4. สายส่ง หรือสายจ่าย (transmission line or distribution line)
5. มอเตอร์ (motor)

ในการแบ่งเขตป้องกันนี้จะต้องติดตั้งไกตัดวงจรในแต่ละส่วน เพื่อให้สามารถแยกแต่ละส่วนนั้นออกได้ นอกจากนั้น เขตป้องกันที่แบ่งนั้นจะต้องให้คาบเกี่ยวกัน (overlap) อยู่ด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้มีจุดบอดขึ้นในระบบป้องกัน ถ้าไม่คาบ เกี่ยวกันอยู่อาจจะเกิดการลัดวงจรขึ้นในจุดที่อยู่ระหว่างเขตสองเขต แล้วจะไม่มีรีเลย์ตัวใดล่วงรู้ได้เลย ซึ่งจะเกิดผลเสียหาย ร้ายแรง เขตป้องกันนี้แสดงไว้ในรูป 2.1

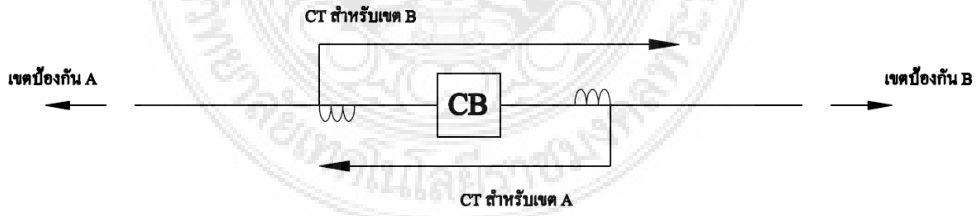
การทำให้เขตป้องกันคาบเกี่ยวกันนี้มีผลเสียอยู่บ้าง คือ เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น ในส่วนที่คาบกันอยู่ รีเลยในทั้งสอง เขตจะสั่งตัดวงจรของทั้ง 2 เขต ทำให้เกิดการตัดวงจรออกมากเกินความจำเป็น แต่ก็ยังดีกว่าที่จะปล่อยให้มีจุดบอด ซึ่ง ไม่ได้ป้องกันไว้ และอีกอย่างหนึ่ง โอกาสที่การลัดวงจรจะเกิดขึ้นในจุดดังกล่าวมีน้อย ฉะนั้น การตัดวงจรเกินความจำเป็นนั้น จะเกิดขึ้นไม่บ่อยครั้งนัก

จากรูป 2.1 จะเห็นว่าเมื่อเกิดมีการลัดวงจรขึ้นที่ใดก็ตาม (ยกเว้นในช่วงที่เกี่ยวคาบกันอยู่) ด้วยการแบ่งเขตป้องกัน ดังกล่าวนี้จะทำให้มีการตัดวงจรในบริเวณที่น้อยที่สุด ดังนั้นวิธีการอันนี้จึงเป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป

2.2.2 ระบบรีเลย์รอง หรือชั้นที่สอง ระบบรีเลย์รอง เป็นระบบที่ติดตั้งไว้ให้ทำงานในกรณีที่ระบบรีเลย์หลักไม่ทำงานอันอาจจะเนื่องจากเสีย หรือเหตุ อันใดก็ตาม ซึ่งโดยมากจะใช้ระบบรีเลย์ชั้นที่สองเฉพาะในกรณีที่ต้องการป้องกันการลัดวงจรเท่านั้น เนื่องจากการลัดวงจร เป็นการทำงานผิดปกติที่เกิดขึ้นบ่อย และรุนแรงที่สุด ดังนั้น โอกาสที่ระบบรีเลย์หลักจะไม่ทำงานจึงมีมาก สำหรับรีเลย์ที่ใช้ในหน้าที่อื่นที่ไม่ใช่เพื่อป้องกันการลัดวงจร โดยมากมักไม่ใช้ระบบรีเลย์ชั้นที่สองเพราะจะทำให้ราคาแพงขึ้นมาก



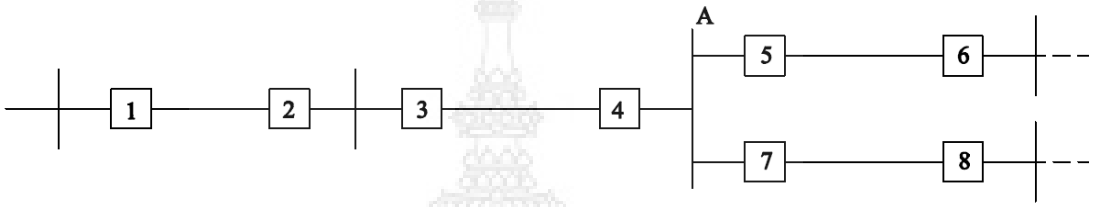
รูปที่ 2.1 แสดงการแบ่งเขตป้องกันสำหรับรีเลย์หลักในระบบไฟฟ้า การทำเขตป้องกันให้คาบเกี่ยวกันนี้จะทำได้โดยให้แต่ละเขตอ้อมรอบไกตัดวงจรแต่ละตัวโดยต่อหม้อแปลงดังใน รูป 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการต่อหม้อแปลงกระแสเพื่อจัดให้เขตป้องกันคาบเกี่ยวกัน

สาเหตุที่จะทำให้ระบบรีเลย์หลักไม่ทำงานนั้นมีหลายประการด้วยกัน เช่น เนื่องจากแหล่งจ่ายกระแส หรือแรงดัน ไฟฟ้าที่ให้กับรีเลย์ขัดข้องหรือขาดหายไป แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับปลดปล่อย หรือทริพ (trip) ขาดหายไป ตัวรีเลย์เองเสีย วงจรปลดปล่อย หรือ ทริพ

หรือกลไกของไกตัดวงจรชำรุด หรือไกตัดวงจรเองชำรุด หรือขัดข้องไม่ทำงาน ฯลฯ ดังนั้นในการจัดระบบรีเลย์รองจึงควรพยายามหลีกเลี่ยงการใช้อุปกรณ์ หรือวิธีการที่ซ้ำกับระบบรีเลย์หลัก ทั้งนี้เพื่อ ป้องกันมิให้สาเหตุที่ทำให้รีเลย์หลักไม่ทำงานมาทำให้ระบบรีเลย์รองไม่ทำงานไปด้วย ซึ่งการจะทำเช่นนี้ได้ก็ต่อเมื่อระบบ รีเลย์รองไม่ใช้อุปกรณ์ หรือควบคุมอุปกรณ์ตัวเดียวกันกับรีเลย์หลักเลย และถ้าเป็นไปได้ก็มักจะให้รีเลย์รองนี้อยู่คนละ ตำแหน่งกันกับรีเลย์หลัก คือ อยู่คนละสถานีกัน สมมติว่า มีระบบสายส่งดังแสดงไว้ในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงระบบสายส่ง

ในการป้องกันนั้น สำหรับระบบรีเลย์หลักจะป้องกันตามลักษณะนี้คือในช่วงสาย 1-2 จะใช้รีเลย์ และไกตัดวงจร ในตำแหน่ง 1 และ 2 เป็นรีเลย์หลัก ช่วง 3-4 ก็จะใช้รีเลย์ 3 และ 4 ฯลฯ สำหรับระบบรีเลย์รองนั้นตามปกติจะจัดไว้ ในที่ที่ต่างกัน เช่น การป้องกันช่วงสายระหว่าง 3-4 จะมีรีเลย์รองอยู่ที่ 1, 6 และ 8 คือ รีเลย์ในตำแหน่งเหล่านี้จะสั่งการ ปลดปล่อย หรือทริพ ไกตัดวงจรในตำแหน่ง 1, 6 และ 8 ในกรณีที่รีเลย์หลัก 3-4 ไม่ทำงานตามที่กำหนด เช่น ถ้าเกิด การลัดวงจรขึ้นในช่วงระหว่าง 3-4 ถ้าไกตัดวงจรที่ 3 ไม่ตัดวงจรในช่วงเวลาที่กำหนด รีเลย์รองซึ่งอยู่ที่ 1 จะสั่งไกตัดวงจรที่ 1 ให้ตัดวงจรออก หรือถ้าไกตัดวงจรที 4 ไม่ตัดวงจรออก ไกตัดวงจรที่ 6 และ 8 ก็จะทำงานแทน เนื่องจากรีเลย์และ ไกตัดวงจรซึ่งใช้เป็นรีเลย์รองอยู่คนละตำแหน่งกับรีเลย์หลัก โอกาสที่รีเลย์เหล่านี้จะไม่ทำงานเนื่องด้วยสาเหตุเดียวกันกับรีเลย์หลักก็จะมีน้อย

ระบบรีเลย์รองที่ 3, 6 และ 8 จะป้องกันการเกิดลัดวงจรที่บัส A ด้วย ในกรณีที่ไกตัดวงจรที่บัสไม่ทำงาน

รีเลยที่ 3 และ 6 ก็จะเป็นรีเลย์ชั้นรอง สำหรับช่วงสายระหว่าง 7 กับ 8 ด้วย

แต่ก็มีบางกรณีที่การจัดระบบรีเลย์รองจะทำตามหลักการที่ว่าไม่ได้ และอาจจะต้องอยู่ที่บัสเดียวกัน หรือในบาง กรณีก็อาจจะทำระบบรีเลย์รองไม่ได้เลย

หน้าที่อีกอย่างหนึ่งของระบบรีเลย์รอง คือ ใช้เป็นระบบป้องกันหลักเมื่อมีการซ่อมแซม หรือบำรุงรักษารีเลย์ที่ใช้เป็นรีเลย์หลัก

จะเห็นว่าเมื่อระบบรีเลย์รองทำงาน ส่วนที่จะถูกแยกออกไปจากระบบจะกินบริเวณกว้างขึ้นกว่าในกรณีที่ระบบ รีเลย์หลักทำงาน แต่ก็จำเป็นต้องทำถ้าต้องการจะให้ได้ความแน่นอนในการทำงานดังได้กล่าวมาแล้ว และเมื่อเป็นเช่นนี้การ ทำงานของระบบรีเลย์รองก็จำเป็นจะต้องถ่วงเวลาไว้เพื่อให้โอกาสรีเลย์หลักทำงานก่อน ถ้ามันจะทำได้คือเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น ระบบรีเลย์ทั้งหลัก และรอง จะเริ่มทำงาน แต่ระบบรีเลย์หลักจะใช้เวลาในการสั่งทริพไกตัดวงจรเร็วกว่า และเมื่อรีเลย์หลักสั่งทริพแล้ว รีเลย์รองก็ควรจะคืนสู่สภาวะเดิม (reset) แต่ถ้ารีเลย์หลักไม่ทำงานในช่วงเวลาที่กำหนดไว้ แล้วเท่านั้นรีเลย์รองจึงจะทำงานสั่งทริพไกตัดวงจร

2.2.3 การป้องกันการทำงานผิดปกติอย่างอื่นของระบบไฟฟ้า ในการป้องกันสภาวะหรือการทำงานผิดปกติอย่างอื่นของระบบนอกเหนือไปจากการลัดวงจรนั้น อาจจัดอยู่ใน จำพวกระบบรีเลย์หลักได้ การป้องกันภาวะผิดปกติดังกล่าว อาจจะแตกต่างกัน สำหรับส่วนของระบบที่ต่างกัน ดังนั้นการจัดเขตป้องกันให้คาบเกี่ยวกันเหมือนในกรณีการลัดวงจรนั้นก็อาจจะทำไม่ได้ การป้องกันอาจจะต้องทำแยกกันสำหรับส่วน ต่าง ๆ โดยที่การป้องกันแต่ละส่วนอาจจะไม่ขึ้นอยู่ซึ่งกันและกันเลย รีเลย์ที่ใช้ในการนี้อาจจะเป็นตัวส่งสัญญาณ หรือสั่งทริพไกตัดวงจรตัวเดียวกันกับรีเลย์ป้องกันการลัดวงจรหรือสั่งทริพไกตัดวงจรคนละตัวก็ได้แล้วแต่กรณี สำหรับกรณีนี้มัก จะไม่ทำระบบรีเลย์รองดังได้กล่าวมาแล้ว แต่ในบางโอกาสรีเลย์ที่ป้องกันการลัดวงจรอาจจะทำหน้าที่ป้องกันชั้นสองไปด้วย ก็ได้ ถ้าสภาวะผิดปกตินี้ทำให้เกิดค่ากระแสหรือแรงดันผิดปกติมากพอจะทำให้มันทำงานได้

2.2.4 ลักษณะความต้องการของระบบรีเลย์ป้องกัน ในการออกแบบใช้ระบบรีเลย์ในระบบพลังงานไฟฟ้านั้น มีการแบ่งระบบทั้งหมดออกเป็นส่วน ๆ เพื่อแยกเขต ป้องกันในแต่ละส่วนออกตามความเหมาะสมดังได้กล่าวแล้วใน 2.2.1 และในแต่ละส่วนก็จะมีวิธีการเฉพาะ ซึ่งอาจจะแตกต่าง จากส่วนอื่นก็ได้ แต่หลักการใช้ระบบรีเลย์ก็มีส่วนที่เป็นข้อกำหนด หรือเป็นลักษณะความต้องการที่รีเลย์ หรือระบบรีเลย์ จะต้องมีดังนี้ คือ

ก. ความไว (sensitivity) รีเลย์จะต้องไวพอที่รู้ถึงความผิดปกติที่อาจจะเกิดขึ้นในระบบไม่ว่าจะอยู่ ในภาวะใดก็ตาม เพื่อที่จะสามารถทำงานได้อย่างแน่นอนเมื่อถึงคราวจำเป็นต้องทำ โดยทั่วไปแล้วเวลาที่ใช้ในการตัดวงจรจะขึ้นอยู่กับระดับของแรงดันของระบบด้วย ระบบ 6-10 เควี จะต้องตัดวงจรภายในเวลา 1.5-3.0 วินาที ระบบ 100-220 เควี จะต้องตัดวงจรภายในเวลา 0.15-0.3 วินาที ระบบ 300-500 เควี จะต้องตัดวงจรภายในเวลา 0.1-0.12 วินาที

ข. ความสามารถแยกแยะ (selectivity) รีเลย์จะต้องสามารถแยกแยะได้ว่าในภาวะใดจะต้องทำงานทันที และในภาวะใดไม่ต้องทำงาน หรือทำงานตามเวลาที่ถ่วงไว้ตามต้องการ

ค. ความเร็ว (speed) รีเลย์จะต้องมีความเร็วสูงตามที่ต้องการ ความเร็วนี้อาจเป็นตัวที่จะช่วยลดความเสียหายได้มาก ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรอย่างรุนแรง หรืออาจจะ ช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบไว้ก็ได้

ง. ความแน่นอนหรือความเชื่อถือได้ (reliability) รีเลย์จะต้องเป็นที่เชื่อถือได้ในการทำงาน คือ ถ้าเกิดผิดปกติขึ้นในระบบ รีเลย์จะต้องทำงาน เพราะถ้ารีเลย์ไม่ทำงานแล้วส่วนอื่น ๆ ในระบบที่ใช้ ในการป้องกัน ก็จะไม่มีความหมายอะไร

จ. ความง่าย (simplicity) รีเลย์ควรจะมีโครงสร้างที่ไม่ยุ่งยาก มีความแข็งแรง และใช้วงจรที่ง่ายที่สุดเท่าที่จะทำได้

ฉ. ประหยัด (economy) รีเลย์จะต้องเป็นแบบที่ให้การป้องกันที่เหมาะสม และราคาถูกที่สุดเท่าที่จะทำได้

ที่กล่าวมาแล้วนี้ คือ ข้อกำหนด หรือลักษณะความต้องการที่รีเลย์ และระบบรีเลย์ควรจะมี แต่ในทางปฏิบัติก็อาจจะ เป็นการยากที่จะทำได้ตรงตามข้อกำหนดเหล่านี้ทุกข้อ จึงอาจต้องพิจารณาตามความเหมาะสมของระบบแต่ละระบบ

การเลือกใช้ระบบรีเลย์นี้มิใช่ว่าจะเลือกเฉพาะตัวรีเลย์เองเท่านั้น ยังจะต้องเลือกอุปกรณ์อื่น เช่น แหล่งจ่ายกระแส หรือแรงดันไฟฟ้าที่จะใช้ร่วมกับรีเลย์ให้เหมาะสมด้วย ถ้าเลือกรีเลย์ดี แต่อุปกรณ์อื่น ที่ใช้ร่วมไม่เหมาะสมก็อาจจะไม่ได้ การทำงานที่ดีของรีเลย์ก็ได้

ในระบบพลังงานไฟฟ้า อุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่ใช้มักจะทำงานอยู่อย่างสม่ำเสมอ แต่สำหรับรีเลย์ไม่เป็นเช่นนั้น คือ รีเลย์ อาจจะติดตั้งอยู่กับระบบเป็นเวลานานโดยไม่ได้ทำงานเลยก็ได้ถ้าไม่เกิดภาวะผิดปกติขึ้นในเขตป้องกันของมัน ถึงแม้ในส่วน ที่เกิดการลัดวงจรบ่อย เช่น ในสายส่งรีเลย์บางตัวก็อาจจะทำงานปีหนึ่งไม่กี่ครั้ง ในส่วนอื่นอาจจะมีรีเลย์บางตัว ซึ่งอยู่เป็นปีโดยไม่ได้ทำงานเลย การที่รีเลย์อยู่เฉย ๆ เป็นเวลานานเช่นนี้ก็อาจจะทำให้เกิดการฝืด เนื่องจากฝุ่นละออง ความชื้น หรือสาเหตุอื่นก็ได้ ถ้าไม่มีการบำรุงรักษาที่ถูกต้อง รีเลย์ก็อาจไม่ทำงานได้ เมื่อถึงคราวจำเป็นต้องทำ ดังนั้น การบำรุงรักษา เป็นประจำ และถูกต้องจึงมีส่วนสำคัญในความแน่นอนในการทำงานของรีเลย์อยู่มาก

2.3 รีเลย์ Relay เราอาจจะให้คำจำกัดความของรีเลย์ได้ ดังนี้

รีเลย์ (Relay) คือ อุปกรณ์ที่วัด หรือรับสัญญาณควบคุม และต่อจากนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่กำหนดไว้ล่วงหน้าแล้วในวงจรไฟฟ้าทางออก (Output Circuit) หนึ่งวงจร หรือมากกว่า

รีเลย์ป้องกัน (Protective Relay) คือ รีเลย์ที่ จะทำงานเมื่อเกิดภาวะผิดปกติ ในระบบกำลังงานไฟฟ้า และจะไปควบคุมไกตัดวงจรเพื่อให้ตัดวงจรแยกส่วนที่เสีย (คือส่วนที่มีการลัดวงจร) ออกจากระบบ โดยให้มีการขาดหายใน ด้านบริการของระบบ (service) น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยปกติค่าต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าของแรงดันไฟฟ้า และค่าของกระแสไฟฟ้าจะส่งผ่านหม้อแปลงแรงดัน (Potential Transformer) หรือหม้อแปลงกระแส (Current Transformer) ไปยังรีเลย์ รีเลย์ก็จะวัดและ ตีความหมายของค่านั้น ๆ ซึ่งอาจจะเป็นค่าเดียว หรือหลายค่าก็ได้ เพื่อจะป้องกันระบบไฟฟ้า ดังนั้น รีเลย์จึงเป็นเครื่องมือที่ จะทำงานเมื่อสภาวะในวงจรไฟฟ้าหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปในทำนองที่จะทำให้การทำงานของเครื่องอุปกรณ์ หรือเครื่องจักร ของวงจรเดียวกันนี้หรือวงจรอื่นเปลี่ยนแปลงไปด้วย รีเลย์ในยุคแรกๆ มักจะเป็นแบบไฟฟ้ากล (electromechanical) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายเป็นเวลานาน จนกระทั่งในปัจจุบันก็ยังนิยมใช้กันอยู่มาก ทั้งนี้เนื่องจากมีโครงสร้าง และการทำงาน ที่ง่าย และทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ รีเลย์ที่ใช้ในระบบกำลังงานไฟฟ้า จะต้องเป็นเครื่องที่เชื่อถือได้ (reliable) เพราะ อาจจะต้องติดตั้งอยู่เป็นเวลานานโดยไม่ได้ทำงาน และไม่ได้รับการบำรุงรักษา และตรวจสอบ แต่ต้องพร้อมที่จะทำงาน ด้วยความรวดเร็ว และถูกต้อง เมื่อถึงคราวจำเป็น ดังนั้น ในปัจจุบันนี้ รีเลย์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในระบบกำลังงานไฟฟ้าก็ยังคง เป็นแบบนี้อยู่

ได้เคยมีการสร้างรีเลย์ และระบบรีเลย์แบบที่ใช้หลอดสูญญากาศ (vacuum tube) ขึ้นมาเหมือนกัน แต่โดยมาก มักไม่นิยมใช้ในระบบกำลังงานไฟฟ้า เนื่องจากมีความไม่แน่นอนในการทำงาน ซึ่งบางครั้งก็เนื่องจากหลอดไหม้ หรือลักษณะ การทำงานและสมรรถนะ (performance characteristics) เปลี่ยนแปลงไป ทำให้การใช้รีเลย์แบบนี้ไม่ค่อยเหมาะสำหรับ ใช้ระบบกำลังงานไฟฟ้า

ในช่วงปีหลัง ๆ นี้ ได้มีการพัฒนา และสร้างรีเลย์แบบสแตติค (static) หรือ โซลิดสเตท (solid state) ขึ้นใช้ ซึ่งก็เป็นที่ยอมรับ และนิยมใช้กันมากขึ้นเรื่อย ๆ ในระบบป้องกันของระบบกำลังไฟฟ้านั้น ได้มีการออกแบบวงจรให้มีลักษณะ การทำงาน (operating characteristics) ที่ไม่ต้องขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการทำงานของชิ้นส่วนแต่ละชิ้น ซึ่งอาจจะเปลี่ยนแปลงไปอันสืบเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนหรือเนื่องจากอายุในรีเลย์ และระบบรีเลย์แบบนี้อาจจะทำให้ เวลาทำงานสนองตอบ (response time) สั้นเท่าไรก็ได้ตามที่ต้องการ คือ ชิ้นส่วน หรือส่วนประกอบพื้นฐาน (basic components) ส่วนใหญ่จะทำงานได้เร็วมาก บางครั้ง เร็วเกินไปจนต้องเพิ่มวงจรถ่วง

เวลา (delay circuit) เพื่อหลีกเลี่ยง การทำงานผิดพลาดอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ (transient) ซึ่งเกิดขึ้นในวงจรกำลังไฟฟ้า การใช้รีเลย์ในการ ทำงานแบบต่าง ๆ ในระบบป้องกันนั้น อาจจะทำได้โดยใช้วงจรแบบโซลิดสเตทแบบต่างๆ ได้หลายแบบด้วยกัน ดังนั้น จึงเป็นการยากที่จะแสดงวงจรแบบโซลิดสเตทหลัก ๆ ที่ใช้ในการป้องกันแต่ละแบบได้ แต่อย่างไรก็ตามในที่นี้ก็จะให้ตัวอย่างบางตัวอย่างไว้โดยสังเขป

หลักการในการป้องกันวงจรในระบบกำลังงานไฟฟ้า ไม่ขึ้นอยู่กับแบบ หรือชนิดของรีเลย์ที่ใช้ เป็นต้นว่า ถ้ากระแส ในวงจรไฟฟ้า หรือในเครื่องจักรไฟฟ้าสูงกว่าค่าที่กำหนด หรือค่าที่ยอมให้ใช้ได้ ก็จำเป็นต้องหาวิธีการที่จะป้องกันความเสียหาย อุปกรณ์ที่จะสอดส่องดูแลเพื่อให้รู้ว่ามีสภาวะผิดปกติเกิดขึ้น และทำงานเพื่อแก้ไขสภาพเช่นนี้ จะเรียกว่ารีเลย์กระแสเกิน (overcurrent relay) โดยไม่คำนึงถึงว่า ตัวรีเลย์เองจะเป็นแบบไหน คือจะเป็นแบบไฟฟ้า-กล หรือ แบบใช้ความร้อน หรือแบบสแตติค ก็จะถือว่าเป็นรีเลย์แบบป้องกันกระแสเกินขนาดทั้งนั้น แต่เนื่องจากรีเลย์แบบไฟฟ้า-กล เป็นแบบที่มี โครงสร้างง่าย ๆ จึงมักจะใช้รีเลย์แบบนี้เป็นหลักในการอธิบายการทำงานของรีเลย์ และระบบรีเลยโดยทั่ว ๆ ไป ดังนั้นรีเลย์ ที่เราจะกล่าวถึงในการอธิบายการป้องกันระบบกำลังไฟฟ้าจึงเป็นแบบที่ทำงานเมื่อค่าบางค่า (ค่าหนึ่งหรือมากกว่า) เปลี่ยนไป โดยรีเลย์จะไปปิด หรือเปิดคอนแทค (contacts) ของวงจรควบคุม และโดยมากเราจะไม่พยายามอธิบายโครงสร้างของรีเลย์ แต่ละแบบ ในการอธิบายระบบ

2.3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตัวรีเลย์ สัญลักษณ์ที่ใช้มีหลายแบบ แต่ที่นิยมใช้มักจะเขียนตัวเลขเป็นรหัสแทนรีเลย์ต่างๆ โดยเขียนลงในวงกลม สำหรับรหัสที่ใช้แทนรีเลย์นี้จะใช้รหัสตามของ กฟผ. แห่งประเทศไทยซึ่งใช้รหัสดังนี้

(2) Time delay starting หรือ Closing relay
(3) Checking หรือ Interlocking relay
(21) Distance relay
(25) Synchronizing หรือ Synchronism check relay
(26) Thermal relay
(27) Under voltage relay
(30) Announciator relay
(31) Directional power relay
(36) Polarity relay
(37) Under current หรือ Under power relay
(38) Bearing excessive temperature relay

(40) Field failure relay
(46) Reverse phase หรือ Phase balance current relay
(47) Open หรือ Reverse phase voltage relay
(48) Incomplete sequence relay
(50) Instantaneous relay
(51) AC. Time over current relay
(55) Power factor relay
(56) Field application relay
(57) Automatic current regulate หรือ Current relay
(59) Over voltage relay
(60) Voltage หรือ Balance relay
(62) Time relay stoping หรือ Opening relay
(63) Presure relay
(64) Earth fault protective relay
(67) AC. Directional over current relay
(68) Blocking relay
(69) Flow relay
(70) AC. Reclosing relay
(74) Alarm relay
(75) DC. Over voltage relay
(76) DC. Over current relay
(78) Phase angle measureing หรือ Out of step protection relay
(81) Frequency relay
(83) Automatic selective control relay หรือ Transfer relay
(85) Carrier หรือ Pilot wire receive relay
(86) Locking out relay
(87) Differential protective relay
(95) Automatic frequency regulator หรือ Frequency relay

2.3.2 วงจรของรีเลย์และส่วนประกอบ สำหรับรีเลย์เพียงตัวเดียวนั้นไม่สามารถที่จะป้องกันระบบไฟฟ้าได้เลย ดังนั้นจะต้องประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

ก) หม้อแปลงเครื่องวัด (Instrument tranformer) อาจจะเป็นหม้อแปลงกระแส (Current tranformer) หรือ หม้อแปลงแรงดัน (Potential tranformer) อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือทั้งสองอย่างก็ได้ หม้อแปลงเครื่องวัด (Instrument tranformer)จะเป็นตัวส่งสัญญาณบอกเหตุมายังรีเลย์เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบ

ข) รีเลย์จะทำหน้าที่รับสัญญาณจากหม้อแปลงเครื่องวัด (Instrument transformer) แล้วมาพิจารณาดูว่าสัญญาณจากจุดที่เกิดฟอลต์ มีความรุนแรงเพียงใด โดยอาจจะส่งสัญญาณหรือถ่วงเวลาไว้ชั่วคราวหรือจะสั่งการเบรกเกอร์ให้ตัดส่วนที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบก็ได้ รีเลย์บางชนิดจะต้องมีแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงอยู่ด้วย

ค) เซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตัดวงจรส่วนที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบโดยรับสัญญาณจากรีเลย์

2.3.3 ระบบคอนแทคของรีเลย์ (Relay Contact Systems) ในรีเลย์แบบไฟฟ้า-กล กลไกที่ใช้ทำงานจะเป็นตัวไปทำให้คอนแทคของรีเลยปิดหรือเปิด และเมื่อพูดว่ารีเลยทำงาน จะหมายความว่ารีเลย์ปิดหรือเปิดคอนแทคแล้วแต่กรณี รีเลย์ส่วนใหญ่จะมีสปริงดึงไว้ หรือใช้น้ำหนักตัวเองถ่วงไว้ เพื่อจะได้กลับเข้าสู่ที่เดิม เมื่อค่าเปลี่ยนแปลง ที่ทำให้มันทำงานนั้นหมดไป

คอนแทคในรีเลย์มี 2 ชนิด คือ คอนแทคชนิดที่โดยปกติเปิดอยู่ (เรียกว่า normally open or make contact หรือคอนแทคแบบ a) และคอนแทคชนิดที่โดยปกติปิดอยู่ (เรียกว่า normally closed or break contact หรือ คอนแทค แบบ b)

เมื่อรีเลย์ทำงานโดยปิดคอนแทคแบบ a หรือ เปิดคอนแทคแบบ b จะเรียกว่า รีเลย์ทำงาน หรือ พิคอัพ (picks up) และค่าต่ำสุดที่จะทำให้รีเลย์ทำงาน (เมื่อค่อย ๆ เพิ่มค่าจากศูนย์ขึ้นไป) เรียกว่า "ค่าทำงาน" หรือ "ค่าพิคอัพ" ของรีเลย์

เมื่อรีเลย์ทำงานโดยคอนแทคแบบ a เปิดกลับไปยังตำแหน่งหยุดหรือรีเซท (reset) หรือคอนแทคแบบ b ปิด จะเรียกว่ารีเลย์ “คืนสู่ตำแหน่งเดิม” และค่าสูงสุดที่จะทำให้รีเลย์ทำเช่นนี้ (เมื่อค่อย ๆ ลดจากค่าพิคอัพลงมา) จะเรียกว่า ค่าสู่ตำแหน่งเดิมของรีเลย์

เมื่อรีเลย์เปิดคอนแทค a แต่ไม่คืนสู่ตำแหน่งเดิม เราจะเรียกว่ารีเลย์หลุด (drop - out) และค่าสูงสุดที่ทำให้เกิด เช่นนี้จะเรียกว่า ค่าหลุด หรือ ค่าดรอพเอาท์

คอนเกิดของรีเลย์อาจจะเป็นแบบคืนสู่ตำแหน่งเดิมเอง เรียกว่าคืนตัวเอง (self reset) หมายความว่า คอนแทค จะอยู่ในตำแหน่งที่ทำงาน (เปิด หรือ ปิด) เฉพาะเมื่อมีค่าควบคุม (controlling quantity) เช่น กระแสหมดไป คอนแทค ก็จะกลับคืนสู่ที่เดิมเอง

คอนแทคอีกแบบหนึ่งเป็นแบบที่ต้องใช้มือ หรือ ไฟฟ้าทำให้กลับสู่ตำแหน่งเดิม คอนแทคแบบนี้จะอยู่ในตำแหน่ง ที่ทำงานเมื่อค่าที่ควบคุมมีค่าถึงค่า ๆ หนึ่งแล้ว ถึงแม้ว่าค่านั้นจะหายไป คอนแทคก็ยังอยู่ในตำแหน่งนั้น จะต้องใช้มือหรือ ระบบแม่เหล็กไฟฟ้าดึงมันกลับมาสู่ตำแหน่งเดิม

รีเลย์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในการป้องกันวงจร จะเป็นแบบที่คืนสู่ตำแหน่งเดิมเองแต่ถ้าต้องการก็อาจจะทำให้เป็นแบบที่ ต้องใช้มือดึงกลับได้ โดยใช้อุปกรณ์ช่วยบางอย่าง

สำหรับรีเลย์แบบที่ต้องใช้มือ หรือระบบแม่เหล็กไฟฟ้าดึงกลับนั้นมักจะใช้เมื่อจำเป็นต้องมีสัญญาณต่อเนื่อง หรือ ต้องการให้อยู่ในสภาวะล็อคไว้ (lock-out)

รูป 2.4 แสดงคอนแทคแบบต่างๆ ซึ่งตามปกติจะเขียนไว้ในตำแหน่ง ที่มันยังไม่ทำงาน (un - operated หรือ de - energized) ไม่ว่าในการทำงานตามปกตินั้นจะอยู่เช่นไร เช่น รีเลย์ที่ใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าซึ่งตามปกติเวลาทำงานจะอยู่ในตำแหน่งพิคอัพ แต่ในแผนภูมิ (Diagram) จะเขียนคอนแทคอยู่ในตำแหน่งเดิม คือในตำแหน่งไม่พิคอัพ

รูปที่ 2.4 คอนแทคของรีเลย์

ในบางกรณีคอนแทคอาจเขียนดังในรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.5 คอนแทคของรีเลย์

รีเลย์ที่ใช้ในการป้องกันวงจร โดยมากมักจะมีหน้าที่ปลดปล่อยหรือทริพไกตัดวงจร โดยที่กลไกในการปลดปล่อย หรือ ทริพ อาจจะเป็นแบบขดลวดโซลีนอยด์ (solenoid) และมีแกนเหล็ก ซึ่งจะไปปลดสลัก (latch) โดยตรง หรือ ในกรณีที่กลไกตัดวงจรเป็นแบบลมอัดแรง (air-blast หรือ pneumatic) อาจจะใช้แบบลิ้น (valve) ซึ่งจะทำงานโดย ระบบไฟฟ้า รีเลย์อาจจะไปบังคับ (energize) วงจรทริพ หรือ ขดลวดทริพ (tripping coil) โดยตรง หรือ อาจจะบังคับ รีเลย์ช่วย หรือ ออกซิเลียรี่ (auxiliary relay) แล้วแต่ค่ากำหนด (rating) ของขดลวด และจำนวนวงจร ที่บังคับ

โดยหลักการแล้ววงจรทริพจะไม่ยุ่งยาก คือจะประกอบด้วยสวิทช์ควบคุม สำหรับทริพด้วยมือ (hand-trip) และ คอนแทคของรีเลย์ต่อขนานกัน เพื่อจะบังคับวงจรทริพซึ่งใช้แบตเตอรี่ และมีสวิทช์ช่วย (auxiliary switch) (แบบ a) ซึ่งถูกบังคับโดยไกตัดวงจร สวิทช์นี้จะต้องมีไว้เพื่อเปิดวงจรทริพเมื่อไกตัดวงจรเปิด เนื่องจากคอนแทคของรีเลย์ปกติจะไม่ สามารถตัดวงจรได้เอง ซึ่งตามปกติจะปรับให้สวิทช์นี้ปิดวงจรทันที ที่ไกตัดวงจรปิด เพื่อให้การป้องกันทำได้อย่างรวดเร็ว ในกรณีที่ไกตัดวงจรปิดขณะที่มีการลัดวงจรอยู่แล้ว

รีเลย์เป็นเครื่องวัดที่เที่ยงตรง ดังนั้นคอนแทคของมันจึงไม่ควรต้องทำหน้าที่ตัด หรือ ต่อวงจรในค่ากระแสสูงๆ รีเลย์แบบดูดแกนเหล็ก (attracted armature) ซึ่งจะรวมลักษณะของเครื่องวัดและคอนแทคเตอร์ (contactors) เข้าไว้ด้วยกัน จึงมีลักษณะอยู่ระหว่างกลางของเครื่องสองแบบนี้ ดังนั้นอาจจะเป็นไปได้ว่า ถ้าออกแบบให้ค่อนไปทางคอนแทคเตอร์ รีเลย์ก็อาจจะตัดต่อวงจรแบบคอนแทคเตอร์ได้พอสมควร

รีเลย์แบบอื่น ส่วนใหญ่จะมีแรงกระทำที่ไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ เมื่อรีเลย์อยู่ในตำแหน่งที่ปรับไว้ (set) แรงไฟฟ้า-กล (electromechanical) จะถูกต้านไว้โดยแรงยึด ซึ่งกรณีนี้ก็จะจำกัดความสามารถในการปิดวงจร ของคอนแทคไปมาก ถ้ามีคอนแทคหลาย ๆตัว ในเครื่องเดียวกันก็จะยิ่งยากที่จะปิดคอนแทคพร้อมกันหลาย ๆ ตัว โดยเฉพาะ ถ้าปรับแนว (alignment) ไม่ดี ดังนั้นจึงมักจะไม่ค่อยใช้คอนแทคหลาย ๆ คู่ และโดยปกติมักจะใช้คอนแทคเตอร์เข้าช่วย เพื่อจะตัดหรือต่อวงจร ถึงแม้ว่าในบางกรณีจะใช้รีเลย์ปิด-เปิดวงจรที่ทริพไกตัดวงจรขนาดเล็กโดยตรง (โดยมากจะใช้ เป็นแบบดูดแกนเหล็ก)ซึ่งติดตั้งในกล่องเดียวกับรีเลย์ที่วัด

โดยทั่วไปรีเลย์แบบสแตติค (static relays) มักจะมีวงจรสำหรับ การวัดแยกจากวงจรทริพ หรือ แบ่งเป็นโมดูล (modules) การทำงานของโมดูล ที่ใช้วัดจะไม่มีผลต่อโมดูลที่ใช้ทริพ รีเลย์แบบนี้จะเปรียบได้กับรีเลย์แบบไฟฟ้า-กล และ คอนแทคเตอร์

สำหรับลานไกตัดวงจรขนาดใหญ่ กำลังไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับทริพไกตัดวงจรแต่ละตัวค่อนข้างสูง และนอกจาก นั้นระบบป้องกันระบบเดียวอาจจะต้องสั่งทริพไกตัดวงจรหลายตัว นอกจากนั้นยังอาจจะต้องการสัญญาณเตือนไปยังห้อง ควบคุม หรือต้องการมี อินเตอร์ล็อค (interlocking) กับการทำงานแบบอื่น เช่น การปิดวงจรใหม่เอง (autoreclosing) การทำงานแบบนี้

อาจจะใช้รีเลย์ที่เรียกว่า รีเลย์ปลดปล่อยชนิดหลายคอนแทค (multicontact tripping relay) ซึ่งจะถูก บังคับโดยรีเลย์ป้องกัน (protective relay) และจะมีคอนแทคทางออก (output contact) ซึ่งมีค่ากำหนดแตกต่างกันตามที่ต้องการ

2.3.4 ตัวชี้บอกการทำงานของรีเลย์ (Operation Indicators) เพื่อจะเตือนผู้ควบคุมระบบไฟฟ้าว่า รีเลย์ได้ทำงานแล้ว ที่รีเลย์มักจะมีกลไก ซึ่งจะชี้บอกว่ามันได้ทำงานไปแล้ว ภาษาอังกฤษ เรียกว่า flag หรือ target โดยเฉพาะในกรณีที่มีการทริพ จะมีกลไกบอกให้รู้ ตัวชี้บอกอาจทำงานทางกล (mechanically) เช่น เป็นแผ่นป้ายเล็กมีแถบสีแดงบนพื้นขาว ซึ่งจะตกลงมาอยู่ในตำแหน่งที่เห็นได้ง่ายเมื่อรีเลย์ทำงาน โดยเคลื่อนตัว หรือหมุน หรือทางไฟฟ้า เช่น ทำให้แผ่นป้ายตกลงมาปรากฏให้เห็นได้ชัดเมื่อแกนเหล็กถูกดูด แบบอื่นก็อาจ จะเป็นแบบที่ใช้แม่เหล็กถาวร รูปทรงกระบอกขนาดเล็ก ซึ่งวางอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แม่ เหล็กนี้จะหมุนกลับและที่ปลายจะระบายสีเพื่อให้เห็นชัด

2.3.5 การนำรีเลย์ป้องกันไปใช้งาน การนำรีเลย์ป้องกันระบบไฟฟ้าไปใช้งานต้องทราบข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ไดอะแกรมเส้นเดียว (Single line diagram) ซึ่งแสดงถึงระบบทั้งหมดที่ต้องการป้องกัน ไดอะแกรมเส้นเดียวนี้จะแสดงรายละเอียดตำแหน่งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดและการต่อขดลวดหม้อแปลง ตำแหน่งของเซอร์กิตเบรกเกอร์ การจัดบัส การจัดและขนาดสายส่งหรือสายจำหน่ายตลอดจนแรงดันและความถี่

2. การป้องกันระบบไฟฟ้าเดิมที่มีอยู่ ต้องรู้ถึงระบบการป้องกันเดิมรวมทั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า และวิธีดำเนินการในการปฏิบัติเดิมที่มีอยู่ และแนวโน้มการขยายการป้องกันในอนาคต เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการดัดแปลงแก้ไขเพิ่มเติม ให้ระบบป้องกันใหม่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

3. ระดับการป้องกันและความสามารถการทางานของระบบ ระบบการป้องกันที่เหมาะสมอาจใช้รีเลย์แบบทำงานด้วยความเร็วสูง ปานกลาง หรือความเร็วต่ำ หรือต้องการให้มีการสั่งสับซ้ำทันทีหรือไม่

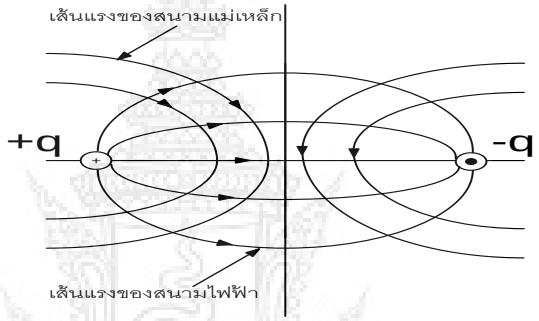
4. ศึกษาเกี่ยวกับฟอลต์ชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ การเกิดฟอลต์อาจเป็นสามเฟสฟอลต์หรือฟอลต์ไม่สมมาตร ทั้งนี้เพื่อหาวิธีป้องกันที่ดีที่สุดสำหรับฟอลต์ทุกแบบ

5. โหลดสูงสุดและข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจจับ ข้อมูลเกี่ยวกับโหลดสูงสุด อัตราส่วนและการต่อหม้อแปลงกระแส (CT) หรือหม้อแปลงแรงดัน (PT) ทั้งนี้เพื่อนำไปใช้กับรีเลย์ป้องกันได้อย่างเหมาะสม

6. อิมพีแดนซ์ของสายและของหม้อแปลงไฟฟ้า

2.4 พารามิเตอร์ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้สายจะมีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นระหว่างสายเสมอ สนามไฟฟ้าเกิดจากแรงดันคร่อมสาย และสนามแม่เหล็กเกิดจากกระแสที่ไหลภายในสาย กล่าวคือ ขณะที่สายมีศักย์ทางไฟฟ้าแตกต่างกัน แสดงว่าประจุบนสายเป็นประจุต่างชนิดกัน สายที่มีประจุบวกจะส่งสนามไฟฟ้าไปยังประจุลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ถ้าสายเส้นเดียวกันนี้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบสาย มีทิศทางเป็นไปตามกฎมือขวากำ จากรูปจะเห็นว่าสนามทั้งสองเกิดขึ้นในแนวตั้งฉากซึ่งกันและกัน เรียกว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สนามดังกล่าวคือสาเหตุที่ทำให้เกิดพารามิเตอร์ C และ L ขึ้นในระบบส่งจ่ายไฟฟ้านั่นเอง

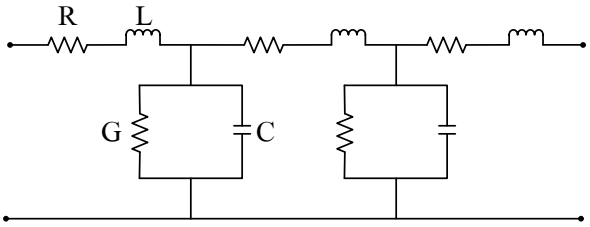


รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

พารามิเตอร์ (parameter) เป็นชื่อเรียกค่าคงที่ชนิดหนึ่งในระบบ ซึ่งค่าคงที่ดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติเฉพาะให้กับระบบด้วย พารามิเตอร์ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ามีอยู่ 4 ตัวด้วยกันคือ

1. ความเหนี่ยวนำ (inductance; L)
2. ความต้านทาน (resistance; R)
3. ความจุไฟฟ้า (capacitance; C)
4. ความนำไฟฟ้า (conductance; G)

พารามิเตอร์ L และ R มีคุณสมบัติทำให้เกิดแรงดันตกเมื่อกระแสไหลผ่านสาย ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองนี้จะต่ออันดับกันโดยกระจายอยู่ตลอดสายทั้งเส้น อาจมองในรูปของอิมพีแดนซ์อันดับ (series impedance; Z=R+jX) ก็ได้ ส่วนพารามิเตอร์ C และ G นั้นเป็นตัวทำให้เกิดกระแสอัดประจุ (charging current) และกระแสรั่วไหล (leakage current) ข้ามสาย พารามิเตอร์ทั้งสองจะต่อขนานกันโดยกระจายอยู่ตลอดสายทั้งเส้นเช่นเดียวกัน อาจมองในรูปของแอดมิตแตนซ์ขนาน (shunt admittance; Y=G+jB) ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงพารามิเตอร์ของสาย

พารามิเตอร์ L เกิดจากสนามแม่เหล็กที่ล้อมรอบสายเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ถ้ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเป็นกระแสสลับจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ล้อมรอบสายมีการเปลี่ยนแปลง และเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนสายมีทิศทางต้านกลับ ซึ่งอาจมองในรูปของแรงดันตก IX ก็ได้

พารามิเตอร์ R จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะ ความยาว และขนาดพื้นที่หน้าตัดของสาย เมื่อมีกระแสไหลผ่านจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม IR ขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดกำลังสูญเสียในรูปของความร้อน I^2R อีกด้วย

พารามิเตอร์ C เกิดจากสนามไฟฟ้าระหว่างคู่สาย โดยมีอากาศเป็นไดอิเล็กตริก (dielectric) ถ้าแรงดันที่ใช้ส่งสูงและเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดการประจุ (charge) และคายประจุ (discharge) ระหว่างคู่สายขึ้น เกิดกระแสอัดประจุ $I_c = V\omega C$ ไหลผ่านคู่สายได้

พารามิเตอร์ G เกิดจากกระแสรั่วข้ามสายโดยผ่านฉนวนลูกถ้วย ซึ่งตามปกติฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าความต้านทานสูงมาก จนกระแสไหลผ่านเกือบไม่ได้ และในทางปฏิบัติมักละทิ้งผลของพารามิเตอร์ตัวนี้ เพราะค่า G มีค่าเกือบเป็นศูนย์ ซึ่งกระแสรั่ว $I_g = VG$ จะมีค่าน้อยมาก

อย่างไรก็ตาม พารามิเตอร์ไม่ใช่ตัวคงที่ถาวร แต่เป็นตัวคงที่ตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นในครั้งหนึ่งๆเท่านั้น ถ้าเงื่อนไขเปลี่ยนแปลงไป พารามิเตอร์ก็จะเปลี่ยนแปลงค่าได้เช่นเดียวกัน จะเห็นว่าพารามิเตอร์ L, R, C และ G นั้น จะมีค่าคงที่ได้ค่าหนึ่งเมื่อมีเงื่อนไขดังนี้คือ ต้องมีขนาดสายความยาวสาย วัสดุที่ใช้ทำสาย อุณหภูมิของสายและระยะห่างระหว่างสายคงที่ สมมติว่าอุณหภูมิของสายเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และทำให้พารามิเตอร์ R เปลี่ยนแปลง แต่พารามิเตอร์อื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิจะยังมีค่าคงที่อยู่หรือถ้ามีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างคู่สายให้แตกต่างจากเดิม จะทำให้พารามิเตอร์ L และ C เปลี่ยนแปลง เป็นต้น

2.5 สายส่งกำลังไฟฟ้า

สายไฟฟ้าที่ใช้ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้านั้นเป็นสายขนาดใหญ่ ประกอบด้วยลวดเส้นเล็กๆ พันซ้อนกันเป็นชั้น (layer) เพื่อช่วยให้สายอ่อนตัว เรียกว่าสายตีเกลียว (stands of wire) เกลียวสายแต่

ละชั้นจะพันสลับทางกันเพื่อป้องกันสายคลายตัว สายตีเกลียวแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ได้ 2 ประเภท คือ สายหุ้มฉนวน (insulated wire) และสายเปลือย (bare wire)

a) สายหุ้มฉนวน เป็นสายที่มีเกาะป้องกันกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่จะใช้ในงานที่ใกล้กับสิ่งมีชีวิต เช่นในระบบจำหน่ายแรงต่ำสายหุ้มฉนวนที่ใช้กับระบบจำหน่ายแรงต่ำเรียกว่าสายกันน้ำ (weatherproof wire) สายประเภทนี้ใช้กับแรงดันไม่เกิน 750 โวลต์และการใช้งานจะเดินติดกับแร็กสายหุ้มฉนวนบางชนิดใช้กับระบบแรงสูงเรียกว่าสายเคเบิลสายเคเบิลที่ใช้ในระบบแรงสูงจะมีเปลือกฉนวนหนากว่าสายระบบแรงต่ำสายเคเบิลบางชนิดออกแบบไว้สำหรับเดินใต้ดินโดยเฉพาะแต่บางชนิดสามารถใช้เดินเหนือศีรษะเรียกว่าสายเคเบิลอากาศสายเคเบิลอากาศส่วนมากจะใช้กับระบบจำหน่ายแรงสูงที่มีแรงดันไม่เกิน 24 kV การใช้งานจะแขวนติดกับลวดลิงที่ใช้เป็นสายนำทาง (messenger wire) โดยมีอุปกรณ์คั่นสาย (spacer) กั้นสายให้มีระยะห่างเท่าๆกันสายชนิดนี้จะใช้ในบริเวณที่มีต้นไม้มากๆหรืองานที่มีระยะห่างระหว่างสายกับสิ่งปลูกสร้างน้อยกว่ามาตรฐาน
ในการเลือกใช้สายหุ้มฉนวนให้ถูกกับลักษณะงานจะต้องทราบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเปลือกฉนวนด้วย ในปัจจุบันเปลือกฉนวนมักทำจากวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ซึ่งได้แก่ PVC (polyvinyl chloride) และ PE (polyethylene) หรือ XLPE (cross linked polyethylene) ทั้ง PVC และ PE มีคุณสมบัติทนต่อความชื้นน้ำมันและความเย็นได้ดีสำหรับ PE มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำจึงจะสามารถใช้สายชนิดนี้เดินใต้ดินได้ด้วย แต่สายที่จะเดินฝังดินโดยตรงต้องมีความหนาของเปลือกฉนวนไม่ต่ำกว่า 1.2 มิลลิเมตร
สำหรับอุณหภูมิใช้งานของสายทั้ง 2 ชนิดกำหนดไว้สูงสุด 70 องศาเซลเซียส และขณะเกิดลัดวงจรกำหนดให้สายหุ้มฉนวน PVC มีอุณหภูมิสูงสุด 100 องศาเซลเซียสแต่สายหุ้มฉนวน PE กำหนดไว้เพียง 80 องศาเซลเซียสเท่านั้นเพราะว่า PE มีจุดหลอมละลายที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียสและเนื้อวัสดุของ PE จะเสริมการลุกไหม้ด้วยจึงห้ามใช้สายหุ้มฉนวน PE เดินภายในอาคาร ส่วน PVC มีจุดหลอดละลายสูงกว่า PE และไม่เสริมการลุกไหม้ จึงนิยมใช้สายชนิดนี้กับงานทั้งภายในและภายนอกอาคาร

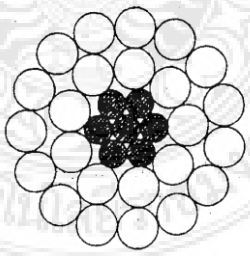
b) สายเปลือย คือสายที่ไม่มีเปลือกฉนวนหุ้มสายถ้าหากใช้ในระบบจำหน่ายแรงต่ำจะไม่ปลอดภัย ดังนั้นจึงใช้สายชนิดนี้เฉพาะงานระบบส่งกำลังและระบบจำหน่ายแรงสูงเท่านั้น โดยมีแรงดันใช้งานตั้งแต่ 11kV ขึ้นไปสายเปลือยที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ สายอะลูมิเนียมเพราะมีน้ำหนักเบาและราคาถูกแต่สายอะลูมิเนียมล้วนรับแรงดึงได้ต่ำจึงมีการพัฒนาสายอะลูมิเนียมให้สามารถรับแรงดึงได้สูงขึ้นโดยการเสริมแกนเหล็กหรือใช้โลหะอื่นผสมสายอะลูมิเนียมเปลือยที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีอยู่ 4 ชนิด คือ

1. สายตัวนำอลูมิเนียมล้วน : AAC (All Aluminium Conductors) เป็นสายตัวนำตีเกลียวเปลือยที่ประกอบด้วยเส้นลวดอลูมิเนียมรีดแข็ง (heard-drawn aluminium) ล้วน ๆ ที่มีขนาดเท่ากันและคุณสมบัติเหมือนกันมาพันตีเกลียวเป็นชั้น ๆ โดยมีจานวนเส้นลวดตั้งแต่ 7 เส้นขึ้นไป สายตีเกลียวเปลือยประเภทนี้จะรับแรงดึงได้ต่ำมากจึงไม่สามารถขึงสายให้มีระยะห่างระหว่างช่วงเสายาวมาก ๆ ได้

2. สายตัวนำอลูมิเนียมผสม : AAAC (All Aluminium Alloy Conductors) เป็นสายตีเกลียวเปลือยที่ประกอบด้วยเส้นลวดอลูมิเนียมที่ผสมกับสารอื่นโดยเป็น อลูมิเนียม 99% แมกนีเซียม 0.5% และซิลิกอน 0.5% ซึ่งอลูมิเนียมผสมนี้จะมีความเหนียวและสามารถรับแรงดึงได้สูงกว่าสายอลูมิเนียมล้วน จึงสามารถขึงสายชนิดนี้ด้วยระยะห่างช่วงเสาที่ยาวขึ้น แต่สายอลูมิเนียมผสมจะมีราคาแพงและมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าสายอลูมิเนียมล้วน จึงไม่ค่อยนิยมใช้สาย AAAC กันมากนักเว้นแต่สถานที่ที่จำเป็น เช่น บริเวณชายทะเล เป็นต้น

3. สายตัวนำอลูมิเนียมแกนเหล็ก : ACSR (Aluminium Conductors Steel Reinforced) เป็นสายอลูมิเนียมตีเกลียว มีสายเหล็กอยู่ตรงกลาง สายเหล็กที่สอดไว้เพื่อให้รับแรงดึงได้สูงขึ้น ความโตของเส้นลวดอลูมิเนียมและเส้นลวดเหล็กแต่ละเส้นอาจจะมีขนาดเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ ถ้าเปรียบเทียบแรงดึงของสายอลูมิเนียมล้วนเกินสองเท่า ดังนั้น จึงนิยมใช้สายอลูมิเนียมล้วนที่มีขนาดเท่ากัน จะเห็นว่าสายอลูมิเนียมแกนเหล็กรับแรงดึงได้สูงกว่าสายอลูมิเนียมล้วนเกิน 2 เท่า ดังนั้นจึงนิยมใช้สายอะลูมิเนียมแกนเหล็กกับสายส่งแรงสูงที่มีระยะห่างช่วงเสายาวมากๆ เช่น เสาโครงเหล็กเป็นต้น แต่จะไม่ใช้สายอลูมิเนียมแกนเหล็กบริเวณชายทะเล เพราะไอเกลือจะเกิดการกัดกร่อน

รูปที่ 2.8 แสดงพื้นที่ตัดขวางของ ACSR เส้นหนึ่ง ซึ่งมีแกนเหล็ก 7 เส้น และมีสะแตรน 24 อัน แบ่งเป็น 2 ชั้น (2 layer) อาจเขียนย่อๆ ว่า 24Al/7 st หรือ 24/7 ก็ได้



รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางของเคเบิลแบบ ACSR
7 steel stands, 24 aluminium strands

4. สายอลูมิเนียมแกนโลหะผสม : ACAR (Aluminum Conductors Alloy Reinforced) เป็นสายคล้ายอลูมิเนียมแกนเหล็กแต่รับแรงดึงได้ต่ำกว่า มีแกนกลางเป็นอะลูมิเนียมที่คงทนต่อแรงดึงได้สูง ล้อมรอบด้วยสายอลูมิเนียม สายอลูมิเนียมที่อยู่รอบแกนกลางจะพันมีลักษณะเป็นเกลียวเพื่อให้

สายเล็กๆ พันกันอยู่ตลอดเวลา สายอลูมิเนียมผสมมีความคงทนต่อแรงดึง (Tensile strength) มากกว่าอลูมิเนียมธรรมดา

2.5.1 จำนวนลวดตัวนำตีเกลียว (NUMBER OF STRANDS) ถ้าขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดตัวนำย่อยมีขนาดเท่ากันทุกเส้นเราพอจะบอกจำนวนเส้นย่อย (strands) ที่มาตีเกลียวประกอบรวมกันของสายเคเบิลได้จากจำนวนชั้น (layer) ของตัวนำ โดยจำนวนเส้นลวดของสายตีเกลียว = 3n2 -3n + 1

เมื่อ n : เป็นจำนวนชั้นของสายตีเกลียวตรงกลางเคเบิลมีลวดตัวนำย่อยเพียงเส้นเดียว

ดังนั้น จำนวนเส้นลวดตัวนาย่อยที่มาพันตีเกลียวกันในแต่ละสายเคเบิล โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำย่อยเท่า ๆ กัน จะเป็นสายเคเบิลที่ประกอบด้วย 7, 19, 37, 61, 91....เส้น แต่สำหรับสาย ACSR และ ACAR แล้ว ไม่สามารถคำนวณหาจำนวนเส้นลวดตัวนำย่อยที่มาพันตีเกลียวกันในแต่ละสายเคเบิลโดยใช้สมการดังกล่าวได้ เนื่องจากเส้นลวดข้างในมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เท่ากันทั้งหมด โดยที่เส้นลวดที่เป็นแกนกลางจะมีขนาดเล็กกว่าเส้นลวดตัวนำย่อยอลูมิเนียม

2.5.2 ขนาดของตัวนำ (CONDUCTOR SIZE) ในเรื่องขนาดของสายตัวนำ นั้น เราจะเรียกเป็นเบอร์สายตามมาตรฐานสากลที่ใช้กันเป็นมาตรฐาน AWG : American Wire Gauge โดยจะเริ่มตั้งแต่ขนาดตัวนำเล็กที่สุดเบอร์ 40 จนถึงขนาดสายตัวนำใหญ่สุด เบอร์ 0000 หรือ 4/0 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเลขหมายเบอร์ค่ามากขนาดตัวนำ จะเล็กลงในขณะที่เบอร์ค่าน้อยลงจะมีขนาดตัวนำใหญ่ขึ้น

2.5.3 วงจรสายส่ง (TRANSMISSION LINE CIRCUIT) ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าพาดเสาเหนือดินที่เดินลอยในอากาศนั้น มีรูปแบบในการจัดวงจรการส่งจ่ายหลายรูปแบบ เพื่อให้สอดคล้องกับระยะทาง ระดับแรงดันส่ง และพิกัดกำลังของระบบ รวมไปถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียโคโรน่า และเปอร์เซ็นต์โวลท์เตจเรกกิวเลชั่นของระบบ อีกทั้งสภาพพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ของเส้นทางการเดินสายปักเสาอีกด้วย ซึ่งทั้งหมดนี้จะมีผลเกี่ยวเนื่องกับ ลักษณะการออกแบบ โครงสร้างของเสาส่ง ขนาดและชนิดของสายตัวนำ รวมทั้ง ลักษณะและจำนวนของลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ ดังนั้น สามารถจัดแบ่งรูปแบบของวงจรสายส่งออกได้เป็น

- สายส่งวงจรเดี่ยว
- สายส่งวงจรคู่
- สายส่งวงจรขนาน

วงจรสายส่งแต่ละแบบ จะมีลักษณะโครงสร้าง และจุดมุ่งหมายการใช้งานแตกต่างกันออกไปเมื่อเอาระยะทางเดินสาย (กิโลเมตร) คูณกับจำนวนวงจร จะเป็นค่าบอกจำนวน วงจร-กิโลเมตร ของระบบสายส่งทั้งหมด ซึ่งรายละเอียดของวงจรสายส่งจะเป็น

สายส่งวงจรเดี่ยว (SINGLE CIRCUIT TRANSMISSION LINE) จัดเป็นระบบสายส่งที่ใช้งานกันอยู่ทั่ว ๆ ไป ที่มี โดยแบ่งย่อยออกได้เป็น

- สายส่งวงจรเดี่ยว, สายตัวนำเดียว (single circuit, single conductor transmission line)
- สายส่งวงจรเดี่ยว, สายตัวนำควบ (single circuit, bundle4 conductor transmission line)

สายส่งวงจรคู่ (DOUBLE CIRCUIT TRANSMISSION LINE) ระบบสายส่ง 3 เฟส ที่มี 2 วงจร วางขนานกันอยู่บนเสาต้นเดียวกัน นิยมใช้กับระบบที่ต้องส่งจ่ายพิกัดกำลังไฟฟ้าสูง ๆ และลักษณะการวางสาย 3 เฟส มักจะวางเรียงระยะห่างกันตามแนวตั้งแบ่งออกเป็น

- สายส่งวงจรคู่, สายตัวนำเดียว (double circuit, single conductor transmission line)
- สายส่งวงจรคู่, สายตัวนำควบ (double circuit, bundle conductor transmission line)

สายส่งวงจรขนาน (PARALLEL CIRCUIT TRANSMISSION LINES) เป็นระบบสายส่งที่ประกอบด้วยวงจรสายส่ง 3 เฟส 2 ชุด วางขนานกันโดยแยกวงจรออกอิสระอยู่บนเสาส่ง 2 ชุด ที่วงขนานห่างกัน เพื่อทำให้ผลทางไฟฟ้าระหว่างสายส่งทั้งสองชุดไม่รบกวนซึ่งกันและกัน โดยส่วนใหญ่แล้วจะพบว่า สายตัวนำที่ใช้จะเป็นแบบสายตัวนำควบแทบทั้งสิ้น แบ่งออกเป็น

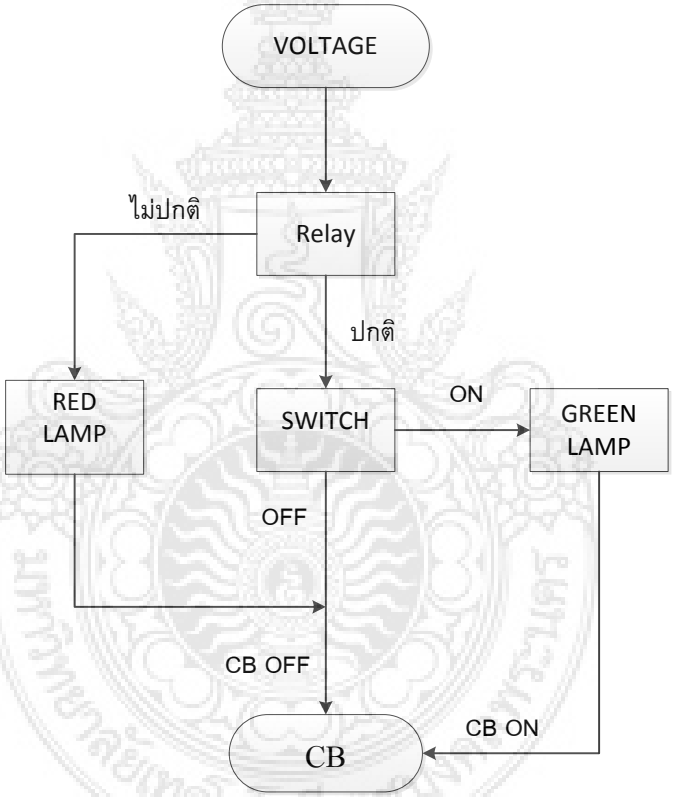
- สายส่งวงจรขนานแบบวงจรเดี่ยว (parallel – single circuit transmission lines)
- สายส่งวงจรขนานแบบวงจรคู่ (parallel – double circuit transmission lines)

บทที่ 3
การออกแบบและประกอบสร้าง

3.1 บทนำ

บทนี้จะอธิบายถึงการออกแบบและการประกอบสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟสและการออกแบบเอกสารประกอบการทดลองจำนวน 3 การทดลอง

3.2 โฟลว์ชาร์ต

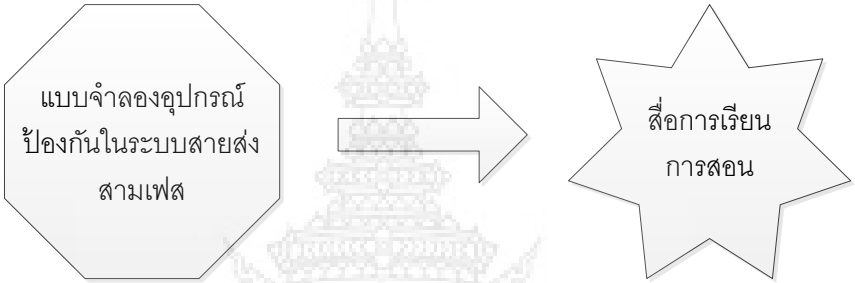


รูปที่ 3.1 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส

จากโฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส ในรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงหลักการทำงานของแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส โดยมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส 380 โวลท์ 50 เฮิรตซ์ เพื่อใช้ในการจ่ายไฟให้กับแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส โดยผ่านหม้อแปลงแรงดันสามเฟสปรับค่าได้เพื่อทำการปรับ

เพิ่มลดแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดลอง ซึ่งหลักการทำงานก็คือมีรีเลย์แรงดันทำหน้าที่ในการตรวจสอบระดับแรงดันไฟฟ้า หากรีเลย์ตรวจพบว่ามีแรงดันไฟฟ้าผิดปกติเกิดขึ้น เช่น แรงดันเกินหรือแรงดันต่ำกว่าที่ได้ตั้งค่าไว้ รีเลย์จะสั่งทริพเบรกเกอร์และหลอดไฟสีแดงก็จะติด แต่ถ้าระดับแรงดันอยู่ในสภาวะปกติ จะสามารถกดสวิตช์เพื่อ ON หรือ OFF เบรกเกอร์ได้ หลอดไฟสีเขียวก็จะติดเมื่อเบรกเกอร์อยู่ในสถานะ ON

3.3 กรอบแนวความคิด



รูปที่ 3.2 กรอบแนวความคิด

จากกรอบแนวความคิดในรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าประโยชน์ที่ได้รับจากการสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟสคือการนำไปใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนวิชาระบบไฟฟ้ากำลังและวิชาการปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง

3.4 การออกแบบและประกอบสร้าง

3.4.1 อุปกรณ์ป้องกัน

อุปกรณ์ป้องกันที่เลือกใช้ คือ รีเลย์แรงดัน รุ่น PMV70 ซึ่งรีเลย์มีคุณสมบัติ ดังนี้

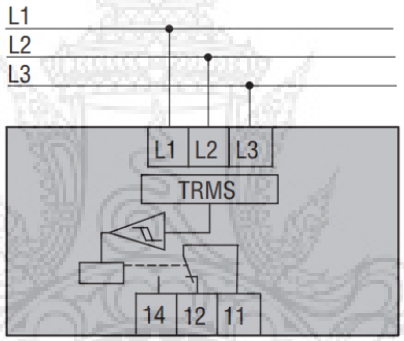
General characteristics

- Voltage monitoring relay, self powered , for minimum and maximum voltage, phase loss, incorrect phase sequence and asymmetry
- Configurable rated voltage (Ue) : 380-400-415-440-460-480-525-575VAC

ADJSTMENTS

“V max”	Maximum voltage tripping threshold 105-115% Ue
“V min”	Minimum voltage tripping threshold 80-95% Ue
“Delay” for each	Tripping delay 0.1-20s
“Asymmetry”	High voltage asymmetry tripping threshold 5-15% Ue

รูปที่ 3.3 Voltage Relay รุ่น PMV70



รูปที่ 3.4 Wiring diagram ของ Voltage Relay รุ่น PMV70

3.4.2 การออกแบบจำลองสายส่ง

การจำลองสายส่งความยาว 240 กิโลเมตร เป็นส่วนหนึ่งในการทำโครงงานแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันสายส่งสามเฟสทั้งนี้ได้ทำการจำลองค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับแรงดันที่ใช้ทำการทดลองซึ่งแรงดันที่ใช้ในการทดลองนี้อยู่ที่ 380 โวลท์ ความถี่ 50 รอบต่อวินาที

สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้อ้างอิงมาจากหนังสือ (การผลิต ส่งและจ่ายไฟฟ้า ของอาจารย์โตศักดิ์ ทัศนานุตริยะ และตำราเรียนวิชา Electric Power System ของอาจารย์อดิศักดิ์ วิริยกรรม) ซึ่งการคำนวณมีดังนี้ ที่ความยาวสายส่ง 240 กิโลเมตร หรือ 150 ไมล์ โดยกำหนดใช้สาย 795 MCM ACSR ที่ความถี่ 50 รอบต่อวินาที จากค่าพารามิเตอร์ของสายส่งนั้นจะมีค่าความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า

การหาค่าความต้านทานของสาย ได้อ้างอิงค่าจากตารางขนาดและคุณสมบัติของสายไฟฟ้าอลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR)

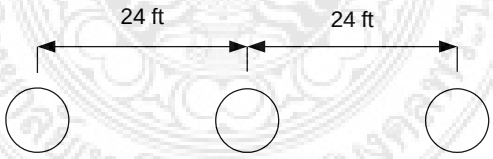
สาย 795 MCM ACSR มีค่าความต้านทานที่ 50 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.1339 (โอห์ม/สาย/ไมล์) ที่ความยาว 150 ไมล์ เท่ากับ 150 x 0.1339 = 20 โอห์ม

ค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำจากการวัดโดยใช้เครื่องวัด มีความต้านทาน เท่ากับ 0.3 โอห์ม

ตัวต้านทานที่ใช้ขนาด 20 โอห์ม 300 วัตต์ เมื่อนำมาวัดค่าความต้านทานโดยใช้เครื่องวัด มีค่าความต้านทานจริงสูงสุด เท่ากับ 19.7 โอห์ม ค่าความต้านทานทั้งหมด เท่ากับ 0.3 + 19.7 = 20 โอห์ม

รูปที่ 3.5 ตัวต้านทาน

การหาค่าความเหนี่ยวนำของสาย ทั้งนี้ได้กำหนดระยะห่างของสายให้เหมาะสมกับแรงดันที่ทำการจำลองดังนี้



ค่า GMR = 0.0347 ฟุต

ค่า Dm = $\sqrt[3]{24X\,24X\,48}$ = 30.2381 ฟุต

จากสูตรการหา L = 0.7411 $\log\frac{30.2381}{0.0347}$ = 2.1790 (มิลลิเฮนรี /เฟส/ไมล์)

ที่ 150 ไมล์ จะได้ = 150 X 2.1790 = 326.85 มิลลิเฮนรี

สูตรการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ

$$L = \frac{N^2 * A * u}{l}$$

โดยที่ L = ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น เฮนรี่

N = จำนวนรอบของขดลวด

A = พื้นที่หน้าตัดของแกนขดลวด มีหน่วยเป็น ตารางเมตร

u = ค่าความซาบซึมได้ (Permeability)

l = ความยาวของวัสดุที่นำมาทำแกน มีหน่วยเป็น เมตร

สูตรการคำนวณหาจำนวนรอบตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก

L = 0.32685 เฮนรี่

A = 0.001444 ตารางเมตร

u = 0.0069

l = 0.075 เมตร

$$N = \sqrt{\frac{L * l}{A * u}}$$

$$N = \sqrt{\frac{0.3269 * 0.075}{0.001444 * 0.0069}}$$

= 50 รอบ

รูปที่ 3.6 ตัวเหนี่ยวนำ

การหาค่าความจุไฟฟ้าในการคำนวณจะหาค่าเฉลี่ยจากเฟสไปยังนิวทรอลโดยถือได้ทำการไขว้สลับตำแหน่งของสายไฟฟ้าจนครบรอบแล้ว ดังนั้นค่า Deq = 24 ฟุต

รัศมีของสาย 795 MCM ACSR , r = 0.044 ฟุต

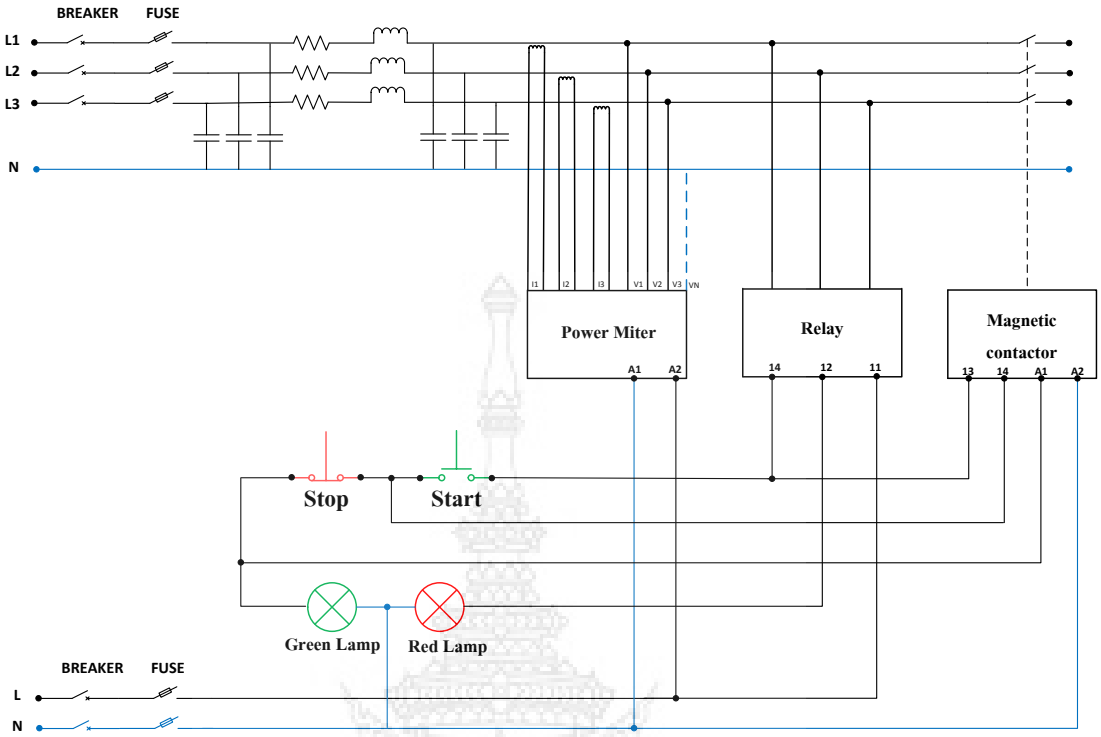
จากสูตรการหา $C = \frac{0.0388}{\log \frac{30.2381}{0.044}}$ = 0.0137 (ไมโครฟารัดส์/ไมล์ , to neutral)

ที่ 150 ไมล์ จะได้ = 150 X 0.0137 = 2.055 ไมโครฟารัดส์

รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุ

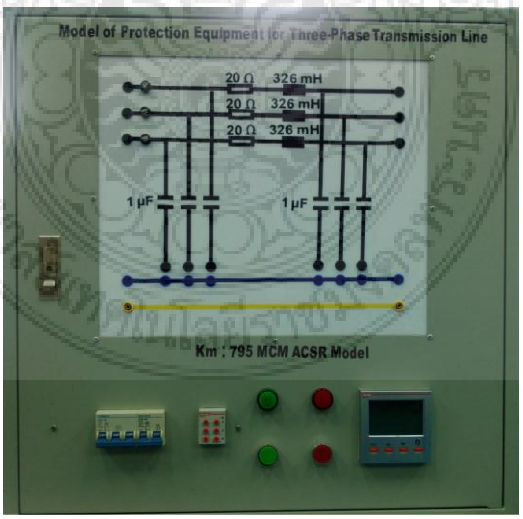
3.4.2 วงจรแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส

แบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟสประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ภายในตู้หลักๆ ได้แก่ เพาเวอร์มิเตอร์ รีเลย์แรงดัน แมคเนติกส์คอนเทคเตอร์ ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ สวิตช์ หลอดไฟ เบรกเกอร์ และฟิวส์ ซึ่งโครงสร้างของแบบจำลองหรือวงจรการวายริ่งสายไฟได้ทำการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.6

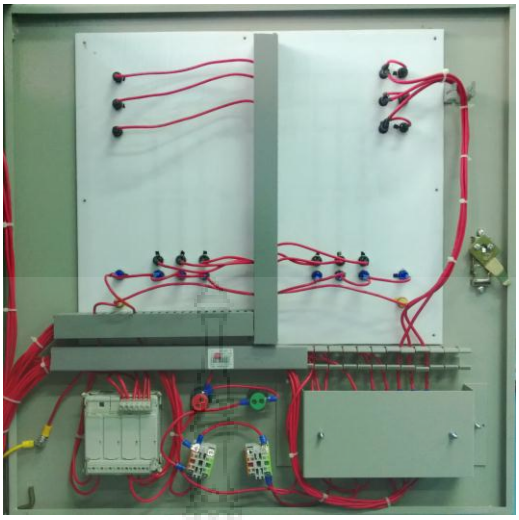


รูปที่ 3.8 Wiring Diagram ของแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส

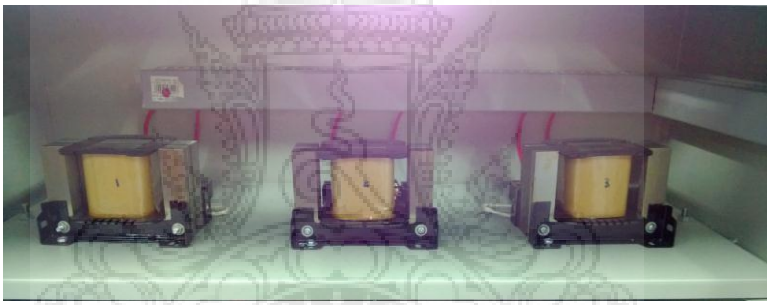
3.4.3 การจัดเรียงอุปกรณ์ลงตู้คอนโทรล



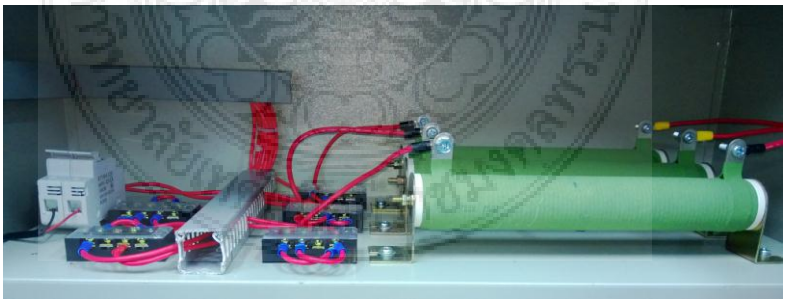
รูปที่ 3.9 ด้านหน้าของตู้คอนโทรล



รูปที่ 3.10 ด้านหลังของฝาตู้คอนโทรล



รูปที่ 3.11 ชั้นบนของตู้คอนโทรล



รูปที่ 3.12 ชั้นกลางของตู้คอนโทรล

รูปที่ 3.13 ชั้นล่างของตู้คอนโทรล

3.4.4 การออกแบบเอกสารประกอบการทดลอง

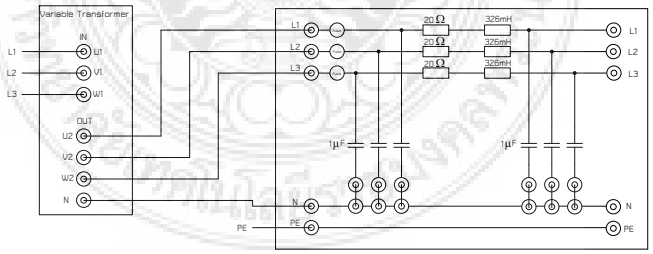
การทดลองที่ 1

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส
2. หม้อแปลง 3 เฟส ปรับค่าได้
3. สายต่อวงจร
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลท์

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรการทดลอง



2. ปรับตั้งค่า configurable rated voltage (Ue) ไว้ที่ 400 แล้ว ON CB
3. ทำการทดสอบโดยการปรับเพิ่มแรงดันขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งรีเลย์อยู่ในสภาวะปกติ (ไฟสีเขียวที่รีเลย์ติด) บันทึกค่าแรงดันลงในตาราง
4. ทำการทดลองอีกครั้ง โดยปรับตั้งค่า configurable rated voltage (Ue) ไว้ที่ 380
5. สรุปผลการทดลอง

การปรับตั้งค่า Configurable rated voltage (Ue) เท่ากับ 400 และ 380

configurable rated voltage (Ue)	measurements voltage
400	
380	

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

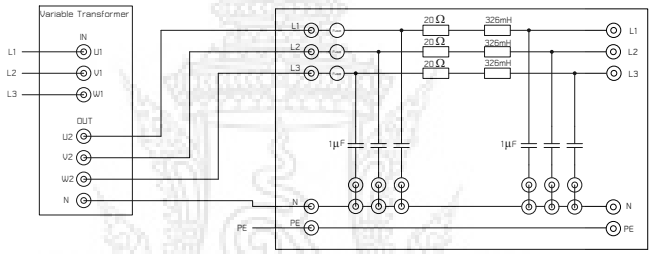
การทดลองที่ 2

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส
2. หม้อแปลง 3 เฟส ปรับค่าได้
3. สายต่อวงจร
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลท์

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรการทดลอง



2. ปรับตั้งค่า configurable rated voltage (Ue) ไว้ที่ 380 voltage max (%Ue) และ voltage min (%Ue) ไว้ที่ 105 และ 95 ตามลำดับ Delay เท่ากับ 0.1s แล้ว ON CB
3. ทำการทดสอบโดยการปรับเพิ่มแรงดันขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งรีเลย์ทำงาน (ไฟแสดงสถานะแรงดันเกินติด) บันทึกค่าแรงดันทำงาน (release value) จากนั้นปรับค่าแรงดันในทิศทางย้อนกลับจนกระทั่งรีเลย์กลับสู่สภาวะปกติ บันทึกค่าแรงดันปลด (release value) ลงในตารางที่ 4.2 พร้อมทั้งคำนวณค่า resetting ratio
4. ทำการปรับลดแรงดันลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งรีเลย์ทำงาน (ไฟแสดงสถานะแรงดันต่ำติด) บันทึกค่าแรงดันทำงาน (release value) จากนั้นปรับค่าแรงดันในทิศทางย้อนกลับจนกระทั่งรีเลย์กลับสู่สภาวะปกติ บันทึกค่าแรงดันปลด (release value) ลงในตารางที่ 4.3 พร้อมทั้งคำนวณค่า resetting ratio $\left(\frac{\text{operating value}}{\text{release value}}\right)$
5. สรุปผลการทดลอง

การปรับตั้งค่า voltage max (%Ue) เท่ากับ 105

operating value	release value	resetting ratio

การปรับตั้งค่า voltage min (%Ue) เท่ากับ 95

operating value	release value	resetting ratio

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

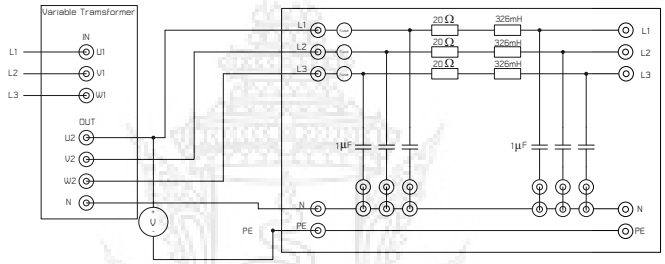
การทดลองที่ 3

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส
2. สายต่อวงจร
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลท์
4. โวลท์มิเตอร์

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรการทดลอง



2. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าต้นสายและปลายสาย
3. คำนวณ voltage regulation ในสภาวะ No load
4. สรุปผลการทดลอง

กำหนดให้สายส่งมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$R = 0.1339$ โอห์ม/ไมล์

$L = 2.179$ มิลลิเฮนรี/ไมล์

$C = 0.0137$ ไมโครฟารัด/ไมล์

สูตรคำนวณ voltage regulation ในสภาวะ No load

$$V_{reg} = \frac{\left|V_S / A\right| - \left|V_R\right|}{\left|V_R\right|} \times 100$$

แรงดันไฟฟ้าต้นสาย (V_S) = ... V

แรงดันไฟฟ้าปลายสาย (V_R) = ... V

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

บทที่ 4
วิธีการทดลองและผลการทดลอง

4.1 บทนำ

บทนี้จะอธิบายถึงลำดับขั้นตอนการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส

4.2 วิธีการทดลองและผลการทดลอง

วิธีการทดลองที่ 1

1. ต่อวงจรการทดลอง
2. ปรับตั้งค่า configurable rated voltage (Ue) ไว้ที่ 400 แล้ว ON CB
3. ทำการทดสอบโดยการปรับเพิ่มแรงดันขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งรีเลย์อยู่ในสภาวะปกติ (ไฟสีเขียวที่รีเลย์ติด) บันทึกค่าแรงดันลงในตาราง
4. ทำการทดลองอีกครั้ง โดยปรับตั้งค่า configurable rated voltage (Ue) ไว้ที่ 380

ผลการทดลองที่ 1

ตารางที่ 4.1 การปรับตั้งค่า Configurable rated voltage (Ue) เท่ากับ 400 และ 380

configurable rated voltage (Ue)	measurements voltage
400	401.8
380	381.3

รูปที่ 4.1 ผลการทดลองการปรับตั้งค่า Configurable rated voltage (Ue) เท่ากับ 400

รูปที่ 4.2 ผลการทดลองการปรับตั้งค่า Configurable rated voltage (Ue) เท่ากับ 380

วิธีการทดลองที่ 2

1. ต่อวงจรการทดลอง
2. ปรับตั้งค่า configurable rated voltage (Ue) ไว้ที่ 380 voltage max (%Ue) และ voltage min (%Ue) ไว้ที่ 105 และ 95 ตามลำดับ Delay เท่ากับ 0.1s แล้ว ON CB
3. ทำการทดสอบโดยการปรับเพิ่มแรงดันขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งรีเลย์ทำงาน (ไฟแสดงสถานะแรงดันเกินติด) บันทึกค่าแรงดันทำงาน (release value) จากนั้นปรับค่าแรงดันในทิศทางย้อนกลับจนกระทั่งรีเลย์กลับสู่สภาวะปกติ บันทึกค่าแรงดันปลด (release value) ลงในตารางที่ 4.2 พร้อมทั้งคำนวณค่า resetting ratio
4. ทำการปรับลดแรงดันลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งรีเลย์ทำงาน (ไฟแสดงสถานะแรงดันต่ำติด) บันทึกค่าแรงดันทำงาน (release value) จากนั้นปรับค่าแรงดันในทิศทางย้อนกลับจนกระทั่งรีเลย์กลับสู่สภาวะปกติ บันทึกค่าแรงดันปลด (release value) ลงในตารางที่ 4.3 พร้อมทั้งคำนวณค่า resetting ratio

ผลการทดลองที่ 2

ตารางที่ 4.2 การปรับตั้งค่า voltage max (%Ue) เท่ากับ 105

operating value	release value	resetting ratio
400.3	380.2	105

รูปที่ 4.3 operating value ที่การปรับตั้งค่า Ue เท่ากับ 380 และ voltage max (%Ue) เท่ากับ 105

รูปที่ 4.4 release value ที่การปรับตั้งค่า Ue เท่ากับ 380 และ voltage max (%Ue) เท่ากับ 105

ตารางที่ 4.3 การปรับตั้งค่า voltage min (%Ue) เท่ากับ 95

operating value	release value	resetting ratio
361.2	380.9	95

รูปที่ 4.5 operating value ที่การปรับตั้งค่า Ue เท่ากับ 380 และ voltage min (%Ue) เท่ากับ 95

รูปที่ 4.6 release value ที่การปรับตั้งค่า Ue เท่ากับ 380 และ voltage min (%Ue) เท่ากับ 95

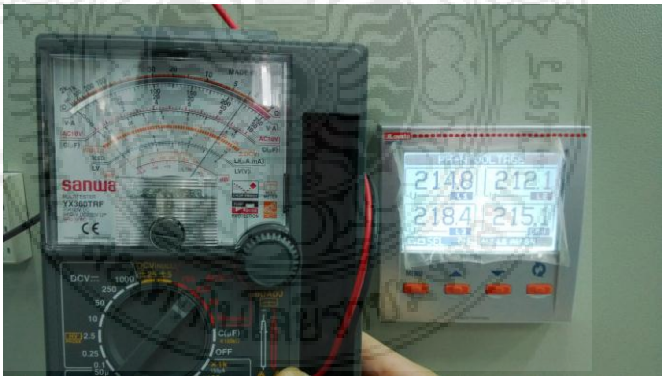
ขั้นตอนการทดลองที่ 3

1. ต่อสายต่อวงจรจากแหล่งจ่ายไปยังแบบจำลองอุปกรณ์ป้องกันในระบบสายส่งสามเฟส
2. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าต้นสายและปลายสาย
3. คำนวณ voltage regulation

ผลการทดลองที่ 3

แรงดันไฟฟ้าต้นสาย (V_S) = 220 V

แรงดันไฟฟ้าปลายสาย (V_R) = 214.8 V



รูปที่ 4.7 แรงดันไฟฟ้าต้นสาย (V_S) และ แรงดันไฟฟ้าปลายสาย (V_R)

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง ปัญหา และข้อเสนอแนะ

โครงงานนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เข้าใจหลักการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังและเพื่อให้เข้าใจวิธีการใช้อุปกรณ์ป้องกันสายส่งสามเฟสที่ถูกต้อง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองที่ 1 ผลจากการทดลองทั้งสองครั้ง โดยแต่ละครั้งทำการปรับตั้งค่า Configurable rated voltage (Ue) ของรีเลย์เท่ากับ 400 และ 380 ตามลำดับ จากนั้นทำการปรับเพิ่มแรงดันขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งรีเลย์มีการเปลี่ยนแปลงหน้าสัมผัสหรือรีเลย์อยู่ในสถานะแรงดันปกติ ซึ่งแรงดันที่วัดได้ขณะนั้นหรือค่า measurements voltage ในตารางที่ 4.1 จะได้เท่ากับ 401.8 v (การปรับตั้งค่า Configurable rated voltage (Ue) เท่ากับ 400) และ 381.3 v (การปรับตั้งค่า Configurable rated voltage (Ue) เท่ากับ 380) ซึ่งค่าที่ได้จะใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าการปรับตั้ง Configurable rated voltage (Ue) การทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าการปรับปรับตั้งค่า Configurable rated voltage (Ue) ของรีเลย์แรงดันก็คือการปรับตั้งค่าแรงดันที่ต้องการให้รีเลย์อยู่ในสภาวะปกติ

จากการทดลองที่ 2 เมื่อทำการปรับตั้งค่า voltage max (%Ue) ของรีเลย์ไว้ที่ 105 voltage min (%Ue) ของรีเลย์ไว้ที่ 95 และตั้งค่าหน่วงเวลาการทำงานของรีเลย์ไว้ที่ 0.1 วินาที เพื่อให้รีเลย์ทำงานแบบทันทีทันใด กดสวิตช์ ON เบรกเกอร์ จากนั้นทำการปรับเพิ่มแรงดันขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งแรงดันเกิน รีเลย์จะทำงานทันที ทำให้เบรกเกอร์ตัดวงจร แรงดันที่วัดได้ขณะนั้นเท่ากับ 400.3 V และเมื่อลดระดับแรงดันลงรีเลย์จะกลับเข้าสู่สถานะปกติที่แรงดันเท่ากับ 380.2 V กดสวิตช์ ON เบรกเกอร์ จากนั้นทำการปรับลดแรงดันลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งแรงดันต่ำ รีเลย์จะทำงานทันที ทำให้เบรกเกอร์ตัดวงจร แรงดันที่วัดได้ขณะนั้นเท่ากับ 361.2 V และเมื่อปรับเพิ่มแรงดันขึ้นรีเลย์จะกลับเข้าสู่สถานะปกติอีกครั้งที่แรงดันเท่ากับ 380.9 V เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาทำการคำนวณหาค่า resetting ratio ในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ค่าที่คำนวณได้เท่ากับ 105 และ 95 ซึ่งได้เท่ากับค่าที่ได้ทำการปรับตั้งค่า voltage max (%Ue) และ voltage min (%Ue) ของรีเลย์

สรุปผลการทดลองที่ 3 จากการทดลองค่าที่ได้จากการทดลองก็คือ แรงดันไฟฟ้าต้นสาย (V_S) = 220 V และ แรงดันไฟฟ้าปลายสาย (V_R) = 214.8 V ซึ่งสามารถนำค่าแรงดันที่ได้ประกอบกับค่าพารามิเตอร์ของสายส่งไปคำนวณหาค่า voltage regulation ได้ดังนี้

$R = 0.1339$ โอห์ม/ไมล์ $L = 2.179$ มิลลิเฮนรี/ไมล์ $C = 0.0137$ ไมโครฟารัด/ไมล์

$$z = 0.1339 + j2\pi \times 50 \times 2.179 \times 10^{-3}$$

$$= 0.6975\angle 78.93^{\circ}\ \Omega / \text{ mile}$$

$$y = j2\pi \times 50 \times 0.0137 \times 10^{-6}$$

$$= 4.30398 \times 10^{-6}\angle 90^{\circ}\ \text{S / mile}$$

$$\gamma = \sqrt{yz}$$

$$= \sqrt{3.002 \times 10^{-6}}\angle 84.465^{\circ}$$

$$= 0.0001671 + j0.0017245$$

$$= 0.001733\angle 84.465^{\circ}$$

$$yl = \alpha l + j\beta l$$

$$= (0.0001671 + j0.0017245)150$$

$$= 0.025 + j0.2587$$

$$A = \cosh yl$$

$$= \cosh(\alpha + j\beta)$$

$$= \frac{1}{2}\left(e^{al}\angle \beta l\right) + e^{-al}\angle -\beta l$$

$$= \frac{1}{2}\left(1.0254\angle 14.83^{\circ} + 0.9752\angle -14.83^{\circ}\right)$$

$$= 0.967 + j0.006424$$

$$= 0.967\angle 0.3867^{\circ}$$

$$V_{reg} = \frac{\left|V_S / A\right| - \left|V_R\right|}{\left|V_R\right|} \times 100$$

$$= \frac{\left|220 / 0.967\right| - \left|214.8\right|}{\left|214.8\right|} \times 100$$

$$= 5.92\%$$

ซึ่งเปอร์เซ็นต์ voltage regulation หรือ เปอร์เซ็นต์การควบคุมค่าแรงดัน ที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 5.92 % เนื่องจากสายส่งมีค่าความต้านทานและเกิดความเหนี่ยวนำเมื่อมีกระแสไหลผ่าน ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในรูปของความร้อน I^2R และเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนสายมีทิศทางต้านกลับ จึงทำให้แรงดันปลายสายลดลง

5.2 ปัญหา

การพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำโดยใช้แกนเหล็กหม้อแปลงอาจมีค่าความเหนี่ยวนำที่คลาดเคลื่อนไม่เท่ากับค่าที่ได้ออกแบบ ซึ่งการพันขดลวดให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามที่ต้องการนั้นทำได้ยาก จึงทำให้ผลการทดลองที่ 3 คลาดเคลื่อนได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. กรณีที่ไฟแสดงสถานะของรีเลย์ติดกระพริบพร้อมกันทุกดวงแสดงว่ากำลังต่อวงจรสลับเฟส

2. เพื่อความปลอดภัยขณะทำการทดลองควรต่อกราวด์ทุกครั้ง

บรรณานุกรม

กิตติพัฒท์ ตันตระรุ่งโรจน์. ทฤษฎีสายส่งไฟฟ้า. กรุงเทพฯ. วิทยพัฒน์, 2541

ชวลิต ดำรงรัตน์. การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า. ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2521

ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช. การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง. ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2521

ธัชชัย สุมิตร. รีเลย์ป้องกันระบบพลังงานไฟฟ้า. สมาคมสงเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2525

สมเกียรติ ผลประการ. วิศวกรรมการส่งและจ่ายไฟฟ้า. กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์คุรุสภา, 2515

สมาน จันทรักษา. ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าของ กฟน. กองฝึกอบรมและพัฒนาการไฟฟ้านครหลวง, 2529

สุรัตน์ นันตะสุคนธ์. ระบบไฟฟ้ากำลัง. สมาคมสงเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2537

Seshadri, S.R., Fundamental of Transmission Line and Electromagetic Fields,

Stevenson W.D. Elements of Power System Analysis. 2 nd ed., New Yok : McGraw-Hill Book Company, 1962

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงขนาดและคุณสมบัติของสายไฟฟ้าอลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR)

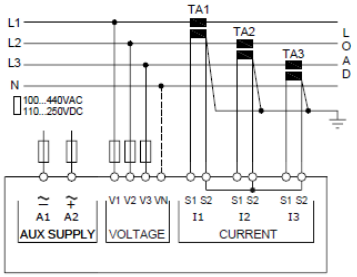
ขนาดสาย MCM และ AWG	จำนวนเส้นอลูมิเนียมต่อเหล็ก	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของสายไฟฟ้า (นิ้ว)	แรงดึงสูงสุด (ปอนด์)	น้ำหนักต่อ 1 ไมล์ (ปอนด์)	GMR (ฟุต)	ความต้านทานที่ 50 C (โอห์ม/สาย/ไมล์)	Inductive Reactance ที่ระยะห่าง 1ฟุต (โอห์ม/สาย/ไมล์)	Capacitive Reactance ที่ระยะห่าง 1ฟุต (โอห์ม/สาย/ไมล์)
1590	54/19	1.545	56,000	10,777	0.0520	0.0675	0.2992	0.0977
*1272	54/19	1.382	44,800	8,621	0.0465	0.0840	0.3100	0.1016
954	54/7	1.196	34,200	6,479	0.0403	0.1118	0.3250	0.1068
795	54/7	1.093	28,500	5,399	0.0368	0.1358	0.3342	0.1100
*795	42/7	1.055	21,050	4,518	0.0347	0.1339	0.4078	0.0930
636	54/7	0.977	23,600	4,319	0.0329	0.1678	0.3450	0.1140
636	26/7	0.990	25,000	4,616	0.0335	0.1618	0.3433	0.1135
477	30/7	0.883	23,300	3,933	0.0304	0.1960	0.3533	0.1176
*477	26/7	0.858	19,430	3,462	0.0290	0.1960	0.3583	0.1186
336.4	30/7	0.741	17,040	2,774	0.0255	0.2780	0.3708	0.1238
*336.4	26/7	0.721	14,050	2,442	0.0244	0.2780	0.3758	0.1248
*226.8	26/7	0.642	11,250	1,936	0.0217	0.3850	0.3875	0.1289
*226.8	6/7	0.633	9,645	1,802	0.00684	0.5100	0.5042	0.1294
*4/0	6/1	0.563	8,420	1,542	0.00814	0.5670	0.4842	0.1336
2/0	6/1	0.447	5,345	970	0.00510	0.8660	0.5342	0.1418
*1/0	6/1	0.398	4,280	769	0.00446	1.0800	0.5466	0.1460

หมายเหตุ *เป็นขนาดที่นิยมใช้อยู่แล้วในประเทศไทย ความถี่ไฟฟ้า = 50 รอบต่อวินาที

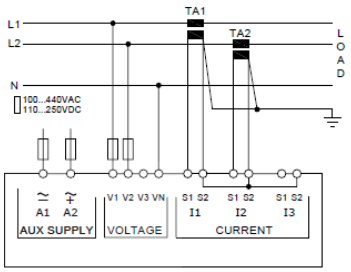
ภาคผนวก ข

Schemi di connessione	*Wiring diagrams*

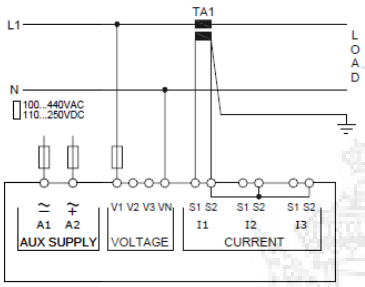
Connessione trifase con o senza neutro
3-phase connection whit or without neutral
P01.07 = L1-L2-L3-N L1-L2-L3



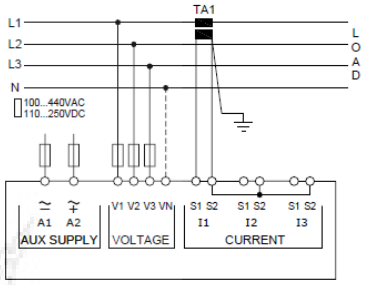
Connessione bifase
2-phase connection
P01.07 = L1-N-L2



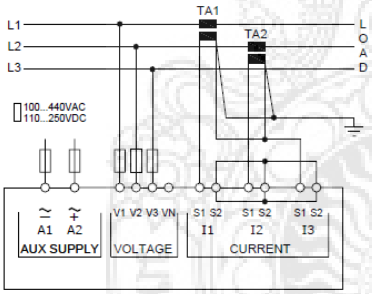
Connessione monofase
Single-phase connection
P01.07 = L1-N



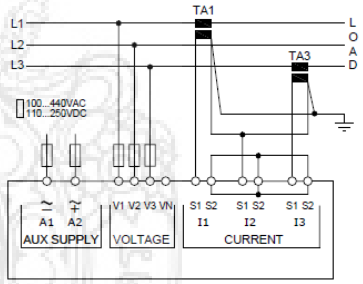
Connessione trifase bilanciata con o senza neutro
Balanced 3-phase connection whit or without neutral
P01.07 = L1-L2-L3-N-BIL L1-L2-L3-BIL



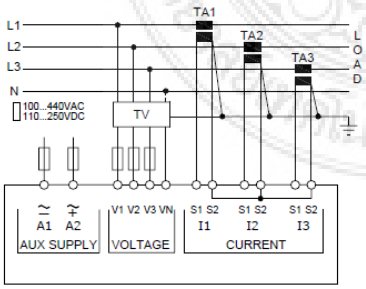
Connessione ARON 3 fasi senza neutro
ARON connection 3-phase without neutral
P01.07 = L1-L2-L3



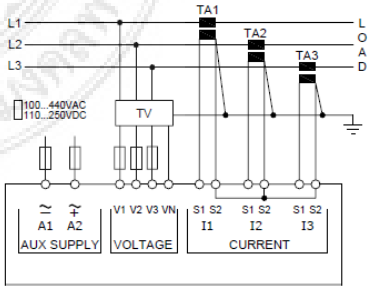
Connessione ARON 3 fasi senza neutro
ARON connection 3-phase without neutral
P01.07 = L1-L2-L3



Connessione trifase con neutro mediante TV
3 phase connection with neutral via VT
Impostare P01.04, P01.05 e P01.06 – *Set P01.04, P01.05 and P01.06*
P01.07 = L1-L2-L3-N



Connessione trifase senza neutro mediante TV
3 phase connection without neutral via VT
Impostare P01.04, P01.05 e P01.06 – *Set P01.04, P01.05 and P01.06*
P01.07 = L1-L2-L3



NOTE

1. Fusibili raccomandati:
Alimentazione ausiliaria e ingresso misura tensione: 1Amp rapido

2. I morsetti S2 sono internamente connessi fra di loro.

NOTES

1. Recommended fuses:
Aux supply and measure inputs voltage: 1Amp. fast

2. S2 terminals are internally interconnected.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายกฤษณะ สุขสุดา
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 14 สิงหาคม พ.ศ. 2533
สถานที่เกิด	จังหวัด ชุมพร
ที่อยู่ปัจจุบัน	82/1 หมู่ 8 ต.วังไผ่ อ.เมือง จ.ชุมพร 86190

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2551	สำเร็จการศึกษาในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคชุมพร
พ.ศ. 2552	ศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายเกียรติพงษ์ พิพัฒน์พงษ์
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2533
สถานที่เกิด	จังหวัด ชุมพร
ที่อยู่ปัจจุบัน	208/3 หมู่ 11 ต.บางหมาก อ.เมือง จ.ชุมพร 86000

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2551	สำเร็จการศึกษาในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชา ช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคชุมพร
พ.ศ. 2552	ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายธเนษฐ เลนะพันธ์
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 29 มิถุนายน พ.ศ. 2533
สถานที่เกิด	จังหวัด สุราษฎร์ธานี
ที่อยู่ปัจจุบัน	169/1 หมู่ 1 ต.ทุ่งเตา อ.บ้านนาสาร จ.สุราษฎร์ธานี 84120

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2551	สำเร็จการศึกษาในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชา ช่างอิเล็คทรอนิคส์ โรงเรียนอาชีวะดอนบอสโกสุราษฎร์
พ.ศ. 2552	ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ