ศึกษาระบบการป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

STUDY PROTECTING SYSTEM OF POWER TRANSFORMER

นาย พร้อมพงศ์ ม่วงศรีศักดิ์ รหัส 48361646

นาย สิทธิพงษ์ เพ็งประเดิม รหัส 48361943

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 17 มิ.ย. 2553
เลขทะเบียน 1500876
เลขเรียกหนังสือ ปร ฬ 299ศ 2551
มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2551

ใบรับรองโครงงานวิศวกรรม

หัวข้อโครงงาน ศึกษาระบบการป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ผู้ดำเนินโครงงาน นาย พร้อมพงศ์ ม่วงศรีศักดิ์ รหัส 48361646

นาย สิทธิพงษ์ เพ็งประเดิม รหัส 48361943

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2551

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการการสอบโครงงานวิศวกรรม

.....ประธานกรรมการ

(ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช)

.....กรรมการ

(อาจารย์แสงชัย มังกรทอง)

.....กรรมการ

(ดร. มุฑิตา สงฆ์จันทร์)

หัวข้อโครงงาน	ศึกษาระบบการป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
ผู้ดำเนินโครงงาน	นาย พร้อมพงศ์ ม่วงศรีศักดิ์ รหัส 48361646
	นาย สิทธิพงษ์ เพ็งประเดิม รหัส 48361943
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2551

.....

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงงานนี้เพื่อศึกษาระบบป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญ ในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้กล่าวถึง การป้องกันทางไฟฟ้า และการป้องกันทางกล ได้แก่ การป้องกันวัดค่าผลต่าง การป้องกันกระแสเกิน อุปกรณ์ป้องกันทางกลชนิดต่างๆ และแสดงการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตกับการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

Project Title	Study Protecting System of Power Transformer	
Name	Mr. Prompong Muangsrisak	ID. 48361646
	Mr. Sittipong Pengpraderm	ID. 48361943
Project Advisor	Somporn Ruangsinchaiwanich, Ph.D.	
Major	Electrical Engineering	
Department	Electrical and Computer Engineering	
Academic Year	2008	

.....

ABSTRACT

The objective of this project was the study protecting system of the power transformer which is major electrical equipment. The thesis is related with an electrical protecting and mechanical protecting included the differential relay, over current relay, protecting equipments and show the way to choosing the protecting of the power transformer from the instruction of the manufacturer and the way to choosing the protecting equipments from the Electricity Generating Authority of Thailand.

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบพระคุณ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้ความรู้ทางทฤษฎี แนวคิด ชี้แนะแนวทาง และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานชิ้นนี้ ตลอดจนเสียสละเวลาทำงานและเวลาว่างในการตรวจโครงงานวิทยานิพนธ์และชี้แนะข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อแก้ไขจนถูกต้องและเสร็จสมบูรณ์

พร้อมกันนี้ใคร่ขอขอบคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้มาให้ตั้งแต่ระดับอนุบาล จนถึงระดับมหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งที่นำมาประยุกต์ใช้ในโครงการนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้ ให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่มีคุณค่า แก่คณะผู้จัดทำโครงงานชิ้นนี้เสมอมา

คณะผู้จัดทำโครงงาน
นาย พร้อมพงศ์ ม่วงศรีศักดิ์
นายสิทธิพงษ์ เพ็งประเดิม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ฉ

สารบัญรูป ..... ช

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 1

1.3 ขอบข่ายของโครงงาน 1

1.4 กิจกรรมการดำเนินงาน 2

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.6 งบประมาณของโครงงาน 2

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

2.1 โครงสร้างหม้อแปลง 3

2.1.1 แกนเหล็กหม้อแปลง 3

2.1.2 ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า 8

2.1.3 ตัวถังหม้อแปลง 11

2.1.4 วิธีระบายความร้อน 13

2.2 การแบ่งชนิดหม้อแปลง 15

2.2.1 หม้อแปลงที่แบ่งตามขนาด 15

2.2.2 ชนิดของหม้อแปลงที่แบ่งตามลักษณะของฉนวนป้องกัน 16

2.2.3 ชนิดของหม้อแปลงที่แบ่งตามลักษณะการใช้งาน 17

2.3 การต่อหม้อแปลง 20

2.3.1 การต่อหม้อแปลง 3 เฟส 20

2.4 ฟอลต์ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า 22

2.4.1 ฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายนอก 22

2.4.2 ฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายใน 23

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5 การป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า 25
2.5.1 การป้องกันทางไฟฟ้า 25
2.5.2 การป้องกันทางด้านความร้อน 32
2.5.3 การป้องกันทางด้านความดันและก๊าซภายในตัวถังหม้อแปลง 33
บทที่ 3 ระบบป้องกันหม้อแปลง
3.1 การป้องกันทางไฟฟ้า 34
3.1.1 รีเลย์ผลต่าง 34
3.1.2 รีเลย์กระแสเกิน 44
3.1.3 เพาเวอร์ฟิวส์ 47
3.1.4 กับดักเสิร์จ 48
3.2 การป้องกันทางกล 50
3.2.1 อุปกรณ์ปล่อยความดัน 50
3.2.2 รีเลย์ความดันทันทีทันใด 51
3.2.3 บุคโฮลซ์รีเลย์ 52
3.2.4 อุปกรณ์ระบายความดันและวัดความดัน 54
3.2.5 ตัวตรวจจับก๊าซ 55
3.2.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิขดลวดน้ำมัน 55
3.3 คำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ป้องกัน และ การใช้งานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ . 57
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์
4.1 วิเคราะห์อุปกรณ์ป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้า 60
4.1.1 อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย 60
4.1.2 อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 62
บทที่ 5 บทสรุป
5.1 สรุปผลที่ได้จากการศึกษา 64
5.2 ปัญหาที่พบ 65
เอกสารอ้างอิง 66
ประวัติผู้เขียนโครงงาน 68

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 กิจกรรมการดำเนินงาน 2

2.1 ชนิดของการไหลเวียน 14

2.2 วิธีระบายความร้อนของหม้อแปลง 14

3.1 ตารางการเลือกค่าเปอร์เซ็นต์ความชัน 40

3.2 ตารางการเลือกพิกัดกระแสต่อเนื่องของฟิวส์ 47

3.3 ตารางการเลือกใช้งานบุคโฮลซ์รีเลย์ 54

3.4 ตารางการป้องกันหม้อแปลงขนาดตั้งแต่ 1 ~ 5,000 kVA 57

3.5 ตารางการป้องกันหม้อแปลงขนาดมากกว่า 5,000 ~ แต่ไม่เกิน 10MVA 58

3.6 ตารางการป้องกันหม้อแปลงขนาดตั้งแต่ 10 MVA ขึ้นไป 58

3.7 ตารางการป้องกันความดันหม้อแปลงขนาดตั้งแต่ 10 MVA ขึ้นไป 59

4.1 วิเคราะห์อุปกรณ์ป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย 60

4.2 วิเคราะห์อุปกรณ์ป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 62

5.1 อุปกรณ์ป้องกันพื้นฐานที่ควรมีในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย 64

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 เส้นแรงสนามแม่เหล็กของวิธีการม้วนร้อน 4

2.2 เส้นแรงสนามแม่เหล็กของวิธีแผ่นเหล็กม้วนเย็นที่มีการเรียงตัวของผลึกคริสตัล 4

2.3 แกนเหล็กแบบ 1 เฟส 2 ขา 5

2.4 แกนเหล็กแบบ 1 เฟส 3 ขา 5

2.5 แกนเหล็กแบบ 1 เฟส 4 ขา 6

2.6 แกนเหล็กแบบ 3 เฟส 3 ขา 6

2.7 แกนเหล็กแบบ 3 เฟส 5 ขา 7

2.8 แกนเหล็กแบบเชลของหม้อแปลง 1 เฟสและหม้อแปลง 3 เฟส 8

2.9 การพันขดลวดแบบก้นหอย 9

2.10 การพันขดลวดแบบแผ่นจาน 9

2.11 พันขดลวดแบบทรงกระบอก 10

2.12 การพันขดลวดแบบสลับข้ามบนล่าง 10

2.13 การพันขดลวดหม้อแปลงแบบเชล 11

2.14 ตัวถังแบบเรียบ 11

2.15 ตัวถังแบบมีท่อไหลเวียนน้ำมัน 12

2.16 ตัวถังแบบมีแผงระบายความร้อน 12

2.17 ตัวถังแบบติดตั้งตัวระบายความร้อนแยกจากตัวถัง 13

2.18 หม้อแปลงในระบบจำหน่าย 15

2.19 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 15

2.20 หม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง 16

2.21 หม้อแปลงแบบฉนวนเหลว 16

2.22 หม้อแปลงแบบปรับแรงดันขณะจ่ายโหลด 17

2.23 หม้อแปลงแบบรักษาระดับเอ้าท์พุตให้คงที่ 17

2.24 หม้อแปลงแบบเลื่อนมุมเฟส 18

2.25 หม้อแปลงเตาหลอม 18

2.26 หม้อแปลงที่ต่อแบบสก็อตหรือที 19

2.27 หม้อแปลงต่อลงดิน 19

2.28 หม้อแปลงเครื่องวัด 20

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.29 การต่อหม้อแปลงแบบเดลต้า-เดลต้า 20
2.30 การต่อหม้อแปลงแบบสตาร์-สตาร์ 21
2.31 การต่อหม้อแปลงแบบ เดลต้า-สตาร์ 21
2.32 การต่อหม้อแปลงแบบสตาร์-เดลต้า 21
2.33 การต่อหม้อแปลงแบบวี-วี 22
2.34 การป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงแปลง 1 เฟส 26
2.35 แสดงคุณลักษณะผลต่างเปอร์เซ็นต์ทางปฏิบัติ 27
2.36 การป้องกันฟอลต์ลงดินของขดลวดเดลต้าและสตาร์โดยใช้รีเลย์ 87N 29
2.37 การป้องกันฟอลต์ลงดินของขดลวดเดลต้าและสตาร์โดยใชรีเลย์ 67N 29
2.38 การป้องกันฟอลต์ลงดินแบบจำกัดบริเวณ 30
2.39 การป้องกันแบบผสมระหว่างการวัดผลต่างและฟอลต์ลงดินแบบจำกัดบริเวณ 31
2.40 การป้องกันฟอลต์จากตัวถังลงดิน 32
3.1 เกิดความผิดพร่องภายนอกเขตการป้องกัน 35
3.2 เกิดความผิดพร่องภายในเขตการป้องกัน 35
3.3 กราฟคุณลักษณะรีเลย์ผลต่างแบบไม่มีการไบแอส 36
3.4 กราฟคุณลักษณะรีเลย์ผลต่างแบบเปอร์เซนต์ไบแอส 36
3.5 แสดงค่าการทำงานของรีเลย์ผลต่างแบบเปอร์เซนต์ไบแอส 37
3.6 รีเลย์ผลต่าง 38
3.7 เส้นโค้งเปอร์เซ็นต์ความชันของรีเลย์แบบดิจิตอล 44
3.8 รีเลย์กระแสเกิน 45
3.9 ฟิวส์ 48
3.10 กับดักเสิร์จ 50
3.11 อุปกรณ์ปล่อยความดัน 51
3.12 รีเลย์ความดันทันทีทันใด 51
3.13 บุคโฮลซ์รีเลย์ 52
3.14 การป้องกันการสะสมของก๊าซในตัวถังหม้อแปลง 52
3.15 การป้องกันความดันสูงทันทีทันใด 53
3.16 การป้องกันตัวถังหม้อแปลงรั่ว 53

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.17 อุปกรณ์ระบายความดันและวัดความดัน 55

3.18 ตัวตรวจจับก๊าซและถุงยาง 55

3.19 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิขดลวดและน้ำมันในหม้อแปลง 56

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้า ที่มีแรงดันไฟฟ้าต่างกัน โดยจะทำหน้าที่เพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะกับการส่ง การจ่าย และการใช้พลังงานไฟฟ้า หม้อแปลงจึงนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในบรรดาอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหลาย การขัดข้องหรือการชำรุดเสียหายของหม้อแปลง มักมีผลกระทบต่อการใช้ไฟฟ้า หรือกระบวนการผลิตอย่างมากและเป็นเวลานาน ดังนั้นหม้อแปลงนอกจากจะต้องถูกออกแบบผลิต ติดตั้งอย่างถูกต้องและมีคุณภาพแล้ว การใช้งานและการดูแลรักษาก็เป็นปัจจัยสำคัญที่จะหลีกเลี่ยงการขัดข้องหรือการชำรุดเสียหายดังกล่าวได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อศึกษาระบบป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

1.2.3 เพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

1.3 ขอบข่ายของโครงงาน

1.3.1 สามารถทราบว่าอุปกรณ์ป้องกันชนิดใดที่เหมาะสมกับหม้อแปลงชนิดต่างๆ

1.3.2 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอุปกรณ์ชนิดใดเหมาะสมกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย

1.4 กิจกรรมการดำเนินงาน

รายละเอียด	ปี 2551						ปี 2552			
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับระบบป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	■	■	■							
2. รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้า			■	■	■					
3.วิเคราะห์ระบบป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังรูปแบบต่างๆ							■			
4.สรุปผลการวิเคราะห์ระบบป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและทำรูปเล่มรายงาน							■	■	■	■

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เข้าใจถึงหลักการทำงานของระบบป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

1.5.2 ได้รู้จักอุปกรณ์ป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

1.5.3 สามารถนำความรู้ไปเผยแพร่เพื่อให้เกิดประโยชน์

1.6 งบประมาณ

1.6.1 ค่ากระดาษและถ่ายเอกสาร	1,000 บาท
1.6.2 ค่าจัดทำรูปเล่ม	1,000 บาท
รวมเป็นเงิน	2,000 บาท (สองพันบาทถ้วน)

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 โครงสร้างหม้อแปลง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างหม้อแปลงและองค์ประกอบอื่นๆ ของหม้อแปลงโดยจะเน้นที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่าย โครงสร้างและองค์ประกอบที่ใช้ในหม้อแปลงขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลง

2.1.1 แกนเหล็กหม้อแปลง (Transformer Core)

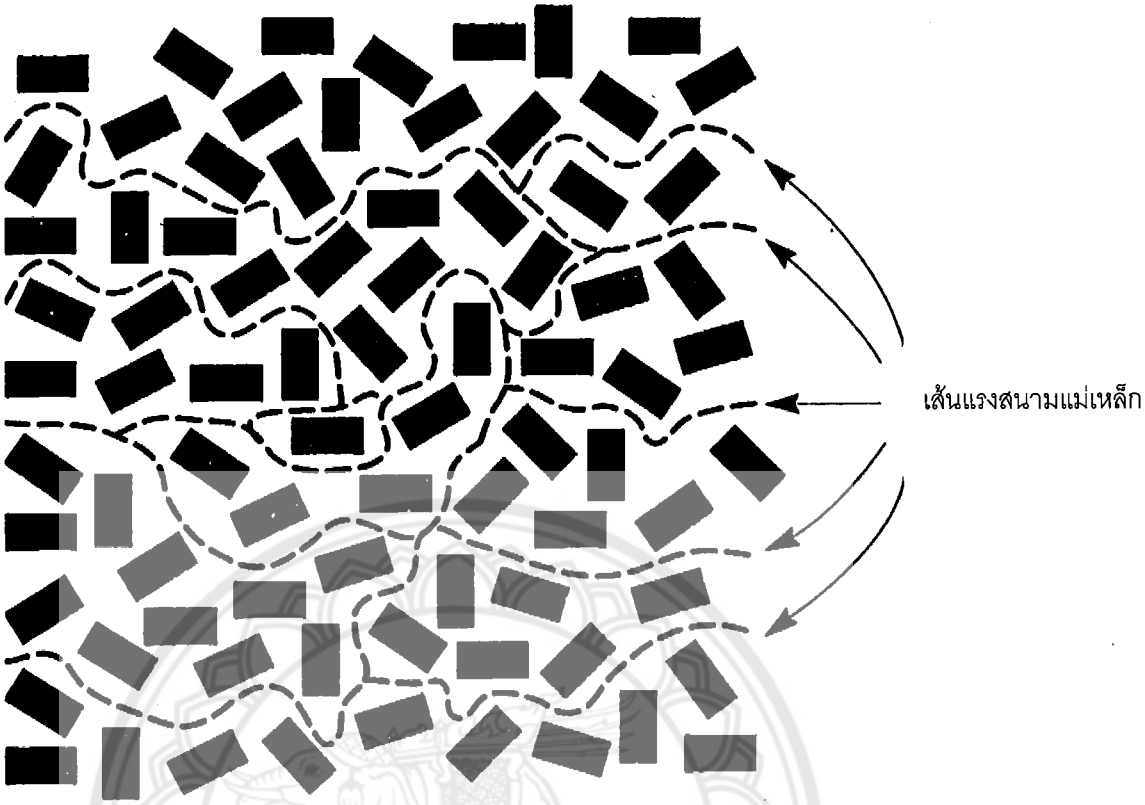
2.1.1.1 วัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็ก

วัสดุที่นำมาใช้เป็นแกนเหล็กหม้อแปลงจะทำจากเหล็กผสมซิลิกอน (Silicon) ประมาณ 4 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก ถ้าส่วนผสมของซิลิกอนเกินกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักจะทำให้แผ่นเหล็กแตกหักง่ายไม่สามารถนำมาตัดหรือปั๊มขึ้นรูปเป็นแกนเหล็กได้ และยังมีผลทำให้แกนเหล็กสูญเสียความอ่อนตัว (Ductility) โดยที่แกนเหล็กจะถูกทำให้เป็นแผ่นบางๆมีความหนาประมาณ 0.33 มิลลิเมตร แล้วนำมาเรียงซ้อนกันเพื่อลดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy Current) นอกจากนี้แผ่นเหล็กที่ผสมซิลิกอนจะต้องมีค่าความต้านทานสูง (High Resistance) เพื่อลดกระแสไหลวนในแกนเหล็กด้วยอีกทางและมีค่าความสูญเสียฮีสเตอรีซิสต่ำ (Low Hysteresis) กรรมวิธีในการผลิตแกนเหล็กหม้อแปลงสามารถแบ่งได้สองวิธีคือ

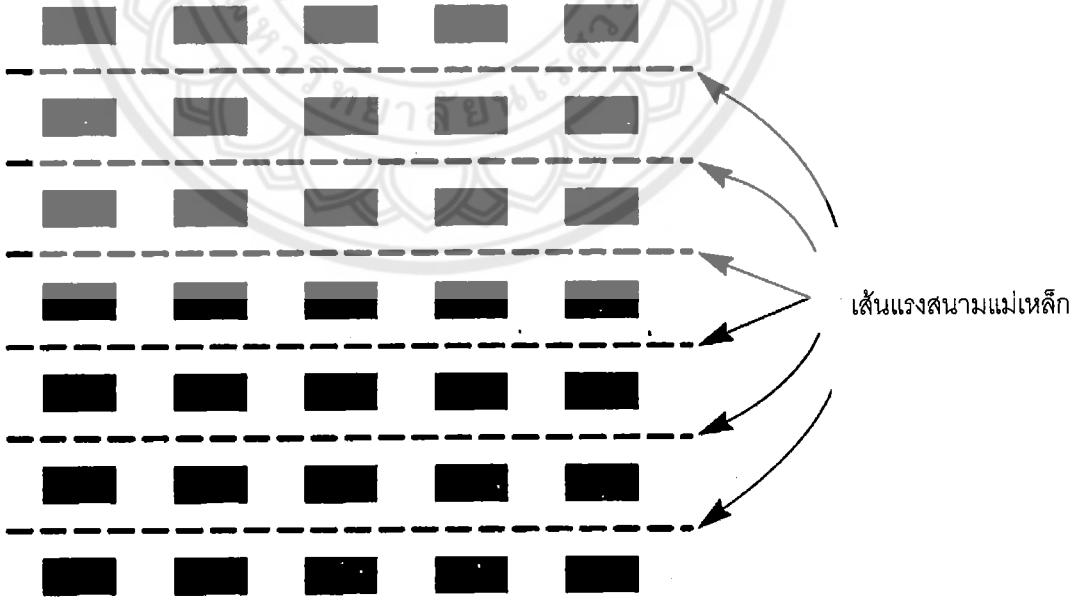
ก) แบบแผ่นเหล็กม้วนร้อน (Hot-rolled Sheet Steel) โดยวิธีแผ่นเหล็กม้วนร้อนนั้นผลึกคริสตัลภายในแผ่นเหล็กจะเรียงตัวแบบสุ่มจะไม่เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันและไม่เรียงตัวตามทิศทางของการม้วนแผ่นเหล็ก ทำให้ได้ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กที่ต่ำ (Low Permeability) เหมาะสมกับหม้อแปลงขนาดเล็กที่ไม่ต้องการพิกัดกำลังที่สูง

ข) แบบแผ่นเหล็กม้วนเย็น (Cold-rolled Sheet Steel) ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ต้องการพิกัดกำลังที่สูงจะใช้กรรมวิธีในการผลิตแกนเหล็กหม้อแปลงที่เรียกว่า แผ่นเหล็กม้วนเย็น โดยวิธีแผ่นเหล็กม้วนเย็นนั้นจะเกิดการเรียงตัวกันของผลึกคริสตัล (Cold-rolled Grain Oriented Silicon Steel) ซึ่งวิธีการนี้ทำให้คริสตัลเรียงตัวในทิศทางเดียวกับทิศทางการม้วนแผ่นเหล็กทำให้เกิดค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กสูงสุดและทำให้เกิดค่าความสูญเสียฮีสเตอรีซิสต่ำ

วิธีที่สองนั้นจะทำให้ลดความสูญเสียทางแกนเหล็กและทำให้มีคุณสมบัติของเส้นโค้งสนามแม่เหล็ก (B-H Curve) ดีกว่าวิธีแรก ในภาพที่ 2.1 และ 2.2 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กของวิธีการม้วนแผ่นเหล็กทั้งสองแบบ



รูปที่ 2.1 เส้นแรงสนามแม่เหล็กของวิธีการม้วนร้อน (Hot-rolled Sheet Steel) [2]



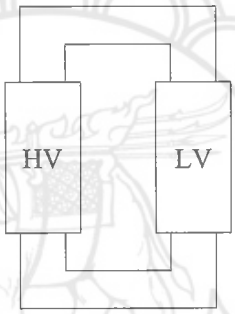
รูปที่ 2.2 เส้นแรงสนามแม่เหล็กของวิธีแผ่นเหล็กม้วนเย็นที่มีการเรียงตัวของผลึกคริสตัล (Cold-rolled Grain Oriented Silicon Steel) [2]

2.1.1.2 โครงสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลง

หม้อแปลงในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งตามโครงสร้างสนามแม่เหล็กโดยการจัดวางรูปแบบของแกนเหล็กซึ่งแบ่งได้ 2 ชนิด คือแกนเหล็กแบบคอร์ (Core-form Cores) และแกนเหล็กแบบเชล (Shell-form Cores)

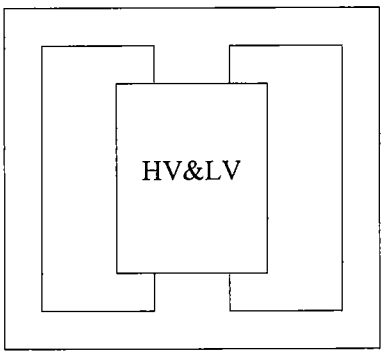
ก) แกนเหล็กแบบคอร์ โครงสร้างแบบนี้ขดลวด (Coil) จะพันรอบขาแกนเหล็ก (Leg) รูปแบบของแกนเหล็ก สามารถแบ่งได้เป็น 5 ชนิดได้แก่

-แกนเหล็กแบบ 1 เฟส 2 ขา โครงสร้างแบบนี้เป็นโครงสร้างทั่วไปของหม้อแปลง 1 เฟส โดยที่ขดลวดด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำจะแยกกันอยู่ในแต่ละขา และพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กในแต่ละขาจะเท่ากับพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กของโยค (Yoke) นิยมใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดพิกัดเล็กจนถึงพิกัดปานกลาง



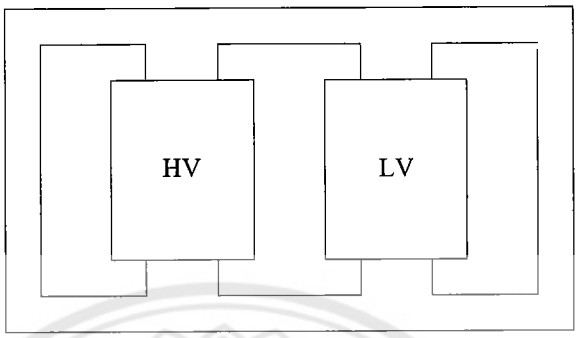
รูปที่ 2.3 แกนเหล็กแบบ 1 เฟส 2 ขา

-แกนเหล็กแบบ 1 เฟส 3 ขา โครงสร้างแบบนี้ขดลวดด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำจะอยู่บนแกนเหล็กขากลาง (Main Leg) พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กขากลางจะใหญ่กว่าแกนเหล็กขาด้านข้าง (Side Leg) และแกนเหล็กของโยค (Yoke) ประมาณสองเท่า เหมาะสำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดพิกัดใหญ่และมีพิกัดแรงดันไม่สูงมาก



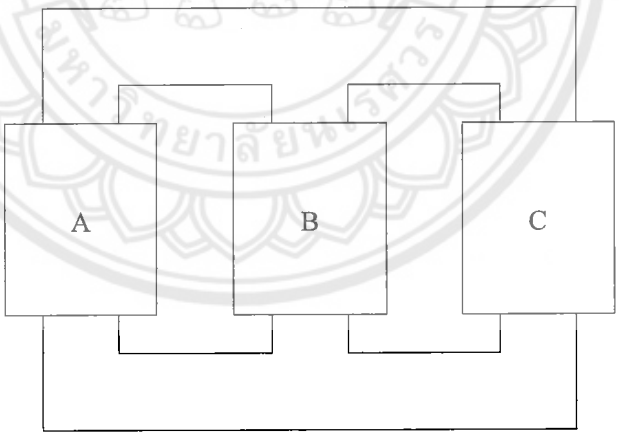
รูปที่ 2.4 แกนเหล็กแบบ 1 เฟส 3 ขา

-แกนเหล็กแบบ 1 เฟส 4 ขา โครงสร้างแบบนี้ขดลวดด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำจะแยกกันอยู่บนแกนเหล็กขาที่ 2 และขาที่ 3 (Main Leg) พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กขาที่ 2 และขาที่ 3 จะใหญ่กว่าแกนเหล็กขาด้านข้าง (Side Leg) ขาที่ 1 และขาที่ 4 และแกนเหล็กของโยค (Yoke) ประมาณสองเท่า เหมาะสำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดพิกัดใหญ่และมีพิกัดแรงดันสูงมาก



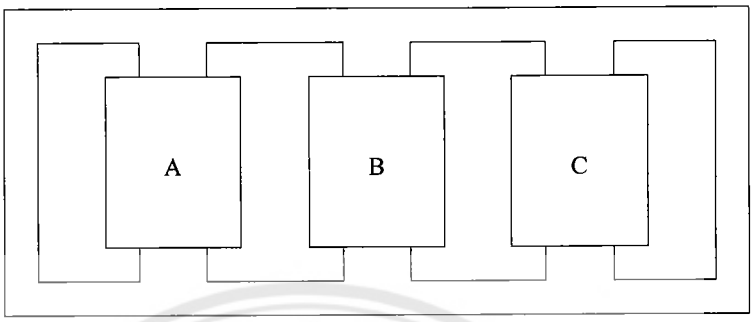
รูปที่ 2.5 แกนเหล็กแบบ 1 เฟส 4 ขา

-แกนเหล็กแบบ 3 เฟส 3 ขา โครงสร้างหม้อแปลงแบบนี้เป็นโครงสร้างทั่วไปของหม้อแปลง 3 เฟสโดยขดลวดด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำของแต่ละเฟสจะอยู่รวมกันในขาแกนเหล็กเดียวกัน พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กในแต่ละขาจะเท่ากับพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กของโยค เหมาะสำหรับหม้อแปลงพิกัดเล็กถึงพิกัดปานกลาง



รูปที่ 2.6 แกนเหล็กแบบ 3 เฟส 3 ขา

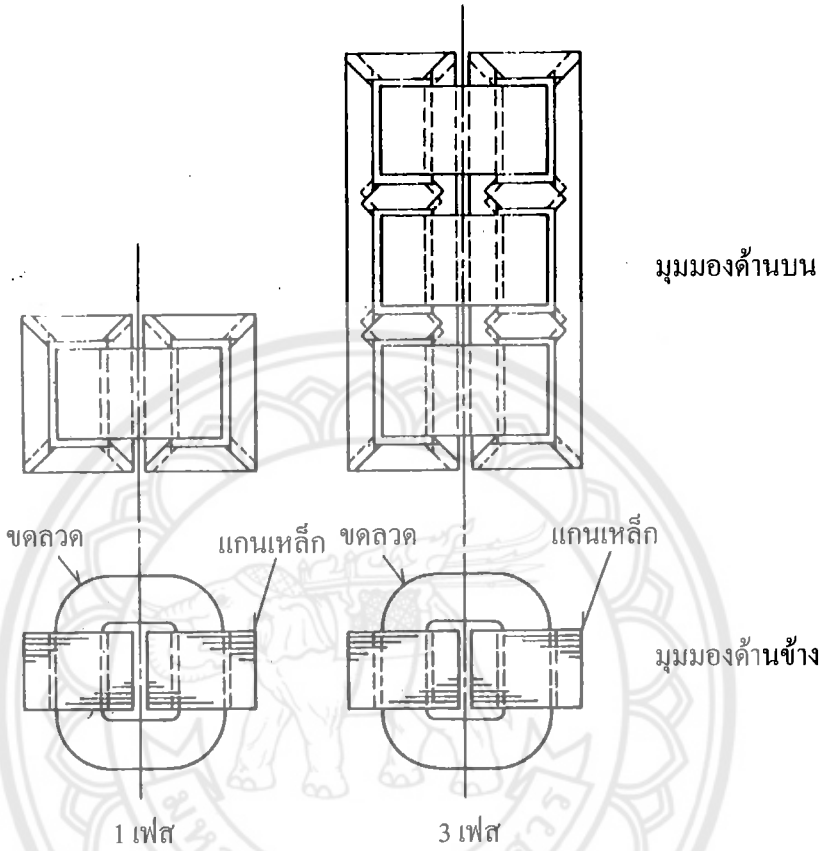
-แกนเหล็กแบบ 3 เฟส 5 ขา โครงสร้างแบบนี้การจัดวางขดลวดจะเหมือนกับแบบ 3 เฟส 3 ขาแต่จะมีแกนเหล็กขาด้านข้างเพิ่มขึ้นมา 2 ขา พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กขาหลัก (ขาที่ 2 ถึง ขาที่ 4) จะใหญ่กว่าแกนเหล็กขาด้านข้าง (ขาที่ 1 และ ขาที่ 5) และแกนเหล็กของโยค ประมาณ 2 เท่าใช้กับหม้อแปลงพิกัดใหญ่



รูปที่ 2.7 แกนเหล็กแบบ 3 เฟส 5 ขา

แกนเหล็กแบบคอร์สำหรับหม้อแปลงพิกัดใหญ่ (Large Capacity Transformer) จะมีปัญหาเรื่องฟลักซ์รั่วไหล (Leakage Flux) ที่เพิ่มขึ้นตามพิกัดหม้อแปลงและข้อจำกัดด้านความสูงของหม้อแปลงในการขนส่ง โดยทั่วไปหม้อแปลง 3 เฟสจะใช้แบบ 3 ขาและหม้อแปลง 1 เฟสจะใช้แบบ 2 ขา ดังนั้นหม้อแปลงพิกัดใหญ่ 3 เฟสจะใช้แบบ 5 ขา และหม้อแปลง 1 เฟสจะใช้แบบ 3 ขาหรือแบบ 4 ขาเพื่อการแก้ปัญหาข้างต้น โดยที่ขาด้านข้าง (Side Leg) ที่เพิ่มขึ้นมาจะช่วยเป็นเส้นทางเดินของฟลักซ์ทำให้ลดปริมาณฟลักซ์รั่วไหลที่เกิดขึ้นและยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของตัวถังอีกด้วย ในส่วนพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กของโยคทั้งด้านบนและด้านล่างมีขนาดเล็กลงด้านละ 50 เปอร์เซ็นต์ทำให้ความสูงของหม้อแปลงลดลงมาได้มาก

ข) แกนเหล็กแบบเชล โครงสร้างแบบนี้แกนเหล็กจะล้อมรอบขดลวดซึ่งมีการยึดจับและรองรับขดลวดได้ดีกว่าทำให้มีความแข็งแรงต่อแรงทางกลในขณะที่เกิดการลัดวงจร ดังแสดงในภาพที่ 2.8 คือชนิดของแกนเหล็กหม้อแปลงแบบเชลทั้ง 1 เฟส และ 3 เฟส



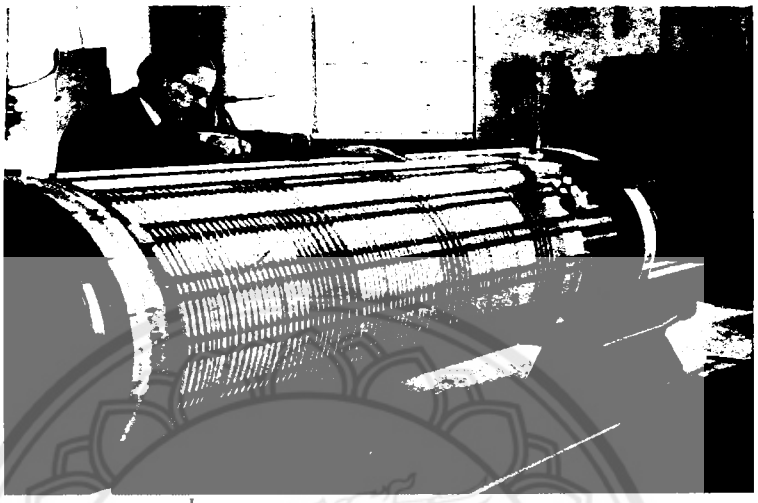
รูปที่ 2.8 แกนเหล็กแบบเชลของหม้อแปลง 1 เฟสและหม้อแปลง 3 เฟส [19]

2.1.2 ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Coils)

ตัวนำ (Conductor) ของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะมีลักษณะเป็นแผ่นทองแดงสี่เหลี่ยมผืนผ้าถูกหุ้มด้วยฉนวนกระดาษสีน้ำตาล (Kraft Paper) สามารถแบ่งลักษณะของตัวนำที่ใช้พันขดลวดเป็น 3 แบบคือ ตัวนำเดี่ยว (Single Conductor) ตัวนำหลายตัวนำ (Multi Conductor) และสายตัวนำแบบสลับไปมา (Transposed wire) นอกจากนี้ลักษณะการจัดวางและการพันขดลวดหม้อแปลงยังแบ่งได้ตามลักษณะโครงสร้างแกนเหล็กหม้อแปลงได้ดังนี้

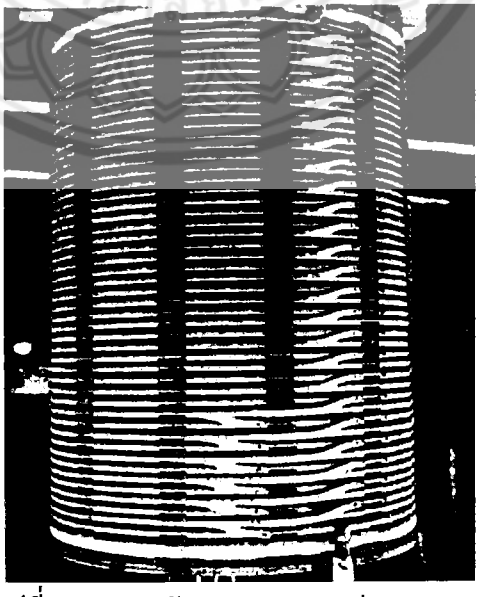
ก) การพันขดลวดหม้อแปลงแบบคอร์ คือการพันขดลวดหม้อแปลงแบบวางซ้อนกัน (Concentric Winding) ระหว่างขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำภายในขาแกนเหล็ก (Limb) เดียวกัน โดยที่ขดลวดแรงต่ำจะอยู่ด้านในและขดลวดแรงสูงจะอยู่ด้านนอกและสามารถแบ่งชนิดของการพันได้ดังนี้

-การพันขดลวดแบบก้นหอย (Helical Winding) ลักษณะการพันจะใช้ตัวนำหลายเส้นมาเรียงซ้อนกันตามแนวด้านแบน ซึ่งตัวนำจะต่อขนานกันแล้วนำมาพันรอบปลอกพันขดลวดแบบก้นหอย (Helix) ตั้งแต่ปลายด้านหนึ่งจนถึงปลายอีกด้านหนึ่ง การประยุกต์ใช้งาน จะเหมาะสำหรับใช้เป็นขดลวดหม้อแปลงด้านแรงต่ำหรือขดลวดหม้อแปลงที่รับกระแสสูง



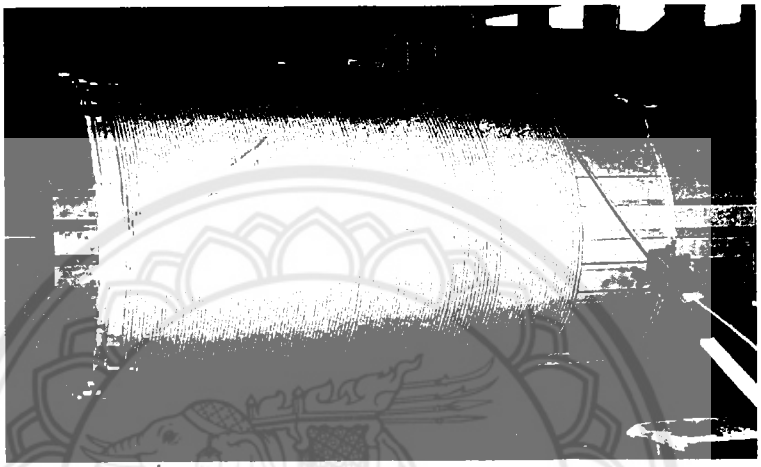
รูปที่ 2.9 การพันขดลวดแบบก้นหอย [19]

-การพันขดลวดแบบแผ่นจาน (Disk Winding) ลักษณะการพันจะใช้ตัวนำหนึ่งตัวหรือหลายตัว (ต่อขนานกัน) โดยจะพันรอบปลอกพันขดลวดอย่างต่อเนื่องและจะมีลักษณะคล้ายแผ่นจานในแต่ละรอบ การประยุกต์ใช้งานจะเหมาะสำหรับใช้เป็นขดลวดหม้อแปลงด้านแรงสูงมากกว่า



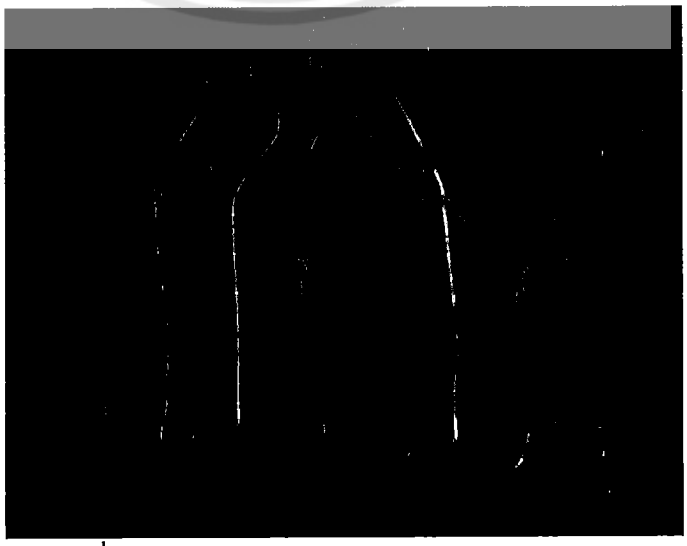
รูปที่ 2.10 การพันขดลวดแบบแผ่นจาน [19]

-การพันขดลวดแบบทรงกระบอก (Cylindrical Winding) ลักษณะการพันจะใช้ตัวนำหนึ่งตัวหรือหลายตัว (ต่อขนานกัน) โดยจะพันรอบปลอกพันขดลวดอย่างต่อเนื่อง ลักษณะการวางของขดลวดบนปลอกพันขดลวดจะไม่เหมือนกับแบบแผ่นจานการประยุกต์ใช้งานจะเหมาะสำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดเล็กและขนาดกลางใช้เป็นได้ทั้งขดลวดแรงต่ำและแรงสูง ส่วนใหญ่นิยมใช้กับหม้อแปลงที่มีตัวเปลี่ยนแท็ปขณะจ่ายโหลดเนื่องจากการพันแบบนี้จะทำให้การกระจายของกระแสต่อรอบ (Ampere-turn) มีความสม่ำเสมอตลอดทั้งความยาวขดลวด



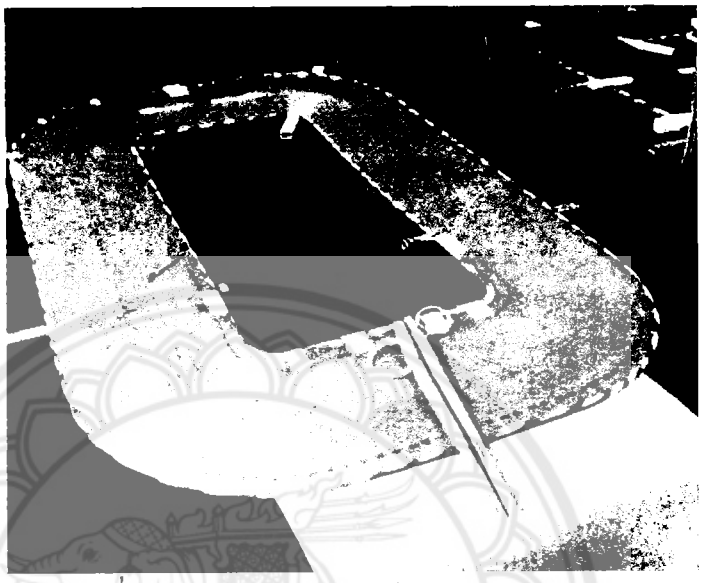
รูปที่ 2.11 การพันขดลวดแบบทรงกระบอก [19]

-การพันขดลวดแบบสลับข้ามบนล่าง (Cross Over Winding) ใช้กับขดลวดด้านแรงสูงที่ในหม้อแปลงขนาดเล็ก การพันแบบนี้ในแต่ละชุดขดลวด (Coil) จะประกอบไปด้วยขดลวดหลายชั้น (Layer) ในแต่ละชั้นจะประกอบด้วยขดลวดหลายรอบ ขดลวดที่สมบูรณ์แบบจะเป็นการนำเอาชุดขดลวดมาต่อเข้าด้วยกัน โดยปลายตัวนำด้านในจะต่อกับปลายตัวนำด้านนอกของชุดขดลวดที่อยู่ติดกัน



รูปที่ 2.12 การพันขดลวดแบบสลับข้ามบนล่าง [19]

ข) การพันขดลวดหม้อแปลงแบบเชล คือการพันขดลวดที่นำชุดขดลวด (Coil) มาวางซ้อนกันหลายชั้นเป็นขดลวดที่สมบูรณ์ซึ่งสามารถวางซ้อนสลับไปมาระหว่างขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำมีผลทำให้ค่าฟลักซ์รั่วไหลมีค่าน้อยและยังสามารถกำหนดค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลในการออกแบบหม้อแปลงได้อีกด้วย



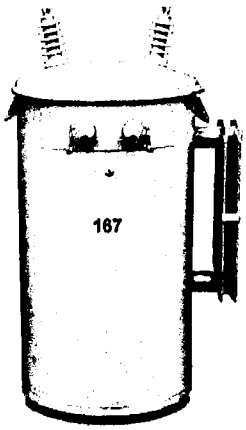
รูปที่ 2.13 การพันขดลวดหม้อแปลงแบบเชล [19]

2.1.3 ตัวถังหม้อแปลง (Tanks)

วัสดุที่ใช้คือเหล็กที่ความแข็งแรงและสามารถระบายความร้อนได้ดี โดยสามารถแบ่งตัวถังหม้อแปลงออกเป็น 4 ชนิดคือ

ก) ตัวถังแบบเรียบ (Plain Tank)

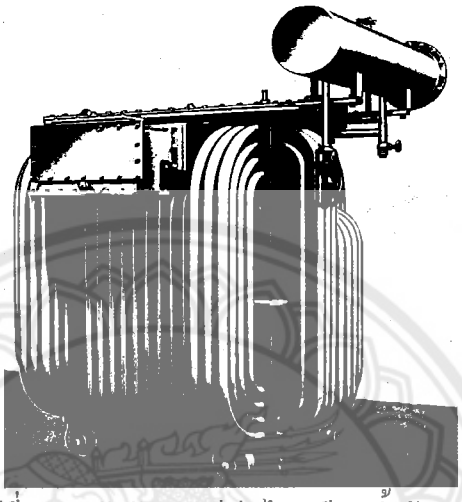
ใช้กับฉนวนน้ำมันที่ระบายความร้อนผ่านพื้นผิวตัวถัง ใช้กับหม้อแปลงระบบจำหน่ายขนาดเล็กจนถึงพิกัดประมาณ 50 kVA ตัวถังมีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตรตัวถังทำจากแผ่นเหล็กผิวเรียบซึ่งจะพบเห็นได้ตามเสาไฟฟ้าทั่วไป



รูปที่ 2.14 ตัวถังแบบเรียบ [19]

ข) ตัวถังแบบมีท่อไหลเวียนน้ำมัน (Tank with Tube)

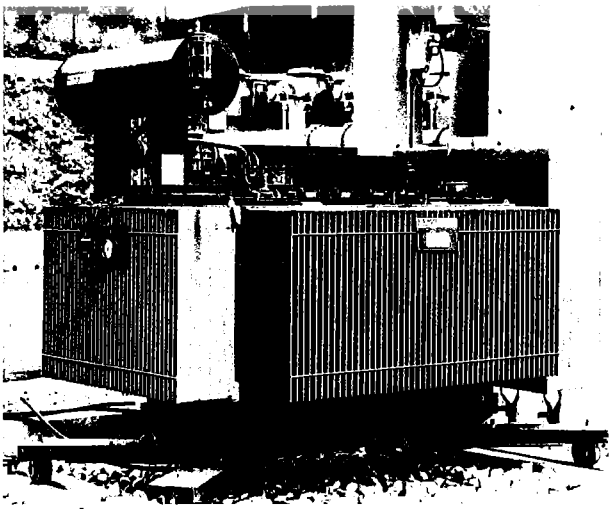
ใช้กับฉนวนน้ำมันโดยจะมีท่อทรงกลมยื่นออกมาระหว่างตัวถังด้านบนกับตัวถังด้านล่าง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวถังให้สัมผัสอากาศภายนอก โดยอาศัยหลักการน้ำมันที่มีอุณหภูมิสูงจะลอยตัวขึ้นสู่ด้านบน ทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำมันจากบนลงล่าง ตัวถังแบบนี้ใช้กับหม้อแปลงที่มีพิกัดไม่เกิน 3000 kVA



รูปที่ 2.15 ตัวถังแบบมีท่อไหลเวียนน้ำมัน [19]

ค) ตัวถังแบบมีแผงระบายความร้อน (Tank with Radiator)

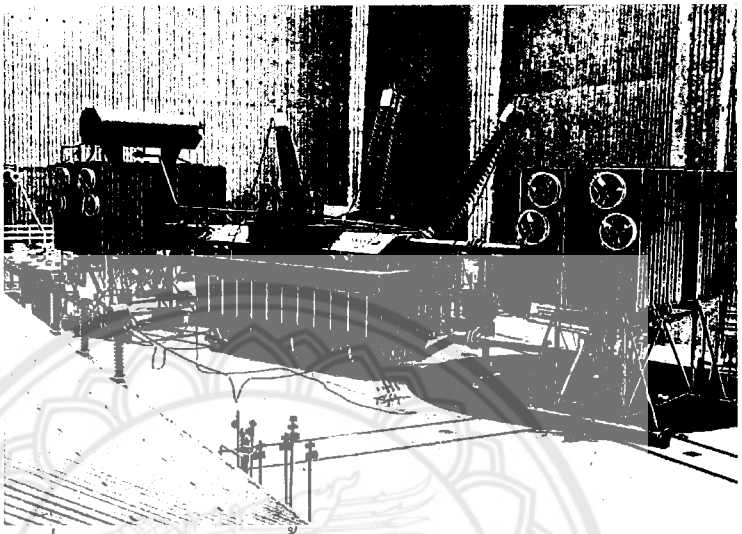
ใช้กับหม้อแปลงที่พิกัดตั้งแต่ 5 MVA ถึง 10 MVA ที่ตัวถังจะมีแผงระบายความร้อนและอาศัยการระบายความร้อนตามธรรมชาติ สำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 MVA ขึ้นไปจะใช้อุปกรณ์ระบายความร้อนเช่น พัดลมหรือปั๊มน้ำมัน หรือทั้งพัดลมทำงานร่วมกับปั๊มน้ำมัน นอกจากนี้หม้อแปลงที่ติดตั้งใกล้กับแหล่งน้ำเช่นในโรงไฟฟ้าพลังน้ำอาจจะใช้แผงระบายความร้อนที่ใช้น้ำเข้ามาเป็นตัวกลางระบายความร้อน



รูปที่ 2.16 ตัวถังแบบมีแผงระบายความร้อน [19]

ง) ตัวถังแบบติดตั้งตัวระบายความร้อนแยกจากตัวถัง (Tank with Separate Cooler)

กรณีที่หม้อแปลงมีพิกัดกำลังสูงมากจนไม่สามารถติดตั้งแผงระบายความร้อนที่ตัวถังได้เพียงพอ จึงจำเป็นต้องติดตั้งตัวระบายความร้อนแยกออกจากตัวถังหม้อแปลง โดยจะเดินท่อน้ำมันระหว่างตัวถังหม้อแปลงกับแผงระบายความร้อน



รูปที่ 2.17 ตัวถังแบบติดตั้งตัวระบายความร้อนแยกจากตัวถัง [19]

2.1.4 วิธีระบายความร้อน (Cooling Methods)

ในระหว่างที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทำงานจ่ายโหลดอยู่นั้น จะเกิดความสูญเสียพลังงานในตัวหม้อแปลงซึ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้น โดยที่แหล่งกำเนิดความสูญเสียพลังงานที่ตัวหม้อแปลงนั้นมีอยู่สองสาเหตุใหญ่ๆ สาเหตุแรกคือวงจรแม่เหล็กไฟฟ้าของหม้อแปลง เป็นที่หนึ่งของการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์กระแสสลับในแกนเหล็ก ซึ่งมีผลต่อการเหนี่ยวนำแรงดันที่ใช้งาน (Applied Voltage) สาเหตุที่สองคือขดลวดหม้อแปลง เป็นที่ๆทำให้เกิด ความสูญเสียแบบ I^2R และกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy Current) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระแสและโหลด

การระบายความร้อนของหม้อแปลงจะใช้สัญลักษณ์ที่เป็นตัวอักษรแทนชนิดของการไหลเวียนของตัวกลางระบายความร้อนดังแสดงในตารางที่ 2.1 นอกจากนี้ยังใช้ตัวอักษรแทนชนิดของตัวกลางระบายความร้อนคือ อากาศ (Air;A) น้ำมัน (Oil;O) และน้ำ (Water;W) ซึ่งวิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงทั้งแบบฉนวนแห้งและแบบฉนวนแช่ในน้ำมันสรุปไว้ในตารางที่ 2 .2

ตารางที่ 2.1 ชนิดของการไหลเวียน [13]

ชนิดของการไหลเวียน (Type of Circulation)	สัญลักษณ์
1. แบบธรรมชาติ (Natural)	N
2. แบบสูบและฉีดผ่านปั๊มแบบฉนวนแช่ในน้ำมัน หรือ เป่าอากาศสำหรับฉนวนแห้งและฉนวนแช่ในน้ำมัน (Forced)	F
3. แบบไหลผ่านขดลวดโดยตรง (Directed through the Winding)	D

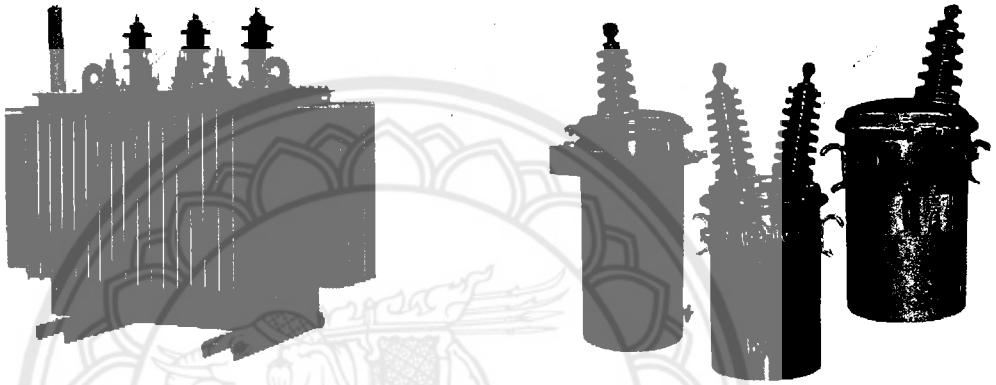
ตารางที่ 2.2 วิธีระบายความร้อนของหม้อแปลง [13]

วิธีระบายความร้อน (Methods of Cooling)	สัญลักษณ์
หม้อแปลงฉนวนแห้ง	
1. การระบายความร้อนโดยอากาศตามธรรมชาติ (Natural Air Cooling)	AN or AA
2. การระบายความร้อนโดยการเป่าอากาศ (Forced Air Cooling)	FA
หม้อแปลงฉนวนแช่ในน้ำมัน	
1. การระบายความร้อนโดยการไหลเวียนตามธรรมชาติของอากาศและน้ำมัน (Natural Circulation of Air and Oil)	ONAN
2. การระบายความร้อนโดยการไหลเวียนตามธรรมชาติของน้ำมันและเป่าอากาศ (Natural Oil and Forced Air Circulation)	ONAF
3. การระบายความร้อนโดยสูบและฉีดน้ำมันผ่านปั๊มและอากาศไหลเวียนตามธรรมชาติ (Forced Oil and Natural Circulation of Air)	OFAN
4. การระบายความร้อนโดยสูบและฉีดน้ำมันผ่านปั๊มและเป่าอากาศ (Force Oil and Air Circulation)	OFAF
5. การระบายความร้อนโดยน้ำมันไหลผ่านขดลวดโดยตรงและเป่าอากาศ (Directed Oil Through the Winding and Forced Air Circulation)	ODAF
6. การระบายความร้อนโดยสูบและฉีดน้ำมันผ่านปั๊มและใช้น้ำไหลเวียน (Force Oil and Water Circulation)	OFWF

2.2 การแบ่งชนิดหม้อแปลง

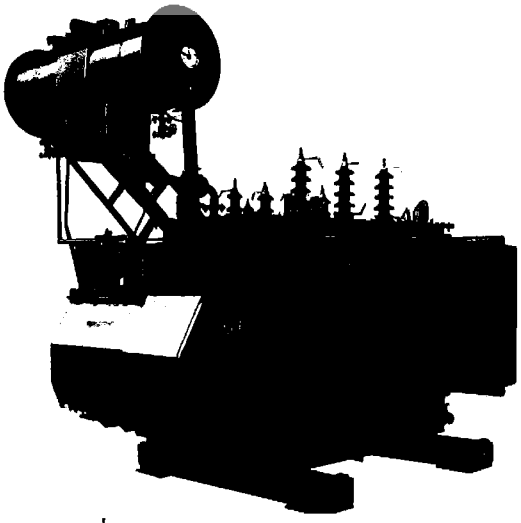
2.2.1 หม้อแปลงที่แบ่งตามขนาด

ก) หม้อแปลงในระบบจำหน่าย (Distribution Transformer) คือหม้อแปลงที่ใช้ถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากวงจรจำหน่ายไฟฟ้าหลักไปยังวงจรจำหน่ายไฟฟ้าย่อย หรือวงจรไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม อาคารพาณิชย์ ที่พักอาศัย ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เป็นหม้อแปลงตัวสุดท้ายที่เชื่อมโยงระหว่างแหล่งผลิตไฟฟ้ากับโหลดและจะติดตั้งบนเสาไฟฟ้า บ่อยครั้งพบติดตั้งภายในอาคารหรือบริเวณใกล้ตู้สวิตซ์เกียร์



รูปที่ 2.18 หม้อแปลงในระบบจำหน่าย [20] [21]

ข) หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) คือหม้อแปลงที่ใช้ถ่ายโอนหลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังวงจรจำหน่ายไฟฟ้าหลัก และโดยทั่วไปมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะติดตั้งบนเสาไฟฟ้า แต่จะติดตั้งบนแท่นคอนกรีต มีพิกัดกำลังไฟฟ้า (VA) และระดับแรงดันที่สูง จะได้เห็นตามโรงไฟฟ้าได้แก่หม้อแปลงแปลงแรงดันให้สูงขึ้น (Step up Transformer) หรือในสถานีไฟฟ้าที่ใช้เชื่อมโยงเพิ่ม และลดระดับแรงดันระบบสายส่งไฟฟ้า



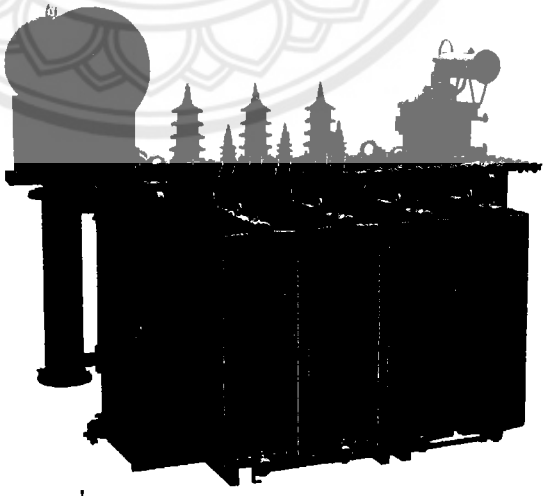
รูปที่ 2.19 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง[22]

2.2.2 ชนิดของหม้อแปลงที่แบ่งตามลักษณะของฉนวนป้องกัน

ก) หม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง (Dry-type Transformer) คือหม้อแปลงที่มีลักษณะการจัดวางโครงสร้างของแกนเหล็กและขดลวดที่ใช้ฉนวนแบบแห้งหรือใช้ฉนวนที่เป็นก๊าซมาเป็นตัวกลางฉนวน (Insulation Medium) โดยหม้อแปลงแบบแห้งนี้จะใช้เป็นหม้อแปลงในระบบจำหน่ายที่มีขนาดเล็ก ถึงปานกลางติดตั้งภายในอาคารหรือในตู้สวิตซ์เกียร์

รูปที่ 2.20 หม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง [23]

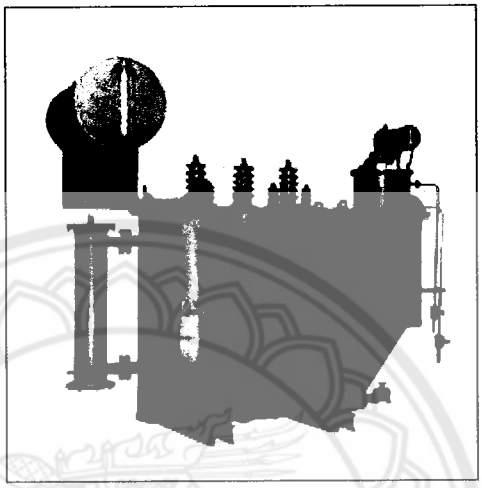
ข) หม้อแปลงแบบฉนวนเหลว (Liquid Filled Transformer) คือหม้อแปลงที่มีลักษณะการจัดวางแกนเหล็กและขดลวดแช่อยู่ในฉนวนเหลว ส่วนใหญ่ใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลง โดยทั่วไปหม้อแปลงประเภทนี้จะใช้ในระบบจำหน่าย และติดตั้งภายนอกอาคาร และมีพิกัดกำลังไฟฟ้า (VA) สูง



รูปที่ 2.21 หม้อแปลงแบบฉนวนเหลว [24]

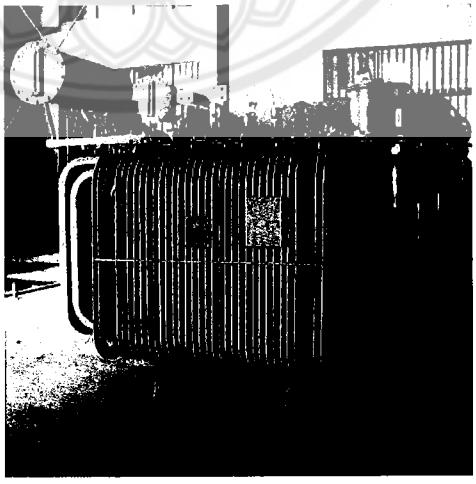
2.2.3 ชนิดของหม้อแปลงที่แบ่งตามลักษณะการใช้งาน

ก) หม้อแปลงแบบปรับแรงดันขณะจ่ายโหลด (Load Tap Changer Transformer) คือหม้อแปลงที่ใช้กับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันบ่อยๆ เช่น หม้อแปลงในสถานีไฟฟ้าย่อย และมีตัวเปลี่ยนแท็ป (Tap Changer) ช่วยในการปรับระดับแรงดัน และมีการพันขดลวดกระจายตามแทปที่ต้องการ



รูปที่ 2.22 หม้อแปลงแบบปรับแรงดันขณะจ่ายโหลด [25]

ข) หม้อแปลงแบบรักษาระดับแรงดันคงที่ (Regulating Transformer) คือหม้อแปลงที่ใช้กับวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน หรือมุมเฟสของทางด้านวงจรเอ้าท์พุต ทำหน้าที่ควบคุมเอ้าท์พุตของหม้อแปลงให้อยู่ในระดับที่ต้องการ บางรุ่นจะมีอุปกรณ์เสริมทำหน้าที่ชดเชยระดับแรงดันที่ไม่คงที่อันเนื่องมาจากโหลดและแรงดันอินพุต



รูปที่ 2.23 หม้อแปลงแบบรักษาระดับเอาท์พุตให้คงที่ [26]

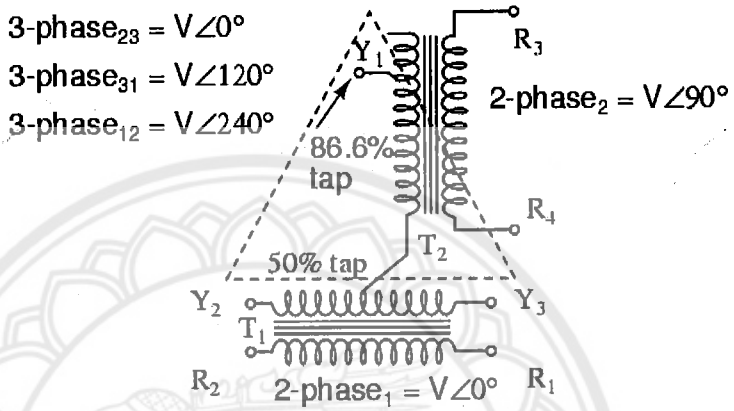
ค) หม้อแปลงแบบเลื่อนมุมเฟส (Phase-shifting Transformer) คือหม้อแปลงที่ทำหน้าที่เพิ่ม หรือหน่วงความสัมพันธ์มุมเฟสแรงดันจากวงจรไฟฟ้าหนึ่งกับอีกวงจรไฟฟ้า

รูปที่ 2.24 หม้อแปลงแบบเลื่อนมุมเฟส [27]

ง) หม้อแปลงเตาหลอม (Furnace Transformer) คือหม้อแปลงที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้กับการหลอมโลหะด้วยไฟฟ้าโดยเฉพาะ

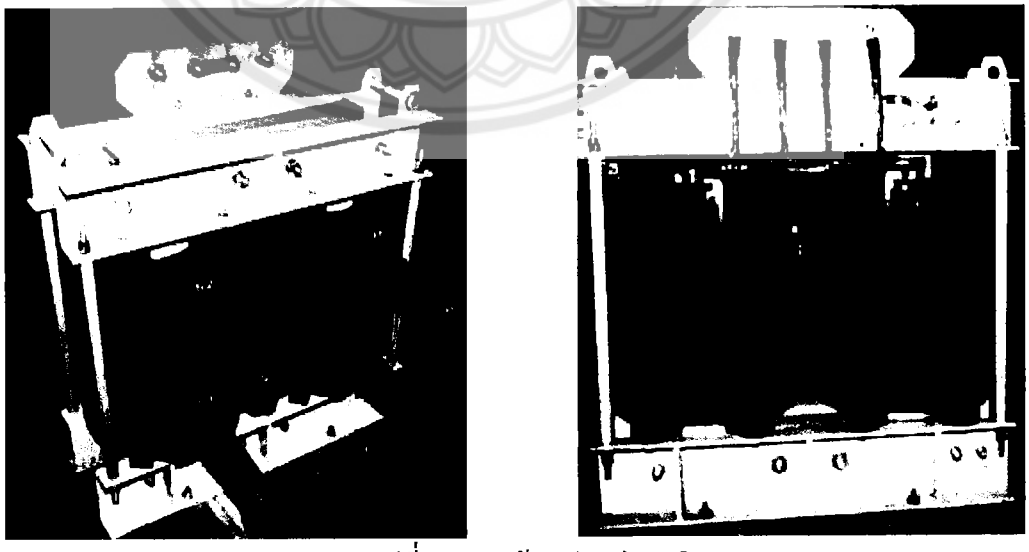
รูปที่ 2.25 หม้อแปลงเตาหลอม [28]

จ) หม้อแปลงที่ต่อแบบสก็อตหรือที (Scott or T Connection Transformer) คือหม้อแปลงที่ใช้สำหรับการแปลงไฟฟ้าจากระบบสามเฟสไปเป็นระบบสองเฟส หรือจากระบบสองเฟสเป็นระบบสามเฟส โดยลักษณะของโครงสร้างของหม้อแปลงประเภทนี้จะมีขดลวดแท็ปกึ่งกลาง การต่อภายใน (Inter Connection) จะใช้แกนเหล็กแบบ 3 ขา (3-leg core) ขดลวดหลัก (Main Coil) และขดลวดทีสเซอร์ (Teaser Coil) พันอยู่ที่ขาทั้งสองด้าน ส่วนขากลางจะไม่มีขดลวด แต่มีไว้เพื่อเป็นทางเดินสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Part)



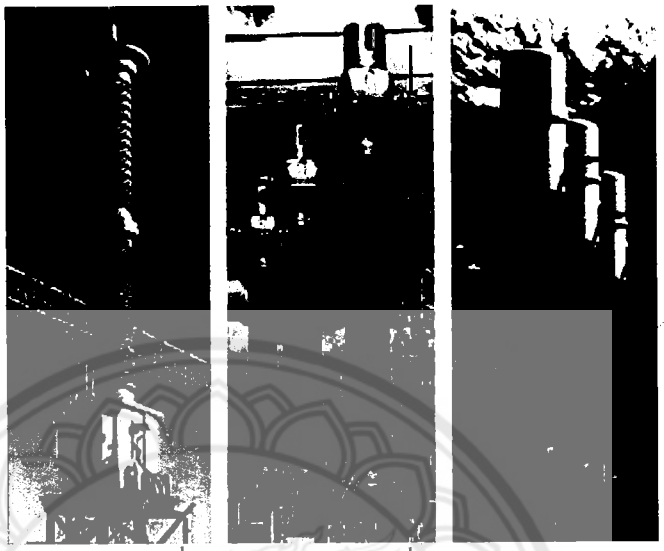
รูปที่ 2.26 หม้อแปลงที่ต่อแบบสก็อตหรือที [29]

ฉ) หม้อแปลงต่อลงดิน (Grounding Transformer) เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่แตกต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป โดยมีการเพิ่มระบบกราวน์ให้กับวงจรที่ต่อแบบเดลต้า เหมาะสำหรับการป้องกันการลัดวงจรลงดิน (Ground Fault)



รูปที่ 2.27 หม้อแปลงต่อลงดิน [30]

ช) หม้อแปลงเครื่องวัด (Instrument Transformer) คือหม้อแปลงที่มีวัตถุประสงค์ เพื่อลดระดับกระแสและแรงดันจากวงจรไฟฟ้าหลัก (Primary Circuit) ลงมาทางด้านวงจรไฟฟ้ารอง (Secondary Circuit) เพื่อใช้สำหรับวงจรการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้า

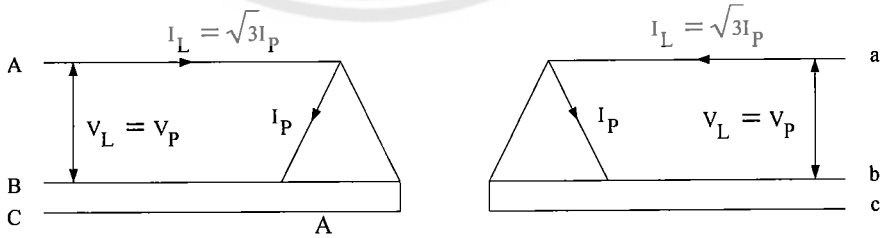


รูปที่ 2.28 หม้อแปลงเครื่องวัด [19]

2.3 การต่อหม้อแปลง (Transformer Connection)

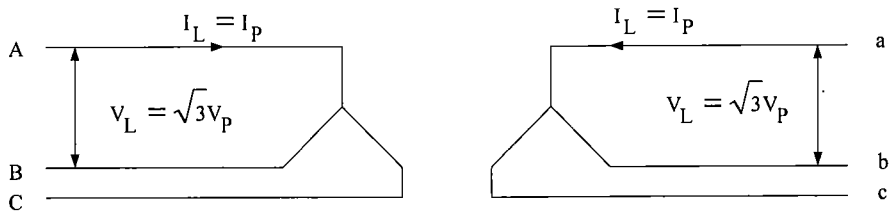
2.3.1 การต่อหม้อแปลง 3 เฟส

ก) การต่อแบบเดลต้า-เดลต้า เป็นการต่อหม้อแปลงในระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่ไม่มีจุดนิวตรอล ดังแสดงในภาพที่ 2.29 แรงดันที่คร่อมขดลวดจะเท่ากับแรงดันที่ขั้วต่อสายกระแสที่ไหลแต่ละขดลวด (I_P) จะเท่ากับ 58 เปอร์เซ็นต์ของกระแสที่ขั้วสาย (Terminal) มุมเฟสระหว่างแรงดันด้านแรงสูงและแรงต่ำจะตรงกัน (In phase) โดยไม่เกิดการเลื่อนเฟสในการต่อแบบ เดลต้า-เดลต้า



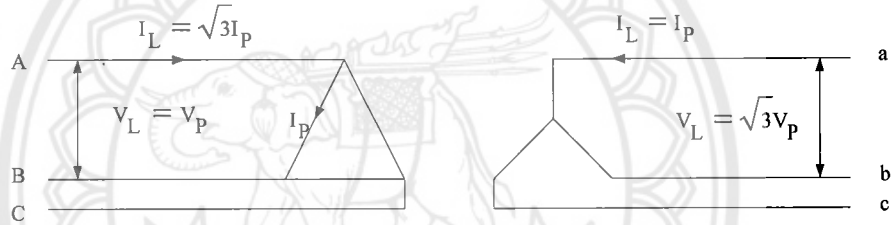
รูปที่ 2.29 การต่อหม้อแปลงแบบเดลต้า-เดลต้า

ข) การต่อแบบสตาร์-สตาร์ การต่อแบบนี้มีผลทำให้แรงดันที่คร่อมแต่ละขดลวดเท่ากับ 58 เปอร์เซนต์ของแรงดันที่ขั้วต่อสาย ในขณะที่กระแสที่ไหลในแต่ละขดลวดจะเท่ากับกระแสที่ขั้วต่อสายและมุมเฟสระหว่างแรงดันด้านแรงสูงและแรงต่ำเท่ากันศูนย์หรือมุมตรงกัน (In phase) ไม่เกิดการเลื่อนเฟสในการต่อแบบนี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.30



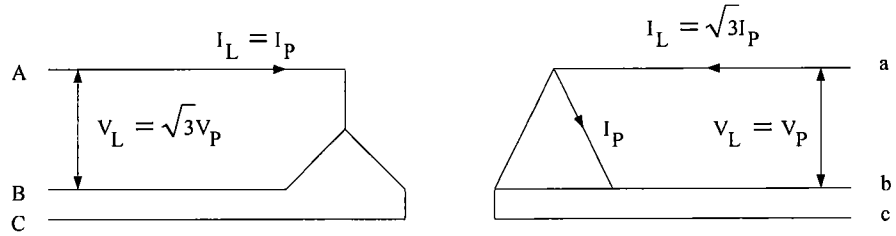
รูปที่ 2.30 การต่อหม้อแปลงแบบสตาร์-สตาร์

ค) การต่อแบบ เดลต้า-สตาร์ การต่อแบบนี้ทางด้านขดลวดแรงสูง ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันจะเป็นไปตามคุณสมบัติการต่อแบบเดลต้า และทางด้านขดลวดแรงต่ำความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันจะเป็นไปตามคุณสมบัติการต่อแบบสตาร์ ดังแสดงในภาพที่ 2.31 มุมเฟสระหว่างแรงดันด้านแรงสูง และแรงต่ำจะมีการเลื่อนเฟสห่างกัน 30 องศา มีเวกเตอร์แรงดันด้วยกันสองลักษณะคือ การต่อแบบแรงดันด้านแรงต่ำนำหน้าแรงดันด้านแรงสูง30 องศา และแรงดันด้านแรงต่ำตามหลังแรงดันด้านแรงสูง 30 องศา



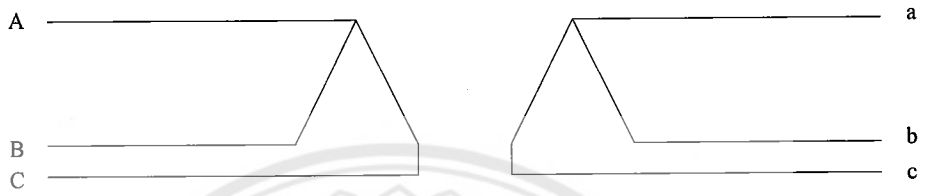
รูปที่ 2.31 การต่อหม้อแปลงแบบ เดลต้า-สตาร์

ง) การต่อแบบสตาร์-เดลต้า ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันจะเหมือนกับการต่อแบบเดลต้า-สตาร์ เพียงแต่สลับด้านกันดังแสดงในภาพที่ 2.32และมุมเฟสระหว่างแรงดันด้านแรงสูงและแรงต่ำมีการเลื่อนเฟสห่างกัน30 องศาเหมือนกับแบบเดลต้า-สตาร์ โดยมีเวกเตอร์แรงดันแบ่งเป็นสองแบบ คือแรงดันด้านแรงต่ำนำหน้าแรงดันด้านแรงสูง 30 องศา และแรงดันด้านแรงต่ำตามหลังแรงดันด้านแรงสูง 30 องศา



รูปที่ 2.32 การต่อหม้อแปลงแบบสตาร์-เดลต้า

จ) การต่อแบบวี-วี ในกรณีที่หม้อแปลง1 เฟสสามตัวต่อร่วมกันเป็นระบบไฟ3 เฟสแล้วเกิดมีหม้อแปลง1 ตัวเกิดความเสียหายการต่อแบบวี-วี เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ที่เหลืออีกสองตัวให้ใช้เป็นระบบไฟ 3 เฟสได้แต่พิกัดโวลต์-แอมป์ ของหม้อแปลงที่นำมาแบงก์กัน จะเท่ากับ86.6 เปอร์เซนต์ของผลรวมพิกัดโวลต์-แอมป์ของหม้อแปลงทั้งสองการต่อหม้อแปลงแบบนี้ไม่มีผลต่อการกระจายแรงดันระหว่างเฟส มุมเฟสด้านแรงดันต่ำจะเท่ากับด้านแรงดันสูงดังแสดงในภาพที่ 2.33



รูปที่ 2.33 การต่อหม้อแปลงแบบวี-วี

2.4 ฟอลต์ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Faults)

2.4.1 ฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายนอก (External Faults)

เป็นฟอลต์ที่เกิดขึ้นจากภายนอกบริเวณตัวถังหม้อแปลง ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักมีผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายนอก ได้ดังนี้

ก) โหลดเกิน (Overloads) ทำให้เกิดความร้อนสูงเกิน และเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายอย่างถาวร ในกรณีนี้ ส่วนใหญ่ จะไม่มีการป้องกันสำหรับโหลดเกิน แต่จะมีสัญญาณเตือน (Alarm) เป็นตัวแจ้งสถานะแก่ผู้ปฏิบัติงาน เหตุผลหนึ่งของโหลดเกินอาจเกิดจากการแบ่งโหลดไม่เท่ากันของหม้อแปลงที่ต่อขนานกันหรือโหลดไม่สมดุลย์ของหม้อแปลงสามเฟสแบงค์ (Three Phase Banks)

ข) แรงดันเกิน (Over-voltage) แรงดันสูงเกินสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงสภาวะชั่วครู่หรือในช่วงระยะยาวของความถี่ระบบ แรงดันสูงเกินชั่วครู่มีสาเหตุมาจากความเค้นที่ปลายขดลวดและอาจจะเกิดการเบรกดาวน์ขึ้น แรงดันสูงเกินนี้สามารถป้องกันได้โดยอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ แรงดันสูงเกินที่เกิดจากความถี่ของระบบเกิดจากการทำงานในสภาวะฉุกเฉิน เช่น การสูญเสียโหลดทันทีทันใด ในกรณีนี้จะทำให้เกิดฟลักซ์สูงเกินของหม้อแปลงและเพิ่มความเค้นแก่ฉนวนขดลวด การเกิดฟลักซ์เกินทำให้เพิ่มการสูญเสียทางแกนเหล็กและอาจจะมีผลในด้านกระแสการกระตุ้นเพิ่มขึ้นปริมาณมาก และมีผลต่อการเพิ่มความร้อนในวงจรแกนเหล็ก ซึ่งอาจจะเกิดความเสียหายต่อฉนวนที่หุ้มแกนเหล็กและฉนวนของขดลวด

ค) ความถี่ต่ำเกิน (Under-frequency) ความถี่ต่ำอาจเกิดจากการรบกวนในระบบหลัก ซึ่งมีสาเหตุจากการไม่สมดุลย์ระหว่างการผลิตไฟฟ้าและโหลด สภาวะนี้เหมือนกับแรงดันสูงเกินซึ่งกระแสกระตุ้นเพิ่มขึ้นที่ความถี่ต่ำ ทำให้เกิดฟลักซ์สูงเกินในวงจรแม่เหล็ก หม้อแปลงสามารถทำงานต่อเนื่องไม่ว่าจะเกิดแรงดันสูงหรือความถี่ต่ำ แต่ถ้าทั้งสองปัญหาเกิดขึ้นพร้อมกันอาจจะเป็นปัญหาที่สำคัญมาก โดยปกติอัตราส่วนของแรงดันและความถี่จะต้องไม่เกิน 1.1 เปอร์ยูนิต ซึ่งเรียกว่า ขีดจำกัดแรงดันต่อความถี่ (Volts per Hertz Limit)

ง) การฟอลต์ภายนอกเขตป้องกัน (External System Short Circuit) ฟอลต์ในระบบที่เกิดนอกเขตป้องกันของหม้อแปลง แต่ทำให้กระแสหม้อแปลงสูงขึ้น สามารถทำให้ขดลวดหม้อแปลงเกิดความเสียหายได้ กระแสฟอลต์ที่เกิดภายนอกเขตที่มีปริมาณมากทำให้เกิดความเค้นทางกลสูงในขดลวดหม้อแปลง โดยที่ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเป็นในช่วงลูกคลื่นแรก วิธีการป้องกันความเค้นนี้ เป็นเรื่องของการออกแบบหม้อแปลงของผู้ผลิตเอง

2.4.2 ฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายใน (Internal Faults)

ฟอลต์ประเภทนี้อาจรวม ฟอลต์ที่เกิดภายในภายในหม้อแปลงและฟอลต์ที่เกิดภายนอกหม้อแปลงแต่อยู่ในเขตป้องกันของหม้อแปลง โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ ฟอลต์ที่เกิดขึ้นอย่างช้า (Incipient Faults) และฟอลต์ที่เกิดขึ้นฉับพลัน (Active Faults)

2.4.2.1 ฟอลต์ที่เกิดขึ้นอย่างช้า (Incipient Faults) คือฟอลต์ที่พัฒนาตัวเองขึ้นอย่างช้าๆ แต่เมื่อเกิดขึ้นเป็นเวลานานจะกลายเป็นฟอลต์ขนาดใหญ่ ถ้าไม่สามารถตรวจพบและแก้ไขสาเหตุอาจทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายอย่างช้า ๆ ฟอลต์ชนิดนี้แบ่งออกเป็นสามชนิดได้แก่

ก) ความร้อนสูงเกิน (Overheating) อาจจะเกิดได้หลายสาเหตุที่แตกต่างกันภายในหม้อแปลงดังต่อไปนี้

-จุดต่อภายในไม่ดี อาจจะเป็นวงจรไฟฟ้า หรือวงจรแม่เหล็ก

-สูญเสียการระบายความร้อนเนื่องจากตัวถังรั่ว

-เกิดการขัดขวางเส้นทางการไหลของตัวระบายความร้อน (Coolant)

ข) ฟลักซ์สูงเกิน (Overfluxing) ได้กล่าวไว้ข้างต้นในหัวข้อฟอลต์ที่เกิดขึ้ภายนอกซึ่งนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ฉนวนของวงจรแม่เหล็กและฉนวน

ค) ความดันสูงเกิน (Overpressure) ความดันสูงเกินในตัวถังหม้อแปลงเกิดจากการปล่อยก๊าซภายในตัวถังบริเวณที่เกิดความร้อน อาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบต่อรอบ ทำให้เกิดการลุกไหม้ช้าๆ และปล่อยก๊าซออกมา ก๊าซเหล่านี้จะสะสมในตัวถังและเพิ่มความดันภายในตัวถัง

2.4.2.2 ฟอลต์ที่เกิดขึ้นทันที (Active Faults) คือฟอลต์ที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันและต้องการป้องกันโดยรีเลย์ป้องกันโดยเร็ว เพื่อที่จะปลดหม้อแปลงออกจากระบบและจำกัดความเสียหายแก่ตัวหม้อแปลง โดยส่วนใหญ่ฟอลต์จำพวกนี้ได้แก่

ก) ฟอลต์ในขดลวดวายที่จุดนิวตรอลลงดินผ่านอิมพิแดนซ์ การลัดวงจรลงดินที่เกิดขึ้นที่ขดลวดตัวนำของหม้อแปลงที่ต่อแบบนี้ จะทำให้เกิดกระแสลัดวงจรไหล ค่าของกระแสที่ไหลจะขึ้นอยู่กับค่าของอิมพิแดนซ์ที่ต่อลงดินนั้น และจะขึ้นอยู่กับระยะห่างของตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรจากจุดนิวตรอลเพราะแรงดันที่การลัดวงจรนี้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างนี้โดยตรง สัดส่วนการแปลง (Transformation Ratio) ระหว่างขดลวดตัวนำปฐมภูมิ และขดที่ลัดวงจร (Short-circuited Turns) จะเปลี่ยนไปตามตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรด้วย

ข) ฟอลต์ในขดลวดวายที่จุดนิวตรอลลงดินโดยตรง ในกรณีนี้กระแสลัดวงจรจะถูกจำกัดโดยลีคเกจรีแอคแตนซ์ของขดลวดตัวนำโดยตรง ซึ่งค่ารีแอคแตนซ์นี้จะแปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งของการลัดวงจรในลักษณะที่ค่อนข้างจะยุ่งยาก ค่าของแรงดันที่จุดลัดวงจร ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของการลัดวงจรก็จะมีความสำคัญเหมือนกัน แต่ค่ารีแอคแตนซ์ ในกรณีนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วมาก ถ้าการลัดวงจรเกิดขึ้นใกล้จุด นิวตรอล ทำให้กระแสลัดวงจรมีค่าสูงสุดในตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรใกล้กับจุดนิวตรอล ดังนั้นอาจจะสรุปได้ว่า เมื่อไม่มีอิมพิแดนซ์ต่อระหว่างจุดนิวตรอลกับดิน กระแสจะมีค่าสูงกว่ากรณีที่จุดนิวตรอลลงดินผ่านอิมพิแดนซ์

ค) ฟอลต์ในขดลวดเดลต้า เมื่อต่อขดลวดตัวนำของหม้อแปลงเป็นแบบเดลต้า จะไม่มีจุดใดเลยที่มีค่าแรงดันจากดิน (Voltage to Earth) ต่ำกว่า 50% ของแรงดันเฟส ดังนั้นขนาดของกระแสลัดวงจรจึงต่ำกว่าในกรณีที่ต่อเป็นวายอยู่มาก ค่าของอิมพิแดนซ์ของขดลวดเดลต้าจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 25 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์เทียบกับพิกัดหม้อแปลง กระแสลัดวงจรต่ำสุดจะเกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางของด้านใดด้านหนึ่งของขดลวดเดลต้า ค่าของกระแสลัดวงจรอาจจะมีค่าไม่เกินค่ากระแสที่พิกัด(Rated Current) ของหม้อแปลงเอง และอาจจะต่ำกว่าค่านี้ด้วยซ้ำไป ถ้าหากระบบต่อลงดินโดยผ่านอิมพิแดนซ์ซึ่งมีค่าสูงพอสมควร กระแสจะไหลมาจากปลายทั้งสองข้างของขดลวดตัวนำมาลงที่จุดลัดวงจร และจะแบ่งไหลมาในอีก 2 เฟส ดังนั้น กระแสที่ไหลในเฟสแต่ละเฟสอาจจะมีค่าต่ำ ซึ่งต้องพิจารณาการป้องกันในลักษณะนี้ด้วย

ง) การลัดวงจรระหว่างเฟส การลัดวงจรระหว่างเฟสมักจะเกิดขึ้นในหม้อแปลงสามเฟสและมีโอกาสเกิดน้อยมาก เมื่อเกิดการลัดวงจรในกรณีนี้ขึ้นจะทำให้เกิดกระแสลัดวงจรที่มีค่าสูงเปรียบเทียบได้กับกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

จ) การลัดวงจรระหว่างวงรอบของขดลวด ในหม้อแปลงแรงดันต่ำมักไม่ค่อยเกิด เว้นแต่ขดลวดจะเกิดความเสียหายทางกลจากกระแสลัดวงจรขนาดใหญ่จากภายนอกทำให้ฉนวน

ปร.
พ2999
2551
หอสมุดกลาง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 1500876

แตกหรือแยกตัว หรือถ้ามีความชื้นเข้าไปปนอยู่ในน้ำมันก็อาจจะทำให้ฉนวนเสื่อมลงได้ สำหรับหม้อแปลงแรงดันสูง ซึ่งต่ออยู่กับสายส่งแรงดันสูงแบบขึงสายในอากาศ จะมีโอกาสถูกแรงดันแบบอิมพัลส์ (Impulse) ซึ่งมีความชันหน้าคลื่นสูง ซึ่งมีค่าที่ยอดเป็นหลายเท่าของแรงดันที่กำหนดของระบบ (Rater System Voltage) แรงดันแบบอิมพัลซ์หรือเสิร์จจากสายนี้จะมีผลมากต่อรอบขดลวดที่อยู่ตรงปลายของขดลวดตัวนำ ซึ่งฉนวนของขดลวดส่วนที่อยู่ทางด้านปลายนี้ มักจะต้องมีการเสริมความเป็นฉนวนให้มากขึ้น แต่ก็ไม่สามารถทำให้สูงเหมือนการฉนวนกับดิน ซึ่งมีค่าสูงได้ ดังนั้นจึงมีโอกาสเกิดลัดวงจรบางส่วนในขดลวดตัวนำ (Winding Partial Flash-Over) ได้มากกว่าที่จะเกิดการลัดวงจรลงดิน

ฉ) การลัดวงจรที่แกนเหล็กของหม้อแปลง (Core Fault) ถ้าฉนวนระหว่างแผ่นเหล็กที่ใช้ทำแกน เกิดชำรุดจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy-Current) ค่าสูงพอที่จะทำให้ความร้อนสูงได้ ตัวยึด (Bolts) ซึ่งอัดแกน เข้าไว้ด้วยกันมักจะมีฉนวนเพื่อป้องกันเหตุการณ์เช่นนี้ ถ้าฉนวนของแกนเหล็กส่วนใดส่วนหนึ่งเกิดชำรุด ความร้อนสูงเกินขนาดที่เกิดขึ้นอาจจะมีค่าสูงพอที่จะทำให้ขดลวดตัวนำชำรุดเสียหายได้ ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) ที่เพิ่มขึ้นถึงแม้ว่าจะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นมาก แต่ก็ไม่สามารถจะมองเห็น หรือรู้ได้ด้วยวิธีป้องกันทางไฟฟ้าแบบธรรมดา ถึงอย่างไรก็ควรจะรู้อย่างทันท่วงทีก่อนที่การลัดวงจรจะลุกลามไปมาก ถ้าหม้อแปลงเป็นแบบแช่อยู่ในน้ำมันจะทำได้ไม่ลำบากนัก เพราะถ้าความร้อนขึ้นสูงพอที่จะเป็นอันตรายต่อฉนวนของขดลวดตัวนำ มันก็จะสูงพอที่จะให้น้ำมันแยกตัวเกิดเป็นก๊าซขึ้น

ช) ความผิดปกติที่ถังหม้อแปลง (Tank Fault) การรั่วของน้ำมันออกจากถังของหม้อแปลง จะทำให้เกิดสภาพที่อันตรายต่อหม้อแปลงเองมาก นอกจากจะทำให้การฉนวนของขดลวดตัวนำลดลงแล้ว ยังอาจทำให้เกิดความร้อนสูงเกินขนาด (Overheating) เนื่องจากการระบายความร้อนจะแย่ลง ตระกัน (Sludge) ของน้ำมันอาจจะอุดท่อระบายความร้อนทำให้หม้อแปลงร้อนขึ้นมากกว่าปกติ นอกจากนี้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่จะมีพัดลมระบายความร้อนช่วยระบายความร้อนของน้ำมันถ้าพัดลมเกิดชำรุดเสียหายก็เป็นเหตุให้เกิดความร้อนสูงเกินอีกทางหนึ่ง

2.5 การป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Protections)

2.5.1 การป้องกันทางไฟฟ้า (Electrical Protections)

2.5.1.1 การป้องกันแบบผลต่าง (Differential Protection)

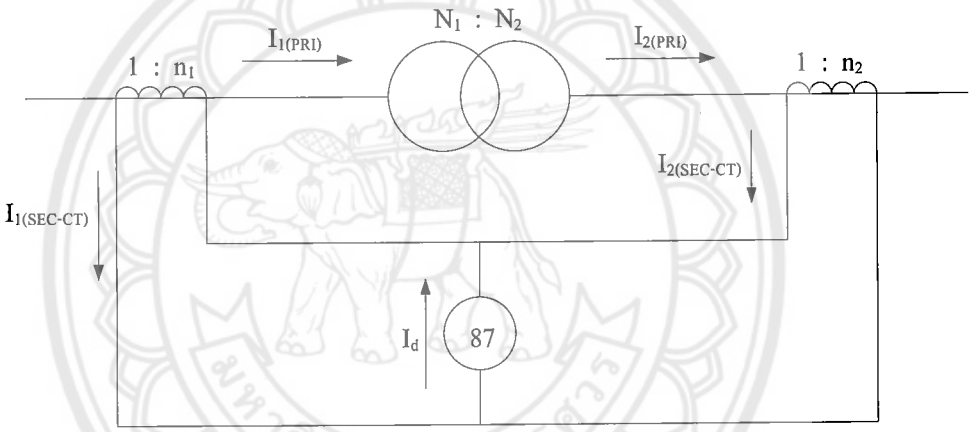
เนื่องจากหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง จำนวนแอมป์-รอบ (Ampere-turns) ของทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อพิจารณาหม้อแปลง 1 เฟส สองขดลวด ในสภาวะการทำงานปกติ $N_1I_{1(PRI)} = N_2I_{2(PRI)}$ ถ้าเราใช้หม้อแปลงกระแสที่

มีอัตราส่วนจำนวนรอบเท่ากับ 1: n_1 และ1: n_2 ทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ ภายใต้สภาวะปกติ กระแสในขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสมีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$N_1 n_1 I_{1(SEC-CT)} = N_2 n_2 I_{2(SEC-CT)} \quad (2.1)$$

ถ้าเราเลือกหม้อแปลงกระแสที่เหมาะสม เราจะได้ $N_1 n_1 = N_2 n_2$ และ $I_{1\ (SEC-CT)} = I_{2\ (SEC-CT)}$ ในทางกลับกันถ้าเกิดฟอลต์ภายในเขตป้องกัน จะเกิดผลต่างระหว่าง $I_{1\ (SEC-CT)}$ และ $I_{2\ (SEC-CT)}$ ซึ่งเป็นสัดส่วนกับกระแสลัดวงจร เราจะได้กระแสผลต่างคือ

$$I_d = I_{1(SEC-CT)} - I_{2(SEC-CT)} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.34 การป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงแปลง 1 เฟส

ในภาพที่ 2.34 จะเป็นการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบผลต่าง ขั้นตอนในทางปฏิบัติที่ต้องพิจารณาก่อนที่จะนำรีเลย์วัดค่าผลต่างมาใช้ คือ

ข้อแรกคือเราไม่สามารถที่จะหาหม้อแปลงกระแสที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบที่ตรงกับด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิได้ ดังนั้นต้องเลือกหม้อแปลงกระแสที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบตามมาตรฐาน นอกจากนี้ตัวรีเลย์เองก็มีหลายตำแหน่งแท็ปสำหรับแต่ละอินพุตของหม้อแปลงกระแสที่ต่อกับรีเลย์ ดังนั้นการใช้หม้อแปลงกระแสช่วย (Auxiliary CTs) สามารถแก้ไขปัญหาอัตราส่วนจำนวนรอบ ได้ในหลายกรณีการปรับแต่งนี้ยังคงมีค่าอัตราส่วนมิสแมทช์ (Ratio mismatch) ซึ่งทำให้เกิดกระแสผลต่างปริมาณน้อยระหว่างที่อยู่ในสภาวะปกติ

ข้อที่สองความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแสทั้งสองอาจมีความแตกต่างซึ่งกันและกัน ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดกระแสผลต่างขณะโหลดปกติ หรือเกิดฟอลต์นอกเขตป้องกัน

ข้อสุดท้ายถ้าหม้อแปลงมีอุปกรณ์เปลี่ยนแท็ปในตัว จะทำให้อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงเปลี่ยนเมื่อมีการเปลี่ยนแท็ป โดยปกติตัวเปลี่ยนแท็ปจะกำหนดมาในรูปของเปอร์เซ็นต์

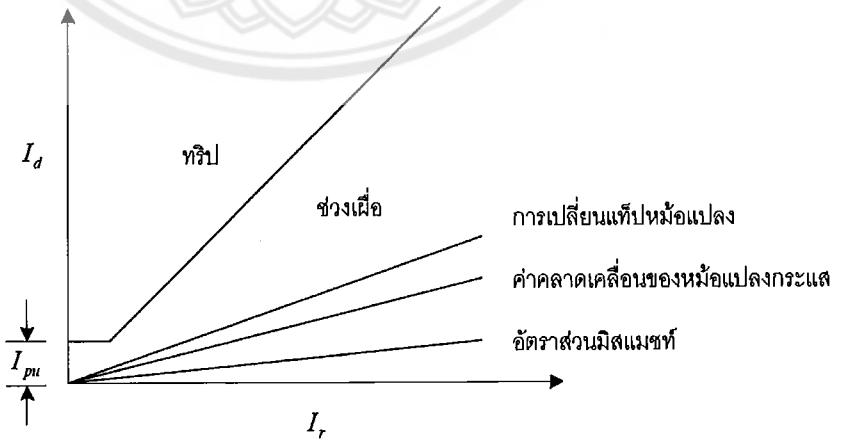
ตัวอย่างเช่น ±10% ดังนั้นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงจะอยู่ในช่วง 20% (+10%,-10%) ในทางปฏิบัติเราจะเลือกอัตราส่วนหม้อแปลงกระแสและแท็ปของรีเลย์ให้สมดุลย์กับจุดกึ่งกลางแท็ปหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เพราะฉะนั้นจะทำให้ค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดของแท็ปหม้อแปลงเท่ากับ10%

ผลกระทบทั้งสามข้อที่กล่าวมา ทำให้เกิดกระแสผลต่างในรีเลย์ ดังนั้นรีเลย์ต้องออกแบบให้ทำงานได้ดีโดยปราศจากการทริป ภายในตัวรีเลย์ผลต่างแบบเปอร์เซ็นต์

$$I_r = \frac{(I_{1(SEC-CT)} - I_{2(SEC-CT)})}{2} \tag{2.3}$$

กระแส I_r คือกระแสต้าน (Restraint Current) กระแสนี้จะผลิตแรงบิดด้านบนจานเคลื่อนที่ขณะที่กระแสผลต่างจะผลิตแรงบิดทำงาน (Operating Torque) รีเลย์จะทำงานเมื่อ $I_d \geq k.I_r$ เมื่อ k คือความชันของคุณลักษณะผลต่างเปอร์เซ็นต์ โดยค่า k จะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ เช่น 10% , 20% และ 40% รีเลย์ที่มีความไว 10% จะมีความไวกว่ารีเลย์ที่มีความชัน 40% ภาพที่ 2.35 แสดงคุณ ลักษณะผลต่างเปอร์เซ็นต์ทางปฏิบัติ ของรีเลย์ผลต่าง โดยมีแหล่งกำเนิดกระแสผลต่างทั้งสามในสภาวะปกติและช่วงเผื่อของความปลอดภัย (Margin of Safety)

รีเลย์ที่นำมาใช้ป้องกันแบบวัดค่ากระแสผลต่างนี้เราสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดได้แก่ ชนิดแรกคือ รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay) ซึ่งอาจจะมีฟังก์ชั่นการทำงานแบบสั่งทริปทันทีทันใดรวมอยู่ด้วย ชนิดที่สองคือ รีเลย์ผลต่างแบบเปอร์เซ็นต์ที่มีขดลวดต้าน (Percentage Differential Relay with Restraint) ชนิดที่สามคือ รีเลย์ผลต่างแบบเปอร์เซ็นต์ที่มีชุดต้านฮาร์มอนิค (Percentage Differential Relay with Harmonic Restraint)



รูปที่ 2.35 แสดงคุณลักษณะผลต่างเปอร์เซ็นต์ทางปฏิบัติ[9]

2.5.1.2 การป้องกันกระแสเกิน (Over-current Protection) การลัดวงจรที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะทำให้เกิดกระแสสูง ดังนั้นการป้องกันจึงอาจใช้ค่าของกระแสเกินขนาดนี้เป็นเกณฑ์ได้ การป้องกันกระแสเกินนี้อาจจะใช้ฟิวส์ (Fuses) หรือรีเลย์กระแสเกินได้

ก) ฟิวส์ (Fuses) หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กมักจะป้องกันโดยใช้ฟิวส์อย่างเดียว ในบางกรณีจะไม่มีเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) ฟิวส์จึงเป็นอุปกรณ์ตัวเดียวที่จะแยกหม้อแปลงออกจากระบบโดยอัตโนมัติ พิกัดของฟิวส์จะต้องสูงกว่าค่ากระแสโหลดสูงสุดของหม้อแปลง นอกจากนี้ฟิวส์ต้องสามารถทนต่อการจ่ายโหลดเกินชั่วครู่และทนต่อกระแสพุ่งเข้าของหม้อแปลง ฟิวส์ที่นิยมใช้กันได้แก่ฟิวส์แบบเอชอาร์ซี (H.R.C)ซึ่งจะทำงานได้อย่างรวดเร็วเมื่อกระแสมีค่าสูง ตามมาตรฐาน IEEE C37.91-2000 ระบุไว้ว่าจะใช้ฟิวส์ป้องกันหม้อแปลงตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาด 5000 kVA

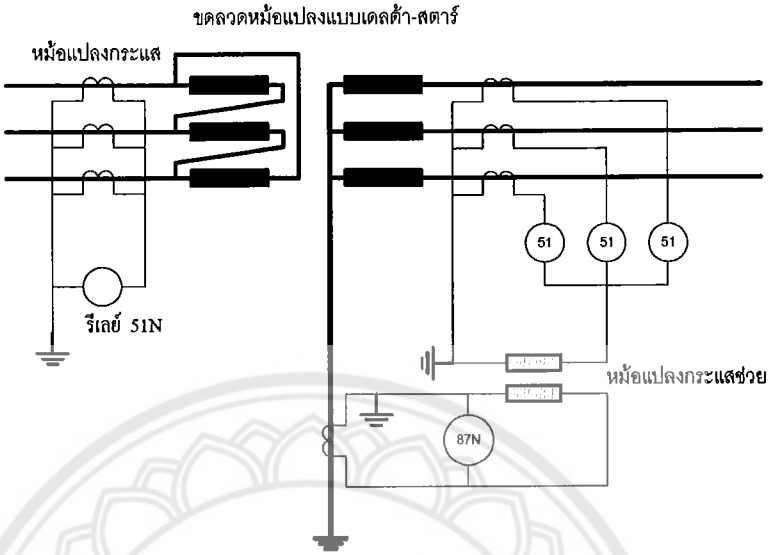
ข) รีเลย์กระแสเกิน (Over current Relay) สำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นไป เช่น 100 kVA หรือใหญ่กว่า อาจควบคุมการตัดวงจรโดยใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) การป้องกันแบบนี้จะทำได้ดีกว่าการใช้ฟิวส์ด้วยเหตุผลสองประการคือ จะทำงานได้เร็วกว่าในช่วงที่กระแสลัดวงจรมีค่าต่ำ และยังสามารถป้องกันฟอลต์ลงดิน (Earth Fault Protection)ได้ด้วย รีเลย์กระแสเกินจะทำงานเมื่อมีกระแสผ่านถึงค่าที่ตั้งไว้คือ การทำงานจะขึ้นอยู่กับค่าของกระแสเพียงอย่างเดียวหม้อแปลงขนาดเล็กบางตัวจะใช้รีเลย์กระแสเกินช่วยป้องกันฟอลต์ภายในหม้อแปลงและหม้อแปลงขนาดใหญ่จะใช้รีเลย์กระแสเกินเป็นการป้องกันสำรองให้กับการป้องกันแบบผลต่างหรือรีเลย์วัดความดัน

รีเลย์กระแสเกินที่ใช้งานกันโดยทั่วไปมีหลายแบบดังเช่นรีเลย์กระแสเกิน-เวลา (Time Over Current Relay) และรีเลย์กระแสเกินชนิดฉับพลัน (Instantaneous Over Current Relay) ซึ่งการใช้งานแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และเงื่อนไขในการป้องกันของหม้อแปลงตัวนั้นๆ

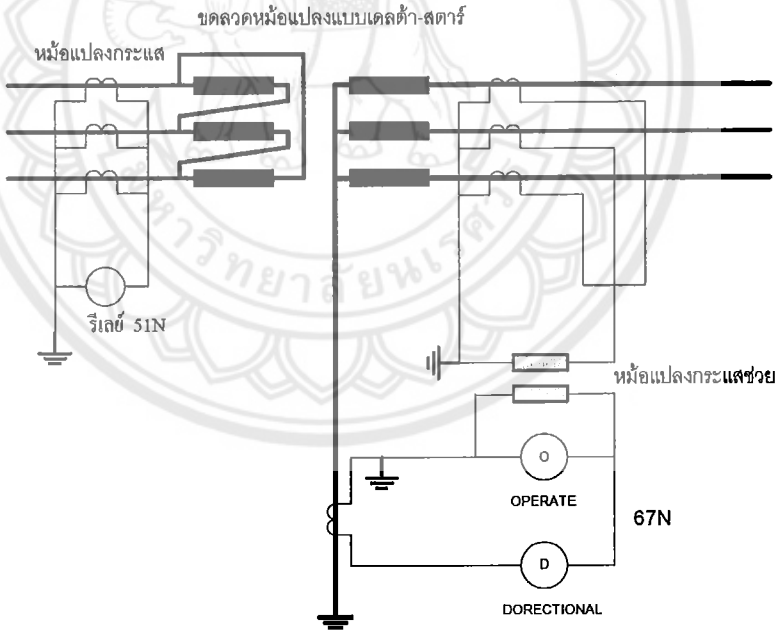
2.5.1.3 การป้องกันฟอลต์ลงดิน (Ground Fault Protection) การตรวจจับฟอลต์ลงดินนั้นเรานิยมใช้รีเลย์ผลต่างหรือไม่ก็รีเลย์กระแสเกินนำมาประยุกต์ใช้งานซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อของหม้อแปลง หม้อแปลงกระแสที่นำมาใช้งาน แหล่งจ่ายกระแสลำดับศูนย์และการออกแบบระบบที่ใช้งาน

ก) การป้องกันฟอลต์ลงดินของขดลวดเดลต้าและสตาร์ รีเลย์ 51N ด้านขดลวดเดลต้าในภาพที่ 2.36 และภาพที่ 2.37 ทำหน้าที่ตรวจจับฟอลต์ลงดินในขดลวดเดลต้าโดยที่มีการต่อกับแหล่งจ่ายกระแสลำดับศูนย์อยู่แล้ว ส่วนทางด้านขดลวด สตาร์ระบบจะต้องแยกแยะระหว่างฟอลต์ภายในและภายนอก และในภาพที่ 2.36 และภาพที่ 2.37 ได้นำรีเลย์ 87N (Ground Differential Relay) และรีเลย์ 67N (Directional Ground Relay) มาใช้งาน โดยที่รีเลย์ทั้งสองจะทำงานได้อย่างถูกต้องเมื่อเกิดฟอลต์ภายในและจะไม่ทำงานเมื่อเกิดฟอลต์ลงดินจากภายนอกเขตป้องกัน

นอกจากนี้เมื่ออัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสของทางด้านเฟสและสายนิวตรอลไม่เท่ากัน จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงกระแสช่วยในการแปลงอัตราส่วนกระแสที่ไหลเข้ารีเลย์



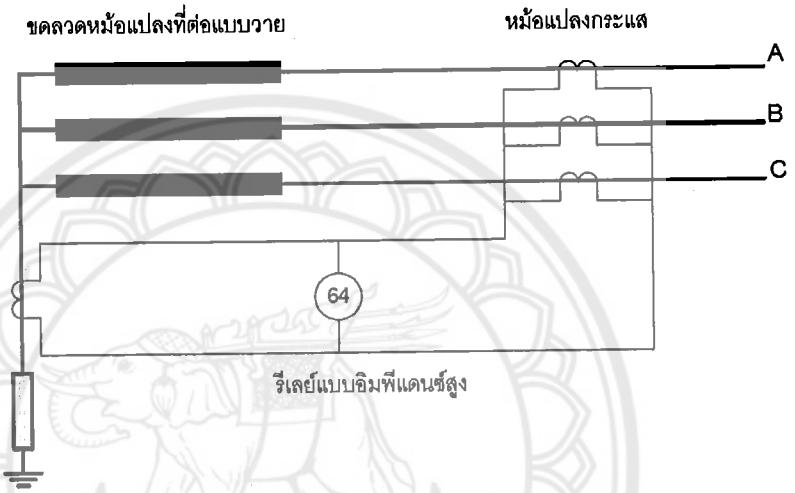
รูปที่ 2.36 การป้องกันฟอลต์ลงดินของขดลวดเดลต้าและสตาร์โดยใช้รีเลย์ 87N [9]



รูปที่ 2.37 การป้องกันฟอลต์ลงดินของขดลวดเดลต้าและสตาร์โดยใชรีเลย์ 67N [9]

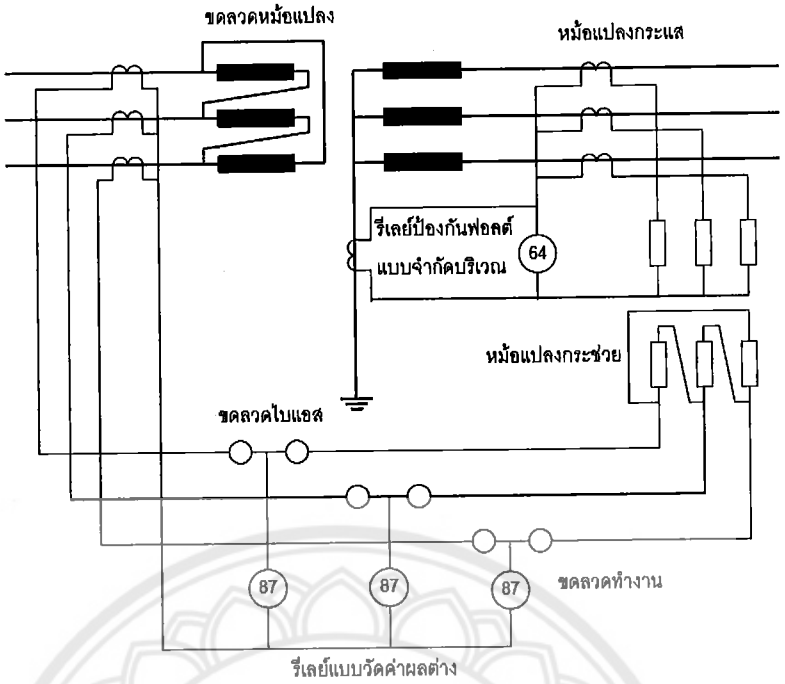
ข) การป้องกันฟอลต์ลงดินแบบจำกัดบริเวณ (Restricted Earth Fault Protection) การป้องกันฟอลต์ลงดินแบบใช้กระแสผลต่าง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การป้องกันฟอลต์ลงดินแบบจำกัดบริเวณดังแสดงในภาพที่ 2.38 กระแสเศษเหลือ (residual current) จากหม้อแปลงกระแสทั้ง 3 ตัวทางด้านสายจะสมดุลย์กับกระแสจากหม้อแปลงกระแสทางด้านสายนิวตรอลและรีเลย์ที่ใช้

เป็นแบบอิมพิแดนซ์สูง ระบบนี้จะทำงานเฉพาะในกรณีที่การลัดวงจรเกิดขึ้นภายในจุดที่ต่อหม้อแปลงกระแส คือ การลัดวงจรที่เกิดในขดลวดที่ต่อเป็นวายไว้เท่านั้น และจะไม่ทำงานเมื่อการลัดวงจรเกิดขึ้นภายนอกเขตนี้ ไม่ว่าการลัดวงจรนั้นจะเป็นชนิดใด ข้อดีของการป้องกันแบบนี้เนื่องจากสามารถใช้ รีเลย์แบบฉับพลัน (Instantaneous) ซึ่งตั้งค่าไว้ต่ำได้ การป้องกันฟอลต์ลงดินแบบจำกัดบริเวณนี้จะนิยมใช้กับหม้อแปลงที่ต่อแบบวายต่อลงดินโดยตรง เนื่องจากกระแสลัดวงจรจะสูงถึงแม้การลัดวงจรจะเกิดขึ้นที่รอบของขดลวดท้ายๆจึงจะป้องกันขดลวดสำหรับฟอลต์ลงดินได้ตลอด ซึ่งเป็นผลดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบซึ่งไม่มีการวัดกระแสในสายนิวตรอล



รูปที่ 2.38 การป้องกันฟอลต์ลงดินแบบจำกัดบริเวณ [9]

ค) การป้องกันแบบผสมระหว่างการวัดผลต่างและฟอลต์ลงดินแบบจำกัดบริเวณ (Combined Differential and Restricted Earth Fault Protection) การป้องกันแบบผสมกันนี้ทำให้มีประสิทธิภาพในการป้องกันหม้อแปลงที่สูงขึ้นเนื่องจากการป้องกันแบบผลต่างอย่างเดียวอาจจะมีความไวในการป้องกันไม่เพียงพอ เมื่อหม้อแปลงที่มีการต่อแบบวายและต่อลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ ถึงแม้ว่าจะเกิดการลัดวงจรที่บริเวณใกล้กับจุดนิวตรอลก็ตามวิธีนี้สามารถป้องกันขดลวดหม้อแปลงได้ทั้งหมดและมีรูปแบบการต่อดังภาพที่ 2.39 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าทางด้านขดลวดวายหม้อแปลงกระแสจะต่อแบบวายเพื่อป้อนกระแสให้แก่รีเลย์ป้องกันแบบจำกัดบริเวณ แต่ในส่วนของรีเลย์ผลต่างนั้นโดยปกติขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้านวายจะต้องต่อหม้อแปลงกระแสแบบเดลต้าจึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงช่วย เป็นตัวจ่ายกระแสแบบเดลต้าให้กับรีเลย์ผลต่าง



รูปที่ 2.39 การป้องกันแบบผสมระหว่างการวัดผลต่างและฟอลต์ลงดินแบบจำกัดบริเวณ [9]

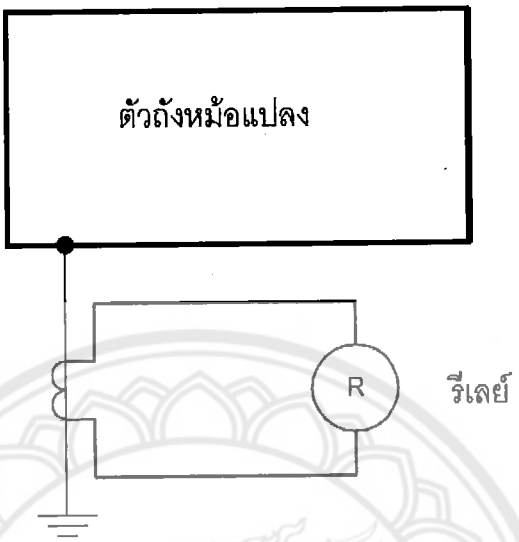
2.5.1.4 การป้องกันฟลักซ์สูงเกิน (Overfluxing Protection) การเกิดฟลักซ์สูงเกินไปนี้มักจะเนื่องมาจากความผิดพลาดในการดำเนินการใช้หม้อแปลงคือเป็นสภาวะการทำงานผิดปกติ (Abnormal Operating Conditions) กรณีเช่นนี้ไม่จำเป็นต้องรีบตัดหม้อแปลงออกจากระบบทันที เพราะระบบอาจมีการรบกวนชั่วครู่ อาจปล่อยไว้ได้นานถึง 1 หรือ 2 นาที แต่ถ้าสภาพยังคงเป็นเช่นนี้อยู่ อาจจะต้องตัดหม้อแปลงออกจากระบบก็ได้ เพราะความร้อนของแกนเหล็กหม้อแปลงจะสูงขึ้นโดยที่ค่าของฟลักซ์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนV /f ซึ่งเท่ากับ

$$\Phi = k\left(\frac{V}{f}\right) \tag{2.4}$$

ดังนั้น ในการป้องกันฟลักซ์สูงเกินไปจึงจะต้องวัดว่าอัตราส่วนV / f มีค่าเป็นเปอร์ยูนิต ซึ่งก็หมายถึงมีค่าขึ้นอยู่กับฟลักซ์ในหม้อแปลง การป้องกันฟลักซ์สูงเกินไปนี้จะใช้ค่อนข้างมากกับหม้อแปลงที่ติดอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพราะโอกาสเกิดการทำงานผิดปกติเช่นนี้จะมีมากกว่าหม้อแปลงอื่น

2.5.1.5 การป้องกันฟอลต์จากตัวถังลงดิน (Tank-earth Protection) การป้องกันแบบนี้เรียกว่า การป้องกันแบบโฮวาด (Howard Protection) โดยปกติตัวถังของหม้อแปลงจะมีค่าความเป็นฉนวนจากดินด้วยค่าความต้านทานของฉนวนประมาณ 10 โอห์มซึ่งเพียงพอต่อการลัดวงจรลง

ดิน การป้องกันการลัดวงจรในลักษณะนี้สามารทำได้โดยต่อรีเลย์เข้าทางขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสและขดลวดของหม้อแปลงกระแสต่อระหว่างตัวถังหม้อแปลงกับจุดต่อลงดินดังแสดงในภาพที่ 2.40



รูปที่ 2.40 การป้องกันฟอลต์จากตัวถังลงดิน [9]

2.5.2 การป้องกันทางด้านความร้อน (Thermal Protection)

การป้องกันทางความร้อนภายในหม้อแปลง ส่วนใหญ่พิจารณาจากพิกัดของหม้อแปลงโดยพิจารณาค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Temperature Rise) จากอุณหภูมิแวดล้อมหรือโดยรอบ (Ambient Temperature) สูงสุดที่กำหนดภายในหม้อแปลง และทำการพิจารณาข้อจำกัดการจ่ายโหลดของหม้อแปลง ตัวอย่างเช่น การจ่ายโหลดเกินขนาดสามารถกระทำได้ในช่วงเวลาสั้นๆ ขึ้นอยู่กับการใช้งานของหม้อแปลงก่อนหน้านั้น ไม่มีการกำหนดกฎตายตัว ว่าหม้อแปลงจะสามารถจ่ายโหลดเกินขนาดเป็นระยะเวลานานเท่าไร แต่สิ่งที่สำคัญคือจะต้องไม่ให้ขดลวดตัวนำมีความร้อนสูงเกินไป ถ้าอุณหภูมิมีค่าสูงเวลานาน ผลที่ได้จะทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพเร็วกว่ากำหนด

การป้องกันการจ่ายโหลดเกินขนาด มักใช้การวัดอุณหภูมิของขดลวดตัวนำเป็นเกณฑ์ ซึ่งโดยมากจะใช้วิธีที่เรียกว่าเทคนิคการจำลองแบบเชิงความร้อน (Thermal Image Technique หรือ Thermal Replica) โดยมากมักจะทำเป็นเหมือนกระเป๋า (Pocket) เล็กๆ อยู่ตรงส่วนบนของถังหม้อแปลง (อยู่ต่ำจากฝาบนประมาณ 10 นิ้ว ซึ่งเป็นตำแหน่งที่น้ำมันมีอุณหภูมิสูงสุด) ในกระเป๋านี้จะมีขดลวดให้ความร้อน โดยแบ่งกระแสมาจากกระแสทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง และจะทำให้เกิดอุณหภูมิขึ้นที่ส่วนนี้ในลักษณะที่คล้ายกับที่มีในขดลวดตัวจริง

2.5.3 การป้องกันทางด้านความดันและก๊าซภายในตัวถังหม้อแปลง (Pressure and Gas Protection)

โดยปกติหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่จะเป็นแบบขดลวดแช่อยู่ในฉนวนน้ำมัน เมื่อเกิดความผิดปกติภายในตัวหม้อแปลงเช่น เกิดการอาร์คหรือการดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดจะทำให้เกิดก๊าซที่ผิดปกติและทำให้เกิดความดันสูงเกินกว่าปกติ ปริมาณก๊าซและระดับความดันที่สูงเกินภายในถังขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการอาร์ค อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับและป้องกันความผิดปกติประเภทนี้ได้แก่ อุปกรณ์ตรวจจับความดันทันทีทันใด (Sudden Pressure Device) อุปกรณ์ปล่อยความดัน (Pressure Relief Devices) จะใช้ในกรณีที่เกิดความดันภายในถังสูงเกินแต่ไม่มากนักซึ่งจะช่วยรักษาระดับความดันภายในถัง และบุคโฮลซ์ รีเลย์ (Buchholz Relay) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซที่ผิดปกติที่ลอยขึ้นมาจากถังหม้อแปลง นอกจากนี้อาจจะมีอุปกรณ์ที่ตรวจจับความผิดปกติของก๊าซภายในถังหม้อแปลงโดยนำก๊าซไปวิเคราะห์ความผิดปกติที่ค่อยๆเกิดขึ้นภายในหม้อแปลง จะใช้ในกรณีที่เกิดความดันในถังสูงเกินมาก ซึ่งจะช่วยในการแยกหม้อแปลงออกจากระบบ

บทที่ 3
ระบบป้องกันหม้อแปลง

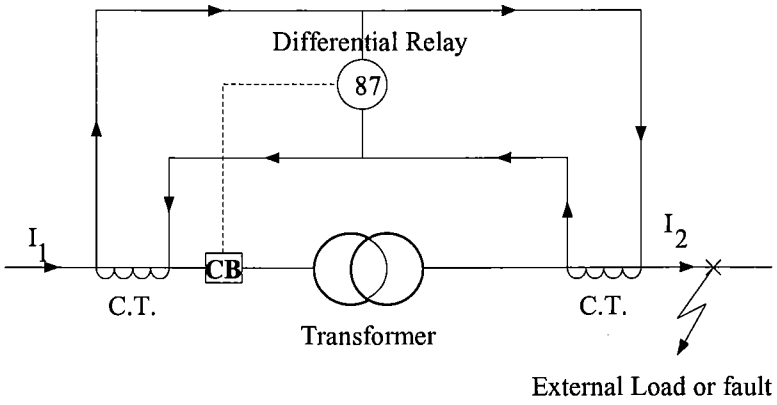
หม้อแปลงไฟฟ้าจัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากใช้เป็นตัวเชื่อมโยงเพื่อเพิ่มหรือลดระดับแรงดันในการส่งหรือจ่ายพลังไฟฟ้า โดยลักษณะของการป้องกันในหม้อแปลงที่ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับขนาดตัวถัง พิกัดแรงดัน และการประยุกต์การใช้งาน จากการศึกษาระบบป้องกันในหม้อแปลงนั้น สามารถแบ่งการป้องกันออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

การป้องกันทางไฟฟ้า	การป้องกันทางกล
รีเลย์ผลต่าง (Differential relay)	อุปกรณ์ปล่อยความดัน (Pressure Relief Device)
รีเลย์กระแสเกิน (Over-current relay)	รีเลย์ความดันทันทีทันใด(Sudden Pressure Relay)
การป้องกันด้วยฟิวส์ (Fuse Protection)	บุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz Relay)
การป้องกันด้วยกับดักเสิร์จ (Surge Protection)	อุปกรณ์ระบายความดันและวัดความดัน (Pressure Vacuum Bleeder and Indicator)
	ตัวตรวจจับก๊าซ (Gas Detector)
	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิขดลวดและน้ำมัน (Coils and oil Device Temperature)

3.1 การป้องกันทางไฟฟ้า (Electrical Protections)

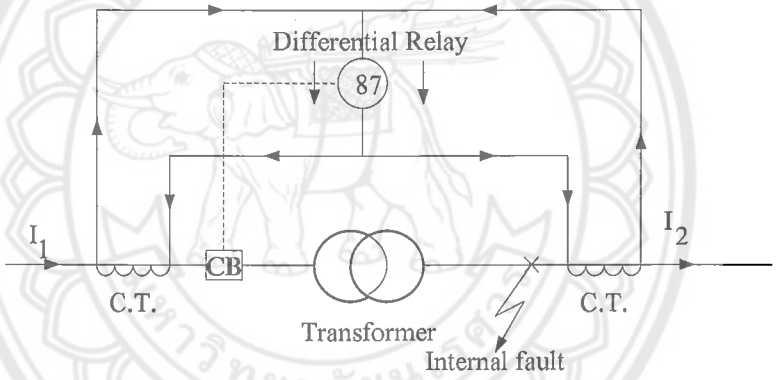
3.1.1 รีเลย์ผลต่าง (Differential relay)

การป้องกันผลต่างนั้นใช้หลักการเปรียบเทียบกระแสที่ไหลเข้าและออกหม้อแปลงไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการที่ว่า "ผลรวมของกระแสที่ไหลเข้ามีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลออก" ตามกฎของกระแสของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff Current Law's) ผลรวมในสภาวะปกติเมื่อไม่มีฟอลต์เกิดขึ้นกระแสจะเท่ากับศูนย์ และเมื่อเกิดฟอลต์ภายนอก (External Fault) จะต้องไม่มีกระแสไหลผ่านรีเลย์เช่นเดียวกับในสภาวะปกติ แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เกิดฟอลต์ภายนอกเขตการป้องกัน (External Fault) [1]

แต่เมื่อเกิดฟอลต์ภายใน (Internal Fault) จะมีกระแสผลต่างไหลผ่านรีเลย์จึงทำให้รีเลย์ทำงาน แสดงดังรูปที่ 3.2

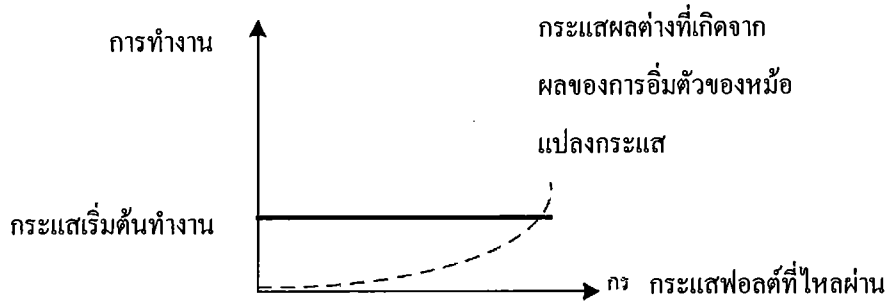


รูปที่ 3.2 เกิดฟอลต์ภายในเขตการป้องกัน (Internal Fault) [1]

3.1.1.1 ประเภทของรีเลย์ผลต่างที่ใช้ป้องกันหม้อแปลง

ก) รีเลย์ผลต่างแบบไม่มีการไบแอส

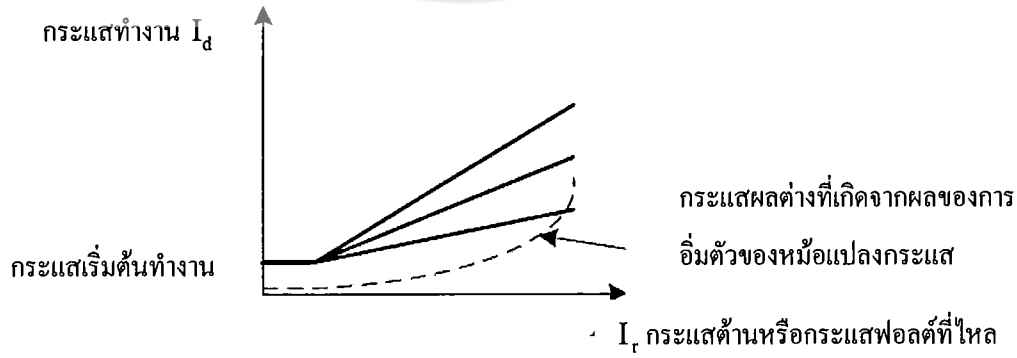
เป็นรีเลย์ที่ใช้กับหม้อแปลงแบบสองขดลวด โดยใช้หม้อแปลงกระแสวัดกระแสด้านแรงสูงและแรงต่ำ ซึ่งอาศัยหลักการคือใช้ผลต่างกระแสทั้งสองด้านสั่งให้รีเลย์ทำงาน ตัวรีเลย์ที่นำมาใช้จะเป็นรีเลย์กระแสเกินแบบธรรมดา จะเห็นได้จากกราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ประเภทนี้แสดงในรูปที่ 3.3 รีเลย์แบบนี้จะไม่มีเปอร์เซ็นต์ความชันดังนั้นเมื่อเกิดกระแสฟอลต์ที่ไหลผ่านหม้อแปลงสูงๆจะทำให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวทำให้กระแสที่ไหลเข้ารีเลย์เกิดผลต่างมากขึ้นซึ่งจะส่งผลกระทบทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดได้



รูปที่ 3.3 กราฟคุณลักษณะรีเลย์ผลต่างแบบไม่มีการไบแอส [8]

ข) รีเลย์ผลต่างแบบเปอร์เซนต์ไบแอส

คือรีเลย์ที่ออกแบบให้มีขดลวดไบแอสหรือขดลวดต้านเพื่อรักษาเสถียรภาพในการทำงานของรีเลย์ในขณะที่เกิดกระแสฟอลต์ภายนอกเขตป้องกันหรือกระแสฟอลต์ที่ไหลผ่านตัวหม้อแปลง กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ประเภทนี้แสดงในรูปที่ 3.4 รีเลย์แบบนี้จะมีเปอร์เซ็นต์ความชันดังนั้นเมื่อเกิดกระแสฟอลต์ที่ไหลผ่านสูงๆ หม้อแปลงกระแสจะอิ่มตัวทำให้กระแสที่ไหลเข้ารีเลย์เกิดผลต่างมากขึ้นและรีเลย์จะทำงานไม่ผิดพลาดได้ สิ่งที่สำคัญคือต้องเลือกเปอร์เซ็นต์ความชันให้สูงกว่ากระแสผลต่างที่เกิดจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส ในรูปที่ 3.4 ถ้าเราเลือกเปอร์เซ็นต์ความชันที่ 15% ในช่วงที่เกิดกระแสฟอลต์ที่ไหลผ่านมีปริมาณต่ำ รีเลย์จะไม่ทำงานและสามารถตรวจจับฟอลต์ปริมาณต่ำภายในเขตป้องกันได้ดีมีความไวในการทำงานสูง แต่ถ้าเกิดกระแสฟอลต์ที่ไหลผ่านมีปริมาณสูง รีเลย์จะทำงานซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ควรเกิดขึ้น ดังนั้นถ้าเลือกเปอร์เซ็นต์ความชันที่ 30% หรือ 40% ในช่วงที่เกิดกระแสฟอลต์นอกเขตป้องกันที่ไหลผ่านมีปริมาณสูง รีเลย์จะไม่ทำงานแต่ความไวในการทำงานของรีเลย์ก็จะลดลง ซึ่งกราฟคุณลักษณะแบบนี้จะเป็นรีเลย์แบบอิเล็คโตรเมคานิคและรีเลย์แบบสเตติค



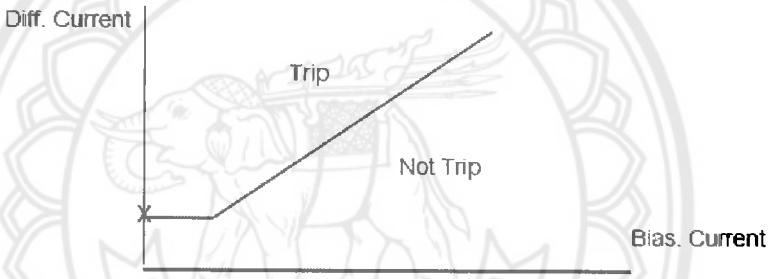
รูปที่ 3.4 กราฟคุณลักษณะรีเลย์ผลต่างแบบเปอร์เซนต์ไบแอส [9]

เนื่องจากการทำงานของรีเลย์ผลต่างอาศัยผลต่างของกระแส 2 ด้านของหม้อแปลงมาเปรียบเทียบกับค่าเซตติ้งซึ่งมักจะเซตติ้งไว้ประมาณ 30% ของกระแสเรตของรีเลย์ ซึ่งไม่สูงมากนัก บางครั้งอาจจะมีแฟคเตอร์อื่นๆ ที่ทำให้รีเลย์ทำงานได้โดยไม่มีฟอลต์ คือ

1. ค่า Error ของ CT ทั้ง 2 ฝั่งต่างกัน

2. การเกิด CT Mismatch เนื่องจาก Ratio ของ CT และ Aux. CT ในของจริงมีไม่ตรงกับที่คำนวณมา

3. การทำงานปกติเช่นการเปลี่ยน Tap หม้อแปลง ซึ่งมักจะเปลี่ยนเพียงด้านเดียวของหม้อแปลง ผลทั้ง 3 นี้จะนำไปสู่การทำงานผิดพลาดของรีเลย์ได้ ดังนั้นรีเลย์จึงต้องมีคุณสมบัติที่เรียกว่า slope ขึ้นมา โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของผลเฉลี่ยของกระแสระหว่าง 2 ฝั่งหม้อแปลงและผลต่างของกระแสระหว่าง 2 ฝั่งหม้อแปลง ก่อนให้เอาท์พุตออกไปแทนการพิจารณาแต่ผลต่างของกระแสระหว่าง 2 ฝั่งหม้อแปลงเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 3.5 แสดงค่าการทำงานของรีเลย์ผลต่างแบบเปอร์เซนต์ไบแอส [9]

Diff Current = ผลต่างของกระแสระหว่าง 2 ฝั่งหม้อแปลง $\left(I_{HV} - I_{LV}\right)$

Bias Current = ผลเฉลี่ยของกระแสระหว่าง 2 ฝั่งหม้อแปลง $\left(\frac{I_{HV} + I_{LV}}{2}\right)$

จากรูปที่ 3.5 นี้หมายความว่า ค่าการทำงานของรีเลย์จะสูงขึ้นตามกระแสที่ผ่านหม้อแปลง (Through Current) เช่นเมื่อตอนจ่ายโหลดปกติ หรือเกิดฟอลต์นอกเขตการป้องกันทำให้รีเลย์ มีเสถียรภาพดีขึ้นหลีกเลี่ยงการทริปผิดได้

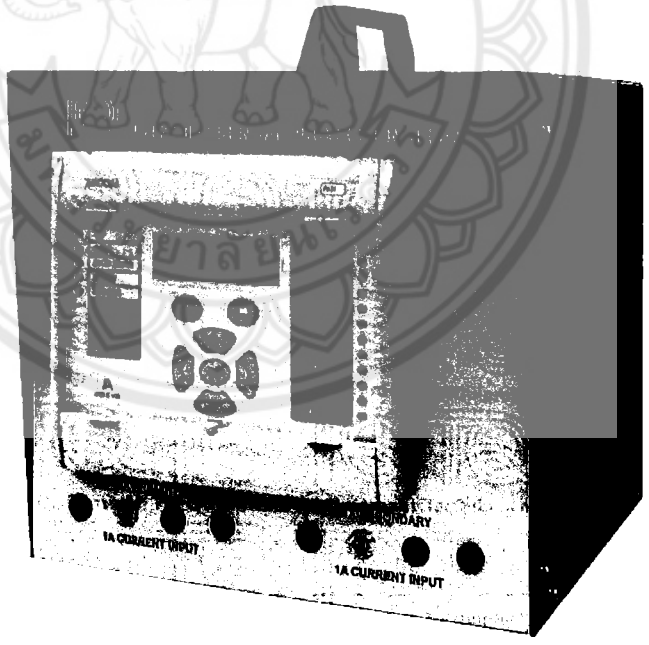
ค) รีเลย์ผลต่างแบบเปอร์เซ็นต์ไบแอสที่มีการต้านฮาร์มอนิก

รีเลย์ประเภทนี้มีขดลวดไบแอสเหมือนกับรีเลย์ประเภทที่สองแต่จะเป็นรีเลย์แบบสแตติคและรีเลย์แบบดิจิตอล ส่วนรีเลย์แบบอิเล็คโตรแมคานิคไม่เหมาะสมที่จะทำเนื่องจากฟังก์ชันการต้านฮาร์มอนิกจะต้องใช้วงจรอิเล็คโทรนิคในการตรวจจับฮาร์มอนิกที่สองที่เกิดจากกระแสพุ่งเข้า ฟังก์ชันการต้านฮาร์มอนิกแบ่งออกเป็นสองวิธี วิธีแรกในกรณีของรีเลย์แบบสแตติคที่ใช้วงจรกรองความถี่โดยที่กระแสในขดลวดต้านคือผลรวมของกระแสที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านเข้ารีเลย์บวก

กับกระแสที่เกิดจากฮาร์มอนิกที่สอง โดยที่กระแสที่ไหลผ่านจะผ่านวงจรกรองความถี่มูลฐาน ส่วนกระแสฮาร์มอนิกที่สองจะผ่านวงจรกรองความถี่ฮาร์มอนิกที่สอง วิธีที่สองในกรณีของรีเลย์แบบสแตติคและแบบดิจิตอลที่ใช้วงจรยับยั้งทำงาน (Blocking circuit) โดยที่วงจรนี้จะยับยั้งขดลวดทริปทำงานเมื่อฮาร์มอนิกที่สองสูงเกินค่าที่ตั้งไว้ที่ประมาณ 10-20 % ของความถี่มูลฐาน ซึ่งปกติเวลาเกิดกระแสพุ่งเข้าจะมีฮาร์มอนิกที่สองเป็นองค์ประกอบประมาณ 60% รีเลย์ประเภทนี้จึงเหมาะสำหรับหม้อแปลงขนาดพิกัดกำลังตั้งแต่ 10 MVA ขึ้นไป

ง) รีเลย์ผลต่างแบบอิมพีแดนซ์สูง

รีเลย์ทั้งสามประเภทที่ผ่านมาจัดอยู่ในพวกรีเลย์ผลต่างแบบอิมพีแดนซ์ต่ำ ส่วนรีเลย์ประเภทนี้จะนิยมใช้ป้องกันกระแสเกินลงดินแบบจำกัดบริเวณ การวัดผลต่างแบบอิมพีแดนซ์สูงนี้จะเป็นการวัดกระแสผลต่างระหว่างกระแสตกค้างที่ด้านเฟส (3Io) กับกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานและจะติดตั้งตัวต้านทานเสถียรภาพต่ออนุกรมกับรีเลย์เพื่อป้องกันการทำงานที่ผิดพลาดเนื่องจากกรณีเกิดฟอลต์ลงดินอย่างรุนแรงภายในเขตป้องกันที่ทำให้หม้อแปลงกระแสอิ่มตัวหรือเกิดจากฟอลต์ภายนอกเขตป้องกันที่ทำให้หม้อแปลงกระแสที่เฟสอิ่มตัวและรีเลย์ประเภทนี้จะเป็นรีเลย์แบบสแตติคและแบบดิจิตอล



รูปที่ 3.6 รีเลย์ผลต่าง [19]

3.1.1.2 การเซตติ้งรีเลย์ผลต่างแบบอิเล็คโตรแมคานิคและแบบสแตติคกรณีที่มีแท็ปกระแสให้เลือกภายในตัว

ก) เลือกขนาดหม้อแปลงกระแส สามารถคำนวณได้จากกระแสโหลดสูงสุดของหม้อแปลงหลัก (Main transformer) พิกัดกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแสจะต้องสูงกว่าค่ากระแส

โหลดสูงสุด โดยปกติจะเลือกที่ประมาณ 150% ของกระแสโหลดสูงสุด ส่วนพิกัดกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสสามารถเลือกใช้ได้ระหว่าง 1 A กับ 5 A

ข) หาค่ากระแสที่ไหลเข้ารีเลย์ (I_R) โดยจะต้องคำนวณที่ฐานพิกัดกำลังเดียวกัน ถ้าขดลวดหม้อแปลงหลักแบบเดลต้าจะต้องต่อหม้อแปลงกระแสแบบสตาร์ทำให้กระแสที่ไหลเข้ารีเลย์เท่ากับกระแสโหลดสูงสุดที่แปลงมาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (I_{FL-SEC_CT}) หรือ $I_R = I_{FL-SEC_CT}$ ส่วนขดลวดหม้อแปลงหลักแบบสตาร์จะต้องต่อหม้อแปลงกระแสแบบเดลต้าทำให้กระแสที่ไหลเข้ารีเลย์เท่ากับ $I_R = 1.732 * I_{FL-SEC_CT}$

ค) หาอัตราส่วนกระแสที่ไหลเข้ารีเลย์ กรณีหม้อแปลงหลักมีสองขดลวด อัตราส่วนจะเท่ากับกระแสที่ไหลเข้ารีเลย์ด้านแรงต่ำต่อด้านแรงสูง $\left(\frac{I_{RL}}{I_{RH}}\right)$ ส่วนกรณีหม้อแปลงหลักมี สามขดลวดอัตราส่วนจะคำนวณหาถึงสามอัตราส่วนทั้งด้านแรงดันสูง แรงดันต่ำ และแรงดันปานกลางดังนี้ $\left(\frac{I_{RL}}{I_{RH}}, \frac{I_{RL}}{I_{RM}}, \frac{I_{RM}}{I_{RH}}\right)$

ง) เลือกอัตราส่วนแท็ปกระแสภายในตัวรีเลย์ ค่ามาตรฐานของแท็ปกระแสคือ 2.9, 3.2, 3.5, 3.8, 4.2, 4.6, 5.0 และ 8.7 A ตามลำดับโดยในการเลือกควรจะเลือกค่าที่ใกล้เคียงค่าอัตราส่วนกระแสที่ไหลเข้ารีเลย์ให้มากที่สุด จะมีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าก็ได้ ในกรณีหม้อแปลงหลักมีสามขดลวดจะต้องเลือกที่อัตราส่วนกระแสที่ไหลเข้ารีเลย์สูงสุดก่อนเป็นอันดับแรก และอัตราส่วนกระแสที่เหลือจะใช้ แท็ปกระแสต่ำสุดจากการเลือกครั้งแรกเป็นค่าอ้างอิง

จ) หาค่าอัตราส่วนที่ไม่ตรงกัน (Mismatch Ratio) กรณีหม้อแปลงหลักมีสองขดลวดจะหาค่าอัตราส่วนที่ไม่ตรงกันระหว่างด้านแรงสูงกับด้านแรงต่ำ ส่วนหม้อแปลงหลักมีสามขดลวดจะต้องหาค่าอัตราส่วนที่ไม่ตรงกันถึงสามอัตราส่วนซึ่งค่าที่ได้จะนำไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชัน

ฉ) ตรวจสอบเสถียรภาพในการทำงานของหม้อแปลงกระแส ในขณะที่เกิดฟอลต์ภายนอกเขตป้องกันทำให้เกิดกระแสฟอลต์ไหลผ่านหม้อแปลงหลักและไหลผ่านหม้อแปลงกระแสซึ่งทำให้หม้อแปลงกระแสอิ่มตัวและกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (I_E) ของหม้อแปลงกระแสที่เฟสเปลี่ยนแปลงทำให้รีเลย์วัดค่าผลต่างทำงานผิดพลาดได้ ดังนั้นเทคนิคในการตรวจสอบเสถียรภาพของแต่ละบริษัทผู้ผลิตจึงใช้วิธีที่แตกต่างกันออกไป

ช) การเลือกเปอร์เซ็นต์ความชัน โดยปกติค่าเปอร์เซ็นต์ความชันของรีเลย์วัดค่าผลต่างแบบอิเล็คโตรแมคานิคและแบบสแตติคจะเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความชันที่คงที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนเส้นโค้งได้ ซึ่งจะถูกกำหนดมาจากโรงงานผู้ผลิตเช่น 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% เป็นต้น ผู้ใช้งานสามารถเลือกค่าเปอร์เซ็นต์ความชันโดยพิจารณาจากปัจจัยดังต่อไปนี้

1) เปอร์เซ็นต์สูงสุดของแท็ปแรงดันสำหรับหม้อแปลงที่มีตัวเปลี่ยนแท็ป (% LTC)

2) เปอร์เซ็นต์ค่าอัตราส่วนไม่ตรงกัน (% M)

3) เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนสูงสุดของหม้อแปลงกระแส (% CT)

โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความชันจะต้องสูงกว่าผลรวมในรูปเปอร์เซ็นต์ของปัจจัยทั้งสามโดยสามารถเลือกได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ตารางการเลือกค่าเปอร์เซ็นต์ความชัน

ผลรวมของเปอร์เซ็นทั้งสามปัจจัย (% LTC + % M + % CT)	เลือกค่าเปอร์เซ็นต์ความชัน (% Slope)
น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 %	15 % , 20 %
น้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 %	25 % , 30 %
น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 %	35 %
น้อยกว่าหรือเท่ากับ 55 %	40 %

3.1.1.3 การเซตติ้งรีเลย์ผลต่างแบบอิเล็คโตรแมคานิคและแบบสแตติคกรณีที่ไม่มีแท็ปกระแสให้เลือกภายในตัว

ในการเซตติ้งรีเลย์ที่ไม่มีแท็ปกระแสภายในตัวเราจะใช้หม้อแปลงปรับอัตราส่วน (Matching or Interposing Transformers) ไว้ปรับค่ากระแสที่ไหลเข้ารีเลย์ให้มีค่าเท่ากันทุกขดลวดไบแอส ในกรณีหม้อแปลงหลักมีสองขดลวดเราจะติดตั้งหม้อแปลงปรับอัตราส่วนที่ด้านใดด้านหนึ่งเพื่อที่จะให้กระแสด้านที่ปรับอัตราส่วนกระแสเท่ากับด้านที่ไม่ได้ปรับอัตราส่วน ส่วนในกรณีหม้อแปลงหลักมีสามขดลวดและมีสามพิกัดแรงดันวิธีที่ง่ายที่สุดในการปรับอัตราส่วนกระแสคือปรับกระแสที่ไหลเข้ารีเลย์ทั้งสามด้านให้เท่ากับค่าพิกัดกระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงปรับอัตราส่วนนั้นคือ 5 A หรือ 1A ผลที่ได้รับจากการใช้หม้อแปลงปรับอัตราส่วนคืออัตราส่วนที่ไม่ตรงกันจะมีค่าประมาณศูนย์เปอร์เซ็นต์หรือมีค่าน้อยมากทำให้การเลือกค่าเปอร์เซ็นต์ความชันสามารถเลือกได้ต่ำถึง 15 % หรือ 20 % สำหรับหม้อแปลงที่ไม่มีตัวเปลี่ยนแท็ป

3.1.1.4 ฟังก์ชันและคุณลักษณะของรีเลย์ผลต่างแบบอิเล็คโตรแมคานิคและแบบสแตติค

ก) ฟังก์ชันต้านฮาร์มอนิกที่สอง ในขณะที่หม้อแปลงเริ่มจ่ายไฟโดยที่ต่อวงจรด้านปฐมภูมิขณะที่ด้านทุติยภูมิเปิดวงจรอยู่ ถ้าแรงดันอยู่ที่มุมศูนย์องศาทางไฟฟ้าจะทำให้เกิดกระแส

สนามแม่เหล็กพุ่งเข้าสูงสุดและมีฮาร์มอนิกที่สองรวมอยู่ด้วยประมาณ 60 % รีเลย์แบบสแตติคจะมีฟังก์ชันต้านฮาร์มอนิกที่สองโดยจะมีวงจรตรวจจับเมื่อมีฮาร์มอนิกที่สองสูงเกินค่าที่กำหนดประมาณ 15-20 % ของความถี่มูลฐานรีเลย์จะไม่สั่งทริปในกรณีนี้ และค่าเซตติ้งนี้จะถูกกำหนดมาจากโรงงานผู้ผลิตไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ในส่วนของรีเลย์ผลต่างแบบอิเล็คโตรแมคานิคจะไม่มีฟังก์ชัน

ข) ฟังก์ชันทริปฉับพลัน ฟังก์ชันนี้ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดฟอลต์ภายในเขตป้องกันอย่างรุนแรงโดยจะดูที่ปริมาณฟอลต์และไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งภายในตัวรีเลย์ทั้งแบบอิเล็คโตรแมคานิคและแบบสแตติคจะมีฟังก์ชันนี้อยู่และจะถูกกำหนดโดยอัตโนมัติมาจากโรงงานผู้ผลิตมีค่าอยู่ที่ประมาณ 8-15 เท่าของแท็ปกระแสที่เราได้เลือก ซึ่งจำนวนเท่าขึ้นอยู่กับรีเลย์แต่ละรุ่นของผู้ผลิต

ค) ฟังก์ชันกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กเกิน ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดที่พิกัดและเกิดการปลดหม้อแปลงออกจากระบบ แรงดันที่ขั้วของหม้อแปลงจะสูงขึ้นประมาณ 10-20 % ทำให้เกิดกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นและอาจจะสูงพอที่จะทำให้รีเลย์ทำงาน กระแสกระตุ้นนี้เกิดจากแรงดันอินพุตสูงเกินแรงดันจุดเข่า (Knee point voltage) ของหม้อแปลงมีผลทำให้รูปคลื่นของกระแสกระตุ้นมีลักษณะเป็นกระแสพุ่งเข้า ซึ่งฟังก์ชันนี้รีเลย์แบบอิเล็คโตรแมคานิคจะไม่มี จะมีแต่รีเลย์แบบสแตติคและรีเลย์แบบดิจิตอลโดยที่กระแสพุ่งเข้าจากสาเหตุนี้จะเกิดฮาร์มอนิกที่ห้ามากที่สุดดังนั้นการตรวจจับของรีเลย์แบบสแตติคจะใช้วิธีตั้งเวลาหน่วงเมื่อตรวจพบฮาร์มอนิกที่ 5

ง) ค่ากระแสเริ่มตอบสนอง สำหรับรีเลย์แบบอิเล็คโตรแมคานิคและแบบสแตติครุ่นแรกๆ จะมีค่ากระแสเริ่มตอบสนอง คงที่ประมาณ 30% ของแท็ปกระแสที่เลือกในขณะที่รีเลย์แบบสแตติครุ่นใหม่ก่อนที่จะพัฒนาเป็นรีเลย์แบบดิจิตอล ค่ากระแสเริ่มตอบสนอง จะสามารถเลือกได้อยู่ในช่วง 10-50 % ของกระแสโหลดที่พิกัด โดยที่หน้าปัดรีเลย์จะมีดิฟสวิทช์ให้เลือกค่าเซตติ้งกระแสเริ่มตอบสนอง

จ) เวลาในการทำงานหรือเวลาที่ใช้ในการทริป สำหรับรีเลย์ทั้งสองแบบรุ่นแรกๆผู้ผลิตจะให้มาเป็นกราฟเส้นโค้งเวลากับกระแสโดยจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.02- 0.16 วินาที ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแส ถ้าเป็นการทำงานของกระแสเริ่มตอบสนอง ที่ประมาณ 30 % ของแท็ป กระแสหรือฟังก์ชันทริปฉับพลันที่ 10 เท่าของแท็ปกระแสจะใช้เวลาประมาณ 0.12 -0.16 วินาที แต่ถ้าเป็นการเกิดฟอลต์ภายในเขตป้องกันที่รุนแรงประมาณ 20 เท่าของกระแสโหลดที่พิกัดจะใช้เวลาประมาณ 0.02 วินาที สำหรับรีเลย์แบบสแตติครุ่นใหม่จะใช้เวลาประมาณ 0.01- 0.025 วินาที

3.1.1.5 การเซตติ้งรีเลย์วัดค่าผลต่างแบบดิจิตอล

ในการเซตติ้งรีเลย์แบบดิจิตอลได้มีการปรับปรุงและแก้ไขเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถทำการเซตติ้งได้ง่ายขึ้น สามารถปรับแต่งค่าเซตติ้งให้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะที่และจากการศึกษารวบรวมข้อมูลทำให้สรุปขั้นตอนการเซตติ้งได้ดังนี้

ก) การต่อหม้อแปลงกระแส หม้อแปลงกระแสจะถูกต่อแบบสตาร์ทั้งหมดโดยไม่ต้องคำนึงถึงว่าหม้อแปลงหลักจะมีกลุ่มเวกเตอร์แบบใดและไม่ต้องใช้หม้อแปลงปรับอัตราส่วน สาเหตุที่ใช้การต่อแบบสตาร์ทั้งหมดเนื่องจากรีเลย์แบบดิจิตอลส่วนใหญ่จะเป็นแบบหลายฟังก์ชันซึ่งมีการป้องกันกระแสเกินรวมอยู่ในรีเลย์ตัวเดียวกันดังนั้นจึงใช้หม้อแปลงกระแสร่วมกัน

ข) การแก้ไขอัตราส่วนหม้อแปลงกระแส รีเลย์ดิจิตอลบางรุ่นเพียงแค่ป้อนอัตราส่วนหม้อแปลงกระแสและกลุ่มเวกเตอร์ของหม้อแปลงหลักแล้วตัวรีเลย์จะแก้ไขอัตโนมัติโดยที่ผู้ใช้งานไม่ต้องแก้ไขอะไร ในขณะที่รีเลย์ดิจิตอลบางรุ่นต้องมีการคำนวณการแก้ไขอัตราส่วนหม้อแปลงกระแสและป้อนค่าแฟคเตอร์การแก้ไขลงในรีเลย์

ค) การเซตติ้งกระแสเริ่มตอบสนอง คือค่ากระแสต่ำสุดที่รีเลย์จะทำงานซึ่งรีเลย์แบบดิจิตอลสามารถปรับแต่งค่าเซตติ้งได้ตั้งแต่ 0.05 In – 1.0 In เมื่อ In คือกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสโดยปกติจะเท่ากับ 1 A หรือ 5A และค่ากระแสเริ่มตอบสนอง ต่ำสุดที่ควรเซตติ้ง คือ 0.1 In เนื่องจากที่ค่า 0.05 In จะใกล้เคียงกับค่ากระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงหลักและค่ากระแสเริ่มตอบสนองสูงสุดที่ควรเซตติ้งคือ 0.5 In เนื่องจากถ้าเราเซตติ้งสูงเกินไปรีเลย์จะทำงานช้าหรือไม่สามารถตรวจจับกระแสฟอลต์ปริมาณต่ำๆได้

ง) การเซตติ้งกระแสผลต่างแบบฉับพลันหรือฟังก์ชันทริปฉับพลัน คือค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นฉับพลันและในการเซตติ้งจะต้องให้สูงกว่ากระแสพุ่งเข้าขณะจ่ายไฟให้หม้อแปลงครั้งแรก และจะต้องสูงกว่ากระแสฟอลต์สูงสุดภายนอกเขตป้องกัน ค่าเซตติ้งทั่วไปจะอยู่ในช่วง 2.0 In - 20 In ซึ่งปกติค่ากระแสพุ่งเข้าของหม้อแปลงพิกัด 2 MVA อยู่ที่ประมาณ 12 In ซึ่งเป็นค่าพิกัดกำลังต่ำสุดของหม้อแปลงที่เริ่มใช้รีเลย์วัดค่าผลต่าง ส่วนหม้อแปลงขนาดใหญ่ตั้งแต่พิกัดกำลัง 100 – 500 MVA จะมีค่ากระแสสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าประมาณ 5.0 In – 3.0 In ลดลงตามลำดับ

จ) การเซตติ้งฟังก์ชันต้านฮาร์มอนิกที่สอง ฟังก์ชันนี้ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดขณะที่หม้อแปลงรับไฟจากระบบเป็นครั้งแรก ค่าเซตติ้งจะเริ่มตั้งแต่ 0.1 – 65 % ของความถี่มูลฐาน ปกติกระแสพุ่งเข้าจะมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่สองประมาณ 60% และค่าที่เซตติ้งใช้งานทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 20 % ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มมีผลกระทบต่อกระแสผลต่างที่ไหลเข้ารีเลย์

ฉ) การเซตติ้งฟังก์ชันต้านฮาร์มอนิกที่ห้า ฟังก์ชันนี้ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดที่พิกัดแล้วทำการปลดโหลดกะทันหันหรือตั้งใจให้ระบบอยู่

ในสภาวะแรงดันสูงเกิน ทำให้เกิดแรงดันสูงเกินประมาณ 10-20 % และเกิดฮาร์มอนิกที่ห้าที่ตัวหม้อแปลงซึ่งค่าเซตติ้งจะเริ่มตั้งแต่ 0.1-65 % แต่ค่าที่ใช้งานทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 10 %

ช) การเซตติ้งค่าเปอร์เซ็นต์ความชัน กราฟที่แสดงความชันจะเป็นการบอกว่าพื้นที่ภายในกราฟบริเวณใดบ้างหรือค่ากระแสที่จุดใดบ้างที่รีเลย์จะทำงานและไม่ทำงาน โดยที่แกนตั้งคือกระแสผลต่างและแกนนอนคือกระแสต้านหรือบางครั้งเรียกว่ากระแสที่ไหลผ่าน โดยปกติรีเลย์แบบอิเล็คโตรแมคานิคและแบบสแตติคเส้นโค้งเปอร์เซ็นต์ความชันจะกำหนดมาให้ค่าเดียวไม่สามารถปรับแต่งเส้นโค้งเปอร์เซ็นต์ความชันได้ ในขณะที่รีเลย์แบบดิจิตอลสามารถปรับแต่งเส้นโค้งเปอร์เซ็นต์ความชันได้และแบ่งเส้นโค้งออกเป็นสองความชัน โดยองค์ประกอบของเส้นโค้งเปอร์เซ็นต์ความชันแบ่งออกได้ดังนี้

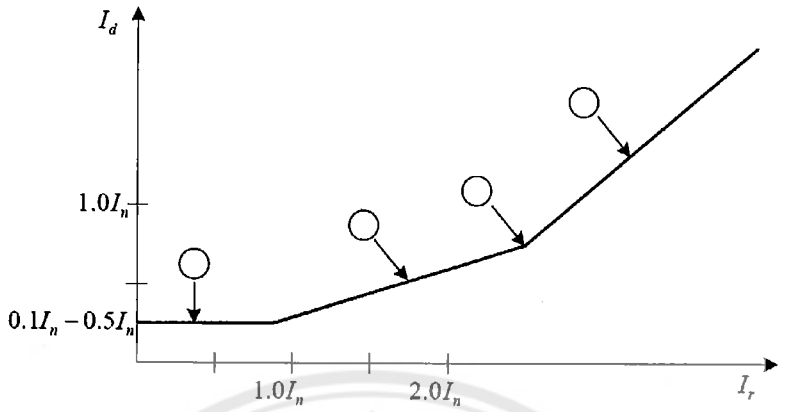
ส่วนที่ 1 : กระแสเริ่มตอบสนอง เส้นโค้งส่วนที่หนึ่งนี้จะเริ่มต้นในแนวนอนวิ่งเป็นเส้นตรงโดยที่จุดเริ่มต้นของเส้นเท่ากับกระแสเริ่มตอบสนอง(0.1 In – 0.5 In) ในแกนตั้งและเริ่มต้นจากศูนย์แต่ไม่เกิน 1.0 In ในแกนนอนซึ่งค่า 1.0 In คือค่ากระแสโหลดที่พิกัด ความยาวของเส้นโค้งส่วนที่ 1 นี้ไม่สามารถปรับแต่งได้เป็นค่าที่กำหนดตายตัวมาจากบริษัทผู้ผลิตแต่จะไม่เกิน1.0 In เนื่องจากที่ระดับกระแสปริมาณน้อยจนถึงค่ากระแสโหลดที่พิกัดจะมีค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนต่ำมากเส้นโค้งนี้จึงมีลักษณะเป็นเส้นตรง

ส่วนที่ 2 : เส้นโค้งเปอร์เซ็นต์ความชันที่ 1 เส้นโค้งส่วนนี้จุดเริ่มต้นจะต่อกับเส้นโค้งส่วนที่ 1 ซึ่งค่าเซตติ้งโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงประมาณ 10-50 % วัตถุประสงค์เพื่อให้แน่ใจในด้านความไว (Sensitivity) กรณีที่เกิดกระแสฟอลต์ภายในเขตป้องกันที่ระดับกระแสโหลดปกติสำหรับเงื่อนไขในการเซตติงค่าเส้นโค้งเปอร์เซ็นต์ความชันนี้เพื่อยอมให้หม้อแปลงทำงานได้ที่ตำแหน่งแท็ปสูงสุดของตัวเปลี่ยนแท็ปขณะจ่ายโหลด และครอบคลุมถึงค่าคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแส

ส่วนที่ 3 : จุดเข่า(Knee point) คือจุดเปลี่ยนความชันระหว่างเส้นโค้งเปอร์เซ็นต์ความชันที่ 1 กับ 2 ซึ่งค่าเซตติ้งจะอยู่ในช่วงระหว่าง 1.0 In – 4.0 In ของกระแสต้านในแกนนอนโดยที่จะต้องเซตติ้งค่านี้ให้สูงกว่าระดับกระแสทำงานสูงสุดของหม้อแปลงซึ่งได้แก่ กระแสที่พิกัดจากการระบายความร้อนสูงสุดกับระดับกระแสโหลดเกินฉุกเฉินสูงสุดหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ จุดที่สิ้นสุดกระแสเกินสูงสุดของหม้อแปลงที่ยังสามารถทำงานได้ กรณีที่หม้อแปลงทำงานตัวเดียวไม่ได้ขนานกับหม้อแปลงตัวอื่นค่าเซตติงที่จุดโค้งนี้จะอยู่ที่ประมาณ 2.0In แต่สำหรับกรณีที่หม้อแปลงขนานกันสองตัวแต่เกิดมีหม้อแปลงเสียหนึ่งตัว ค่าเซตติงที่จุดเข่านี้จะอยู่ที่ประมาณ 4.0In ของกระแสต้านในแกนนอน

ส่วนที่ 4 : เส้นโค้งเปอร์เซ็นต์ความชันที่ 2 เส้นโค้งนี้เริ่มต้นจากจุดเข่า (Knee point) ซึ่งค่าเซตติ้งโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงประมาณ 50-100 % วัตถุประสงค์ของค่าเซตติ้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่ารีเลย์

มีเสถียรภาพภายใต้สภาวะกระแสฟอลต์สูงสุดนองเขตป้องกันที่ทำให้เกิดกระแสผลต่างสูงที่มีผลมาจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส และเส้นโค้งเปอร์เซ็นต์ความชันแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เส้นโค้งเปอร์เซ็นต์ความชันของรีเลย์แบบดิจิตอล [1]

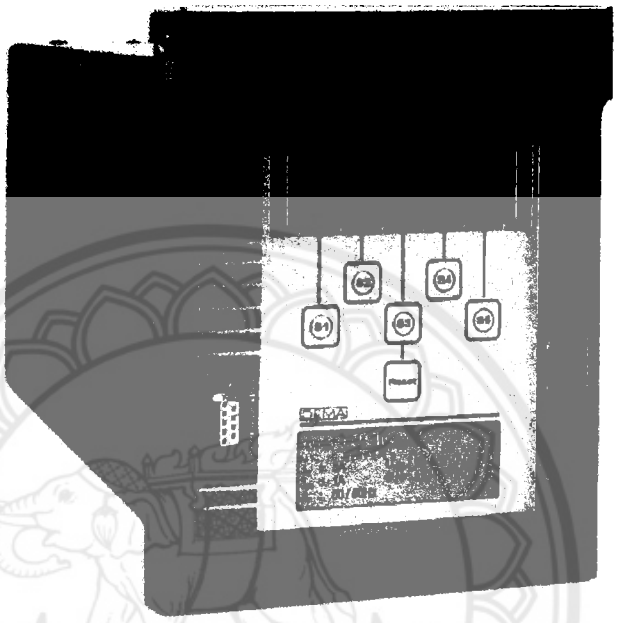
3.1.2 รีเลย์กระแสเกิน (Over-current Relay)

การป้องกันกระแสเกินสามารถแบ่งออกเป็นการป้องกันกระแสเกินที่เฟสและกระแสเกินลงดิน การป้องกันกระแสเกินที่เฟสจะเป็นการป้องกันโหลดเกินและกระแสลัดวงจรที่มีปริมาณสูง และการป้องกันกระแสเกินลงดินจะเป็นการป้องกันการลัดวงจรลงดินทั้งภายในตัวหม้อแปลงและภายนอกหม้อแปลง ส่วนการเซตติ้งรีเลย์กระแสเกินแบบต่างแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

3.1.2.1 การเซตติ้งรีเลย์กระแสเกินที่เฟสแบบอิเล็คโตรแมคานิค

ก) ฟังก์ชันกระแสเกินแบบหน่วงเวลา เริ่มต้นด้วยการหาค่ากระแสโหลดที่พิกัดและเลือกว่าจะให้รีเลย์เริ่มตอบสนองที่ค่าเซตติ้งประมาณ 110-300 % ของกระแสโหลดที่พิกัด ต่อจากนั้นนำค่ากระแสเริ่มตอบสนองมาเลือกแท็ปกระแสของรีเลย์โดยเลือกให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด รีเลย์แบบอิเล็คโตรแมคานิคหนึ่งตัวจะมีหนึ่งเส้นโค้งเวลากับกระแส ลักษณะของเส้นโค้งนี้จะแบ่งออกเป็นสองค่ายมาตรฐานสากลได้แก่ ทางทวีปยุโรปใช้มาตรฐาน IEC และทางทวีปอเมริกาใช้มาตรฐาน ANSI/IEEE ลักษณะเส้นโค้งที่นิยมใช้ป้องกันหม้อแปลงได้แก่ แบบอินเวอร์สไทม์ปกติ และแบบเวรี่อินเวอร์สไทม์ ซึ่งเส้นโค้งของทั้งสองมาตรฐานจะมีความแตกต่างกันโดยใช้สูตรคำนวณต่างกันนอกจากนี้ค่าแฟคเตอร์ทางเวลาของทั้งสองมาตรฐานเรียกแตกต่างกันมาตรฐาน IEC เรียกว่า ตัวคูณเวลา(Time multiplier setting) มีค่าระหว่าง 0.1-1.0 ส่วนทางด้านมาตรฐาน ANSI/IEEE เรียกว่า ไทม์ไดอัล (Time dial) มีค่าระหว่าง 0.5-1.0 ซึ่งทั้งสองค่ามีคุณสมบัติเหมือนกันหลักในการเลือกเส้นโค้งคือต้องครอบคลุมเส้นโค้งความเสียหายของหม้อแปลง (Transformer damage curve)ของหม้อแปลงที่ป้องกันนอกจากนั้นต้องจัดลำดับการทำงานกับรีเลย์กระแสเกินทั้งด้านบน(Up stream) และรีเลย์กระแสเกินด้านล่าง (Down stream)

ข) ฟังก์ชันกระแสเกินฉับพลัน ฟังก์ชันนี้ใช้ป้องกันการเกิดฟอลต์อย่างรุนแรงและจะต้องเซตติ้งให้สูงกว่ากระแสพุ่งเข้าและสภาวะโหลดฉุกเฉินและกรณีที่ติดตั้งด้านแรงสูงควรเป็นการป้องกันสำรองฟอลต์ทางด้านแรงต่ำ โดยปกติจะมีค่าเซตติงประมาณ 120-130 % ของกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน



รูปที่ 3.8 รีเลย์กระแสเกิน [19]

3.1.2.2 การเซตติ้งรีเลย์กระแสเกินที่เฟสแบบสแตติค

ความแตกต่างระหว่างรีเลย์กระแสเกินแบบอิเล็คโตรแมคานิคกับแบบสแตติคอย่างแรกคือเส้นโค้งเวลากับกระแส ซึ่งรีเลย์แบบสแตติคหนึ่งตัวมีหลายเส้นโค้งเวลากับกระแสแต่ยังมีเพียงมาตรฐานใดมาตรฐานหนึ่งขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิต ข้อดีคือสามารถประยุกต์ใช้งานเส้นโค้งอื่นๆได้โดยไม่ต้องซื้อรีเลย์ตัวใหม่ และความแตกต่างย่างที่สองคือการเลือกแท็ปกระแสและตัวคูณเวลาหรือไทม์ไดอัลมีการเปลี่ยนจากการขันสกรูเป็นแบบดิฟสวิทช์หรือสวิทช์ศูนย์กับหนึ่ง

ก) ฟังก์ชันกระแสเกิน-เวลา เริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่ากระแสโหลดที่พิกัดและเลือกค่าเซตติ้งประมาณ 110-300 % ต่อจากนั้นทำการเซตติ้งค่ากระแสเริ่มตอบสนองที่ดิฟ สวิทช์หรือสวิทช์ศูนย์กับหนึ่งโดยที่ $I_S = \sum \times I_n$ เมื่อ I_n คือกระแสโหลดที่พิกัดและ $\sum$ คือผลรวมของตัวคูณกระแสเช่นมีสวิทช์ 7 ตัวแต่ละตัวมีสองตำแหน่งคือศูนย์กับหนึ่ง ถ้าต้องการเซตติ้งที่ $I_S = 1.2 \times I_n$ เราจะเซตติงสวิทช์ดังแสดงในตารางที่14(ดูตามลูกศร) ต่อจากนั้นทำการเลือกเส้นโค้งเวลากับกระแส ซึ่งหม้อแปลงส่วนใหญ่จะเลือกเส้นโค้งเวลากับกระแสแบบอินเวอร์ไทม์ปกติโดยเลือกที่สวิทช์ศูนย์กับหนึ่งที่ด้านหน้าของรีเลย์เหมือนกับการเลือกค่ากระแสเริ่มตอบสนองซึ่ง

รีเลย์แบบสแตติคส่วนใหญ่จะมีเส้นโค้งเวลาให้เลือกประมาณ 7-8 เส้นโค้ง ดังนั้นสวิทช์ที่ใช้จึงมีสามหลักโดยอาศัยหลักการเลขฐานสอง เลือกตัวคูณเวลาหรือไทม์ไดอัล ในการเลือกค่านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณหาเวลาในการทริปเมื่อเกิดกระแสฟอลต์ไหลในวงจรรีเลย์ ที่ตัวคูณเวลาหรือไทม์ไดอัลค่าต่ำๆรีเลย์จะทำงานเร็วกว่าที่ค่าสูง

ข) ฟังก์ชันกระแสเกินฉับพลัน ทำการเซตติ้งค่าผ่านสวิทช์ศูนย์กับหนึ่งที่ด้านหน้ารีเลย์โดยที่ $I_{inst} = \sum \times I_S$ เมื่อ I_S คือผลรวมของตัวคูณกระแสเริ่มตอบสนองมีค่าให้เลือกตั้งแต่ $1 \times I_S$ จนถึง $31 \times I_S$ เป็นต้น

3.1.2.3 การเซตติ้งรีเลย์กระแสเกินที่เฟสแบบดิจิตอล

รีเลย์กระแสเกินแบบดิจิตอลมีฟังก์ชันการทำงานที่มากกว่ารีเลย์แบบสแตติคและแบบอิเล็คโตรแมคานิค โดยเฉพาะเส้นโค้งเวลากับกระแสมีให้เลือกทั้งสองมาตรฐานในตัวเดียว และตัวคูณเวลาหรือไทม์ไดอัลมีค่าที่ละเอียดมากขึ้น แต่ในการเซตติ้งยังคงใช้การคำนวณกระแสโหลดที่พิกัดและเลือกค่าเซตติ้งเหมือนรีเลย์แบบอื่น เพียงแต่ป้อนข้อมูลที่ด้านหน้าของตัวรีเลย์แทนการเลือกจากสวิทช์หรือขันสกรู ฟังก์ชันกระแสเกินแบบหน่วงเวลามีย่านเซตติ้งที่สูงและมีช่วงขั้นที่ละเอียดเช่น 0.05-20 I_n (ขั้นละ 0.01) สาเหตุที่รีเลย์แบบดิจิตอลเริ่มต้นตั้งแต่ 0.05 มีไว้สำหรับนำไปใช้ในเป็นรีเลย์กระแสเกินลงดิน ส่วนฟังก์ชันกระแสเกินฉับพลันมีย่านเซตติ้งตั้งแต่0.05-20I_n (ขั้นละ 0.01) และมีการหน่วงเวลาตั้งแต่ 0-60 วินาที มีไว้สำหรับกำหนดระยะเวลาของกระแสเกินทันทีทันใด

3.1.2.4 การเซตติ้งรีเลย์กระแสเกินลงดิน

รีเลย์กระแสเกินโดยทั่วไปสามารถใช้ป้องกันได้ทั้งที่เฟสและที่สายนิวตรอล แต่เมื่อนำมาใช้ป้องกันกระแสเกินลงดินจะมีย่านการเซตติ้งอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.05-0.8 I_n หรือบางบริษัทใช้ 0.05-0.8 I_S และขึ้นอยู่กับประเภทของรีเลย์ถ้าเป็นรีเลย์แบบอิเล็คโตรแมคานิคค่าเซตติ้งต่ำสุดจะได้แค่ 0.5 I_n ส่วนรีเลย์แบบสแตติคและแบบดิจิตอลค่าเซตติ้งต่ำสุดจะได้ถึง 0.05 I_n ทำให้สามารถตรวจจับกระแส ฟอลต์ที่ปริมาณต่ำๆได้ การเซตติ้งรีเลย์กระแสเกินลงดินแบ่งออกเป็นสองกรณีคือ

ก) กรณีที่จุดนิวตรอลต่อลงดินโดยตรง การเซตติ้งแบบนี้จะเลือกค่าเซตติ้งประมาณ 30 % ของกระแสโหลดที่พิกัด สำหรับเส้นโค้งเวลากับกระแสสามารถใช้ได้ทั้งแบบอินเวอร์สไทม์และแบบดิฟินิทไทม์

ข) กรณีที่จุดนิวตรอลต่อผ่านตัวต้านทานลงดิน ในการเซตติ้งจะพิจารณาที่ขนาดพิกัดกระแสและระยะเวลาที่สามารถทนกระแสได้สูงสุดของตัวต้านทาน ค่ากระแสเริ่มต้นทำงานสามารถเซตติ้งได้ต่ำถึง 5 % ของพิกัดกระแสตัวต้านทาน และการเลือกเส้นโค้งเวลากับกระแสจะต้องเลือกให้เส้นโค้งให้ตัดผ่านค่ากระแสฟอลต์ลงดินที่สูงเท่ากับพิกัดกระแสของตัวต้านทานโดยใช้เวลาต่ำกว่าเวลาสูงสุดของตัวต้านทาน

3.1.3 เพาเวอร์ฟิวส์ (Power Fuse)

ในการป้องกันหม้อแปลงขนาดเล็กที่มีพิกัดกำลังไม่เกิน 5 MVA โดยปกติจะใช้ฟิวส์ป้องกันกระแสเกินเพียงอย่างเดียวในกรณีหม้อแปลงในระบบจำหน่ายแรงต่ำ (11-33 kV/400-480 V) ที่ติดตั้งตามเสาไฟฟ้า หรือเราจะใช้ฟิวส์ทำงานร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับอาคารพาณิชย์และโรงงานขนาดเล็กที่มีระดับแรงดันต่ำ (11-33 kV/400-480 V) โดยทั้งสองกรณีนั้นจะใช้ฟิวส์ติดตั้งทางด้านแรงดันสูง (11-33 kV) วัตถุประสงค์หลักเพื่อป้องกันการเกิดฟอลต์มากกว่าที่จะใช้ป้องกันสภาวะโหลดเกินของหม้อแปลง และในการเลือกฟิวส์มีหลักการพิจารณาสามข้อได้แก่

ก) ค่าพิกัดแรงดันของฟิวส์ โดยที่ค่าพิกัดแรงดันของฟิวส์จะต้องสูงกว่าระดับแรงดันที่ใช้งานของหม้อแปลงประมาณ 15-20 % โดยพิจารณาที่แรงดันเฟสเทียบกับนิวตรอล

ข) ค่ากระแสที่จุดหลอมละลายต่ำสุดของฟิวส์ โดยที่ค่านี้จะต้องสูงกว่าค่ากระแสสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าของหม้อแปลงที่เวลา 0.1 วินาที ซึ่งหม้อแปลงที่ใช้ฟิวส์ป้องกันจะมีขนาดเล็กมีพิกัดกำลังไม่เกิน 5 MVA และมีค่ากระแสพุ่งเข้าประมาณ 10-12 เท่าของกระแสโหลด

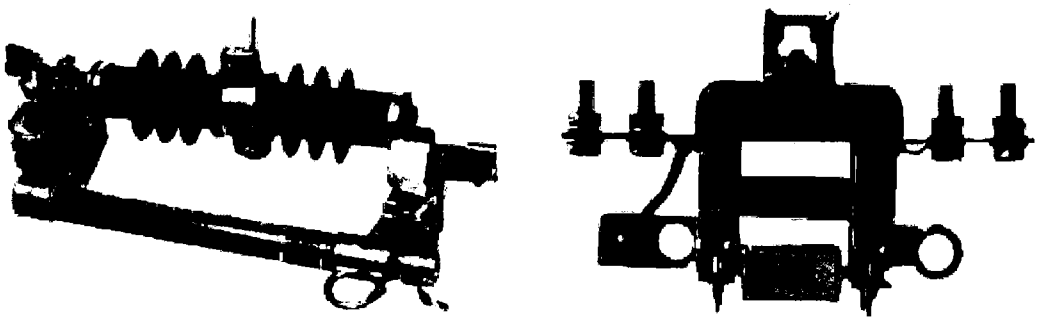
ค) ค่าพิกัดกระแสต่อเนื่องของฟิวส์จะเลือกให้สูงกว่ากระแสของหม้อแปลงประมาณ150-300% โดยคิดที่ค่ากระแสด้านแรงสูงดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางการเลือกพิกัดกระแสต่อเนื่องของฟิวส์

ขนาดพิกัดกำลังหม้อแปลง	พิกัดกระแสต่อเนื่องของฟิวส์
ต่ำกว่า 100 kVA	300 %
100-500 kVA	200-250 %
500-5000 kVA	150-200 %

ข้อดีของการใช้ฟิวส์คือประหยัดไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟเหมือนรีเลย์และสามารถป้องกันฟอลต์ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงทั้งทางด้านแรงสูงและแรงต่ำ

ข้อเสียคือไม่สามารถการป้องกันฟอลต์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงและมีกระแสฟอลต์ปริมาณน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่เป็นหม้อแปลงแบบเดลต้า-สตาร์ และที่จุดนิวตรอลทางด้านขดลวดสตาร์ต่อลงดินผ่านตัวต้านทาน นอกจากนี้ฟิวส์ทำหน้าที่หลักคือป้องกันการเกิดฟอลต์เพียงอย่างเดียวจึงไม่มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันสภาวะโหลดเกิน และเนื่องจากฟิวส์เป็นการป้องกันแยกอิสระแต่ละเฟสเมื่อเกิดฟิวส์ขาดเพียง 1 เฟสจะมีผลกระทบต่อโหลดสามเฟสเช่น มอเตอร์



(ก) ฟิวส์แรงสูง (ข) ฟิวส์แรงต่ำ

รูปที่ 3.9 ฟิวส์ [16]

3.1.4 กับดักเสิร์จ (Surge Protection)

ในการป้องกันหม้อแปลงตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่จะมีกับดักเสิร์จเป็นอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและเสิร์จต่างๆที่ทำให้เกิดภาวะแรงดันเกินชั่วขณะ หม้อแปลงขนาดเล็กที่ใช้ในเชิงพาณิชและโรงงานอุตสาหกรรม และหม้อแปลงในระบบจำหน่ายแรงต่ำ (11~33/380~480 V) จะติดตั้งกับดักเสิร์จด้านแรงสูง ส่วนหม้อแปลงที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าและในระบบส่งจะติดตั้งกับดักเสิร์จทั้งด้านแรงสูงและแรงต่ำ ในการพิจารณาว่ากับดักเสิร์จควรจะติดตั้งด้านใดบ้างนั้น จะพิจารณาว่าขั้วต่อสายของหม้อแปลงต่อกับสายตัวนำเคเบิ้ลหรือไม่ การที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆผ่านสายเคเบิ้ลที่เปิดโล่งทำให้มีโอกาสที่จะได้รับผลกระทบจากฟ้าผ่า ในกรณีที่ตัวหม้อแปลงและอุปกรณ์ที่ต่อกับหม้อแปลงอยู่ภายในอาคารอาจจะไม่จำเป็นต้องติดตั้งกับดักเสิร์จนอกจากนี้สำหรับหม้อแปลงที่สำคัญจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบอื่นๆเช่น ฟอลต์ที่ทำให้เกิดภาวะแรงดันเกินชั่วครู่และการเปิดปิดสวิทช์ที่ทำให้เกิดสวิทชิ่งเสิร์จ

กับดักเสิร์จจะต้องมีการดิสชาร์จที่เพียงพอในกรณีที่มีเสิร์จต่างๆเกิดขึ้นและไหลเข้าสู่หม้อแปลง โดยจะต้องลดระดับแรงดันเสิร์จต่ำกว่าระดับฉนวนของหม้อแปลงซึ่งเป็นการช่วยยืดอายุการใช้งานของฉนวนหม้อแปลง ในการเลือกใช้งานกับดักเสิร์จจะต้องพิจารณาดังนี้

ก) พิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จโดยปกติพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จจะต้องเท่ากับหรือสูงกว่าแรงดันของระบบที่หม้อแปลงต่ออยู่และขึ้นอยู่กับระบบต่อลงดินเช่น แรงดันระบบระหว่างเฟสเท่ากับ 2.4 kV แรงดันของกับดักเสิร์จกรณีที่ระบบต่อลงดินเท่ากับ 2.7 kV และกรณีที่ระบบไม่ต่อลงดินหรือต่อผ่านอิมพีแดนซ์ค่าสูงจะเท่ากับ 3.0 kV

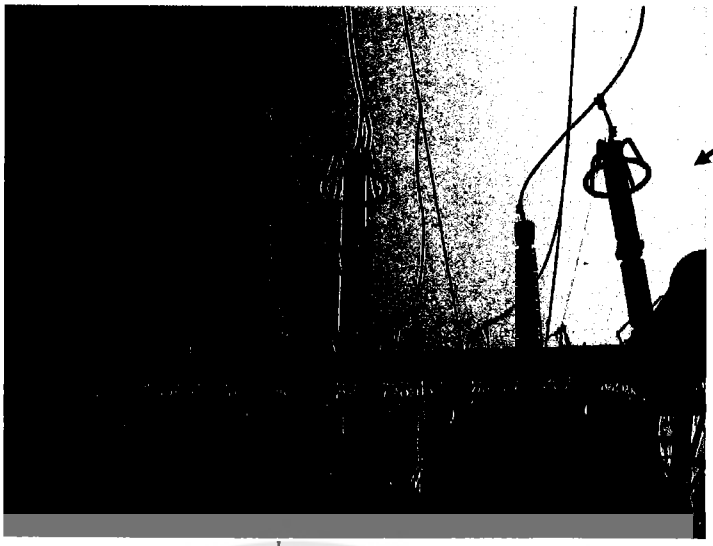
ข) แรงดันเกินชั่วครู่ ซึ่งอาจจะเกิดจากการลัดวงจร 1 เฟสลงดิน การปลดโหลดและ ปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ โดยที่ความสามารถในการทนต่อแรงดันเกินชั่วครู่ของกับดักเสิร์จจะต้องเท่ากับหรือสูงกว่าค่าแรงดันเกินชั่วครู่ที่จะเกิดขึ้นกับระบบที่ใช้งาน ซึ่งค่าแรงดันเกินชั่วครู่ของระบบที่ใช้งานอาจจะได้จากการคำนวณหรือจากโปรแกรมศึกษาสภาวะชั่วขณะของระบบ ซึ่งปกติ

จะพิจารณาที่ค่าต่ำสุดได้แก่ ค่าแรงดันเกินชั่วครู่ที่เกิดจากการลัดวงจร 1 เฟส ลงดิน และเราจะใช้มาตรฐาน ANSI C62.22 ได้แนะนำการหาขนาดของค่าแรงดันเกินชั่วครู่ที่เกิดจากการลัดวงจร 1 เฟสลงดิน และค่าแรงดันเกินชั่วครู่ของกับดักเสิร์จจะอยู่ในช่วงระหว่าง 1.27~1.75 pu ของพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่เกิดแรงดันเกินชั่วขณะมีช่วงระหว่าง 0.02~10,000 วินาที เช่น เมื่อเกิดแรงดันเกินชั่วครู่เท่ากับ 1.75 pu กับดักเสิร์จสามารถทนได้ 0.02 วินาที

ค) สวิทชิ่งเสิร์จ อาจจะในระบบจำหน่ายและระบบส่งของการไฟฟ้าได้เสมอสาเหตุมาจากการเปิดปิดสวิทช์และการใช้งานคาปาซิเตอร์แบงค์ซึ่งถือว่าเป็นเรื่องปกติ ในการพิจารณาสวิทชิ่งเสิร์จเกี่ยวกับกับดักเสิร์จนั้นจะพิจารณาถึงระดับแรงดันสูงสุดของสวิทชิ่งเสิร์จกับดักเสิร์จทนได้ซึ่งปกติจะสูงกว่าค่าพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จประมาณ 2 เท่า นอกจากนี้ยังพิจารณาพลังงานที่ดิสชาร์จผ่านกับดักเสิร์จโดยปกติกับดักเสิร์จจะระบุขีดความสามารถทางด้านพลังงานมาในรูปกระแสสูงสุดและพลังงานกิโลจูนต่อกิโลโวลต์เช่น กับดักเสิร์จที่มีพิกัดแรงดันในช่วง 3~36 kV จะมีพิกัดกระแสสูงสุด 300 A และ 1.4 kJ/kV ของพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จ

ง) อัตราส่วนการป้องกัน ในการเลือกกับดักเสิร์จจะต้องพิจารณาอัตราส่วนการป้องกันระหว่างระดับฉนวนหม้อแปลงกับระดับการป้องกันของกับดักเสิร์จวัตถุประสงค์เพื่อจัดลำดับการป้องกันฉนวน(Insulation Coordination)ของหม้อแปลง ซึ่งระดับการป้องกันของกับดักเสิร์จจะต้องต่ำกว่าระดับฉนวนของหม้อแปลง ปกติในการทดสอบหม้อแปลงจะทำการทดสอบฉนวนหม้อแปลงสามแบบคือ การทดสอบสวิทชิ่งเสิร์จ การทดสอบเต็มรูปคลื่น (Full wave) และการทดสอบรูปคลื่นสับ (Chopped wave) โดยนำค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งสามมาหาอัตราส่วนการป้องกัน ตามมาตรฐานANSI C62.22 ได้กำหนดอัตราส่วนการป้องกันจะต้องเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่กำหนดดังนี้

- Switching surge withstand / Switching surge protective level ≥ 1.15
- Full wave withstand (BIL) / Impulse protective level ≥ 1.20
- Chopped wave withstand / Front of wave protective level ≥ 1.25



รูปที่ 3.10 กับดักเสิร์จ

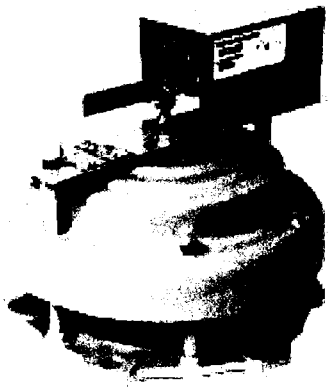
3.2 การป้องกันทางกล (Mechanical Protection)

3.2.1 อุปกรณ์ปล่อยความดัน (Pressure Relief Device)

คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ลดความดันภายในตัวถังหม้อแปลงที่มีสาเหตุมาจากการขยายตัวของน้ำมันและจากการเกิดฟอลต์ภายในที่ทำให้เกิดความดันสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว อุปกรณ์ปล่อยความดันที่ใช้กันทั่วไปนั้นใช้ตั้งแต่หม้อแปลงในระบบจำหน่ายขนาดเล็กไม่เกิน 500 kVA ไปจนถึงหม้อแปลงในระบบส่งและระบบผลิตขนาดใหญ่ มีค่าเซตติ้งความดันเริ่มต้นตั้งแต่ 0.28-0.85 bar หรือ 4-12 psi หม้อแปลงขนาดเล็กจะใช้ค่าเซตติ้งความดันที่ประมาณ 0.28-0.35 bar โดยที่วาล์วปล่อยความดันจะเปิดสุดภายใน 0.002 วินาที ซึ่งเร็วมากกว่ารีเลย์ป้องกันทางไฟฟ้า ทุกค่าเซตติ้งความดันตั้งแต่ 0.28-0.85 bar สามารถทำงานได้ภายในเวลา 0.002 วินาที โดยการเซตติ้งค่าแรงสปริง ในกรณีที่ใช้วาล์วปล่อยความดันเพียงอย่างเดียวจะใช้กับหม้อแปลงในระบบจำหน่ายแรงต่ำที่ติดตั้งตามเสาไฟฟ้า ส่วนหม้อแปลงที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้าย่อยตั้งแต่ 2500 kVA ขึ้นไปจะใช้วาล์วปล่อยความดันร่วมกับหน้าสัมผัสของสัญญาณเตือนทางไฟฟ้าภาพของอุปกรณ์ปล่อยความดันแสดงในรูปที่ 3.11

ข้อดีคือเป็นการป้องกันตัวถังหม้อแปลงไม่ให้เสียหายจากการเพิ่มขึ้นของความดันเนื่องจากการขยายตัวของน้ำมันในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดสูงๆ และจากการลัดวงจรภายในที่ทำให้เกิดก๊าซและเพิ่มความดันภายในตัวถัง

ข้อเสียคือถ้าเกิดการลัดวงจรภายในที่รุนแรงซึ่งค่ากระแสลัดวงจรมีค่าสูงมากๆ เกินกว่าค่ากระแสลัดวงจรสามเฟส การระบายความดันออกนอกตัวถังอาจจะไม่เพียงพอต่อความดันที่เกิดขึ้นภายในตัวถัง ถึงแม้ว่าวาล์วปล่อยความดันสามารถเปิดได้รวดเร็วใช้เวลาเพียง 0.002 วินาทีก็ตาม อาจจะเกิดปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดการระเบิดได้



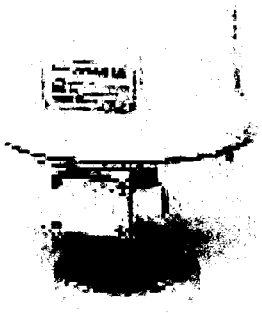
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ปล่อยความดัน (Pressure Relief Device) [17]

3.2.2 รีเลย์ความดันทันทีทันใด (Sudden Pressure Relay)

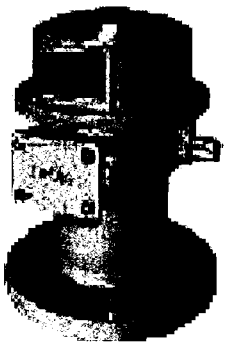
รีเลย์ชนิดนี้ใช้กับหม้อแปลงฉนวนน้ำมันแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ รีเลย์ความดันก๊าชทันทีทันใด (Sudden Gas Pressure Relay) ติดตั้งด้านบนของตัวถังเหนือระดับน้ำมัน และรีเลย์ความดันน้ำมันทันทีทันใด (Sudden Oil Pressure Relay) ติดตั้งด้านล่างของตัวถังหม้อแปลง รีเลย์ทั้งสองชนิดใช้ได้กับหม้อแปลงฉนวนน้ำมันทุกชนิด ค่าเซตติ้งอยู่ที่ประมาณ 0.6 $kg/cm^2/sec.$ และหน้าสัมผัสทำงานภายในเวลา 0.31-0.54 วินาที และนิยมใช้กับหม้อแปลงขนาดตั้งแต่ 2500 kVA ขึ้นไปแต่ถ้าเป็นหม้อแปลงแบบที่มีถังคอนเซอร์เวเตอร์รีเลย์ความดันทันทีทันใดจะไม่ใช้เพราะว่าใช้บุคโฮลซ์รีเลย์ทำงานแทนได้ ภาพของรีเลย์ความดันทันทีทันใดแสดงในรูปที่ 3.10

ข้อดีของรีเลย์ทั้งสองคือสามารถตรวจจับฟอลต์บางประเภทที่รีเลย์วัดค่าผลต่างและรีเลย์กระแสเกินตรวจจับไม่ได้เช่น ฟอลต์ระหว่างขดลวด ซึ่งรีเลย์วัดค่าผลต่างและรีเลย์กระแสเกินจะตรวจจับได้ในกรณีที่เกิดฟอลต์ภายนอกตัวถังหรือฟอลต์ภายในตัวถังที่ลัดวงจรลงดิน

ข้อเสียของรีเลย์ความดันทันทีทันใดคืออาจจะทำงานผิดพลาดในพื้นที่ๆมีแผ่นดินไหวดังนั้นหน้าสัมผัสสัญญาณทางไฟฟ้าจึงใช้เป็นสัญญาณเตือนมากกว่าเป็นการทริปหม้อแปลง



รีเลย์ความดันก๊าชทันทีทันใด
(Sudden Gas Pressure Relay)



รีเลย์ความดันน้ำมันทันทีทันใด
(Sudden Oil Pressure Relay)

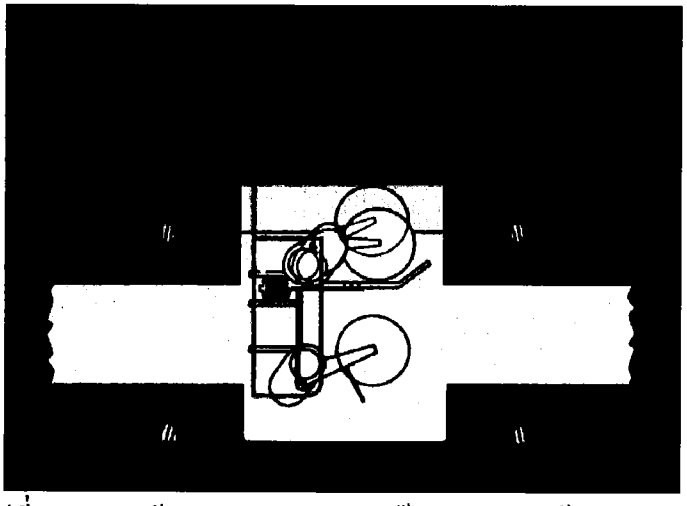
รูปที่ 3.12 รีเลย์ความดันทันทีทันใด (Sudden Pressure Relay) [13]

3.2.3 บุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz Relay)

เป็นอุปกรณ์ป้องกันความดันสูงเกินทันทีทันใดและป้องกันการสะสมของปริมาณก๊าชภายในตัวถังหม้อแปลง บุคโฮลซ์รีเลย์ใช้กับหม้อแปลงฉนวนน้ำมันที่มีถังงคอนเซอร์เวเตอร์โดยในกรณีเกิดก๊าชสะสมภายในตัวบุคโฮลซ์รีเลย์ ค่าเซตติ้งประมาณ 100-400 ลูกบาศเมตร และกรณีเกิดความดันสูงเกินทันทีทันใด ค่าเซตติ้งประมาณ 0.65-1.5 เมตรต่อวินาที ตัวบุคโฮลซ์รีเลย์ใช้กับหม้อแปลงตั้งแต่ขนาด 1000 kVA ขึ้นไป ลักษณะของบุคโฮลซ์รีเลย์แสดงในรูปที่ 3.13

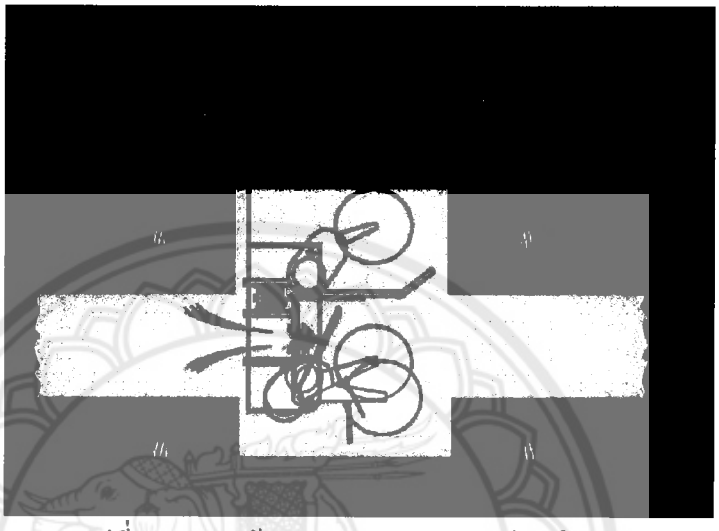
รูปที่ 3.13 บุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz Relay) [18]

การทำงานของบุคโฮลซ์รีเลย์แบ่งออกเป็นสามลักษณะได้แก่ การป้องกันการสะสมของก๊าชในตัวถังหม้อแปลง การป้องกันความดันสูงทันทีทันใด และการป้องกันตัวถังหม้อแปลงรั่ว ในกรณีที่เกิดลัดวงจรระหว่างขดลวดที่มีค่ากระแสลัดวงจรต่ำหรือเกิดการดิสชาร์จบางส่วนทำให้เกิดก๊าซภายในฉนวนน้ำมัน ซึ่งก๊าชนี้จะลอยตัวสู่ด้านบนและไปสะสมที่ตัวบุคโฮลซ์รีเลย์และเมื่อเกิดขึ้นหลายครั้งปริมาณก๊าชที่สะสมมีมากจนทำให้ลูกลอยด้านบนภายในตัวบุคโฮลซ์เลื่อนต่ำลงไปกดแผ่นหน้าสัมผัสและส่งสัญญาณเตือนไปยังห้องควบคุม การทำงานของการสะสมก๊าชแสดงในรูปที่ 3.14



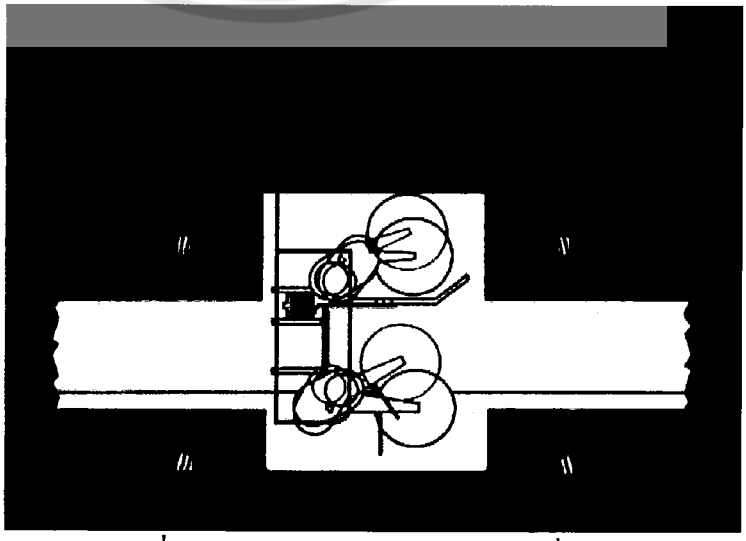
รูปที่ 3.14 การป้องกันการสะสมของก๊าชในตัวถังหม้อแปลง [13]

ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรภายในตัวถังหม้อแปลงอย่างรุนแรงทำให้เกิดการอาร์คและทำให้ความดันของน้ำมันสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและพุ่งขึ้นสู่ถังคอนเซอเวเตอร์ ซึ่งน้ำมันที่มีความดันสูงจะต้องไหลผ่านตัวบุคโฮลย์รีเลย์ไปชนแผ่นหน้าสัมผัสและกดลูกลอยด้านล่าง และส่งสัญญาณทริปไปยังห้องควบคุมเพื่อสั่งปลดเซอร์กิตเบรคเกอร์ทำให้หม้อแปลงออกจากระบบไฟฟ้า ภาพการทำงานแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การป้องกันความดันสูงทันทีทันใด [13]

ในกรณีที่เกิดการรั่วของตัวถังหม้อแปลงนั้นซึ่งปกติระดับน้ำมันจะสูงเกินตัวถังหลักของหม้อแปลงโดยระดับน้ำมันสูงสุดจะอยู่ในถังคอนเซอเวเตอร์และตัวบุคโฮลซ์ติดตั้งระหว่างตัวถังทั้งสอง เมื่อเกิดการรั่วที่ตัวถังหลักระดับน้ำมันลดต่ำลงทำให้ลูกลอยด้านล่างเคลื่อนที่ต่ำลงและส่งสัญญาณทริปไปยังห้องควบคุมเพื่อสั่งปลดเซอร์กิตเบรคเกอร์ทำให้หม้อแปลงออกจากระบบไฟฟ้า โดยภาพการทำงานแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การป้องกันตัวถังหม้อแปลงรั่ว [13]

การเลือกใช้งานบุคโฮลซ์รีเลย์สามารถแบ่งออกเป็นสามระดับพิกัดกำลังของหม้อแปลงดังแสดงดังตารางที่ 3.3 หม้อแปลงที่มีพิกัดตั้งแต่ 1,000 ~ 5,000 kVA จะใช้บุคโฮลซ์รีเลย์ค่าเซตติ้งสำหรับทริปประมาณ 0.65 m/s และสำหรับสัญญาณเตือนประมาณ100 ~ 150 CC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเท่ากับ 25 mm นอกจากนี้ยังสามารถเลือกตัวบุคโฮลซ์ได้จากน้ำหนักของฉนวนน้ำมัน ในส่วนของหม้อแปลงที่มีพิกัดตั้งแต่ 10,000 kVA ขึ้นไปขนาดของท่อจะมีสองขนาดคือ 80 mm และ 100 mm หม้อแปลงที่มีน้ำหนักของฉนวนน้ำมันเกิน 35,000 kg จะใช้ขนาดท่อเท่ากับ 100 mm

ตารางที่ 3.3 ตารางการเลือกใช้งานบุคโฮลซ์รีเลย์

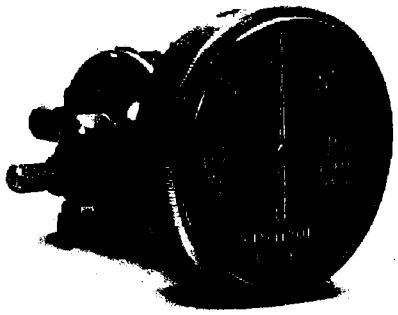
พิกัดกำลังหม้อแปลง (kVA)	ขนาดท่อ	ค่าเซตติ้งทริป (Oil Surge)	ค่าเซตติ้งสัญญาณเตือน (Gas Accumulation)	น้ำหนักของน้ำมัน (kg)
1,000-5,000	25 mm	0.65 m/s	100 ~ 150 CC	800-1,600
5,001-10,000	50 mm	1.00 m/s	200 CC	1,600-10,000
>10,000	80 mm	1.50 m/s	200 ~ 250 CC	10,000-35,000
	100 mm	1.50 m/s	350 ~ 400 CC	>35,000

3.2.4 อุปกรณ์ระบายความดันและวัดความดัน (Pressure Vacuum Bleeder and Indicator)

อุปกรณ์ระบายความดันตัวนี้ใช้ป้องกันหม้อแปลงจากการเพิ่มอย่างช้าๆของความดัน ทั้งความดันบวก(Pressure) และความดันลบ (Vacuum) โดยจะมีใบมีดเจาะแผ่นระบายความดันเพื่อให้อากาศจากภายนอกเข้ามาในตัวถังซึ่งเมื่อความดันเป็นลบเกิน -6.5 psi หรือเกิดความดันเป็นบวกเกิน +6.5 psi ใบมีดจะเจาะระบายความดันภายในออกสู่อากาศภายนอก อุปกรณ์นี้ช่วยรักษาระดับความดันของหม้อแปลงและตัววัดความดันที่มีค่าเซตติ้งในการสั่งทริปที่ประมาณความดันเป็นลบเกิน –8.5 psi หรือเกิดความดันเป็นบวกเกิน +8.5 psi ซึ่งค่าเซตติ้งนี้เป็นค่าเซตติ้งตัวอย่าง ซึ่งในการเซตติ้งนั้นต้องขึ้นอยู่กับขนาดและโครงสร้างตัวถังของหม้อแปลงแต่ละตัว ใช้กับหม้อแปลงแบบระบบปิดที่ไม่ใช่แบบคอนเซอร์เวเตอร์และใช้กับหม้อแปลงตั้งแต่ขนาด 2500 kVA ขึ้นไปดังแสดงในรูปที่ 3.17

ข้อดีคือสามารถป้องกันการเสียรูปทรงของตัวถังนอกจากนี้ตัววัดความดันสามารถส่งสัญญาณ Alarm และ Trip

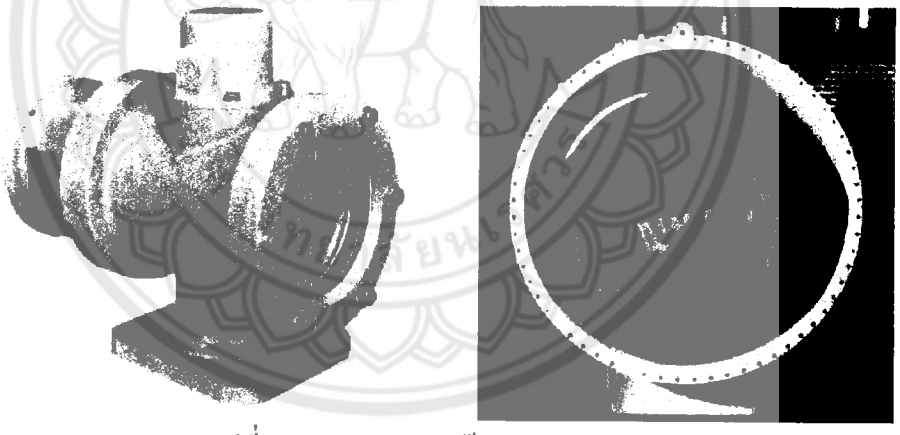
ข้อเสียคือเมื่อใบมีดกรีดแผ่นไดอะแฟรมแล้วอากาศภายนอกจะสัมผัสฉนวนเหลวภายในตัวถังทำให้ฉนวนเหลวจะเสื่อมสภาพเร็วขึ้น



รูปที่ 3.17 อุปกรณ์ระบายความดันและวัดความดัน [13]

3.2.5 ตัวตรวจจับก๊าซ (Gas Detector)

ทำหน้าที่ตรวจจับความผิดปกติหรือความเสียหายของถุงยาง (Rubber Bag or Rubber Cell) ในถังคอนเซอร์เวเตอร์ เมื่อเกิดถุงยางมีรอยรั่วอากาศภายในถุงยางจะเข้าไปปนกับน้ำมันในถังคอนเซอร์เวเตอร์และลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนไปสะสมในตัวตรวจจับก๊าซโดยปกติส่วนมากจะเซตติ้งที่ประมาณ 450 ซีซี ซึ่งเป็นระดับสะสมก๊าซในตัวตรวจจับหลังจากนั้นจะส่งสัญญาณไปยังแผงควบคุมเมื่อผู้ปฏิบัติงานรับทราบแล้วก็จะทำการซ่อมถุงยาง ภาพของตัวตรวจจับก๊าซแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ตัวตรวจจับก๊าซและถุงยาง [13]

3.2.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิขดลวดและน้ำมัน (Coils and oil Device Temperature)

ในการป้องกันความร้อนเกินจะต้องทำการตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำมันและขดลวดของหม้อแปลง เนื่องจากอุณหภูมิของทั้งสองสิ่งดังกล่าวจะสะท้อนถึงการรับโหลดของหม้อแปลง จึงทำให้สามารถตรวจสอบได้ว่าหม้อแปลงจ่ายโหลดเกินพิกัดกำลังหรือไม่ ซึ่งการตรวจวัดอุณหภูมินั้นจะต้องใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความร้อนต่อไปนี้

ก) เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิน้ำมันประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิน้ำมันลักษณะเหมือนกับกะเปาะ ติดตั้งไว้บนสุดของถังหม้อแปลง โดยให้กระเปาะจุ่มลงไปในถังหม้อแปลงเพื่อ

ตรวจอุณหภูมิส่วนบนแล้วต่อสัญญาณแสดงผลของอุณหภูมิที่เทอร์โมมิเตอร์ที่ติดด้านข้างถังหม้อแปลงและที่ตัวเทอร์โมมิเตอร์จะมีเข็มชี้เพื่อบอกอุณหภูมิของมันส่วนบนจำนวน 2 เข็ม โดยเข็มอันหนึ่งจะชี้ค้างเพื่อบอกอุณหภูมิสูงสุดของน้ำมันส่วนบนที่ผ่านมานอกจากนี้ตัวเทอร์โมมิเตอร์ยังมีหน้าสัมผัสอีก 4 ชุด ดังนี้

ชุดที่ 1 ควบคุมการทำงานของพัดลมรายความร้อนชุดที่ 1 ของหม้อแปลง

ชุดที่ 2 ควบคุมการทำงานของพัดลมระบายความร้อนชุดที่ 2 ของหม้อแปลง

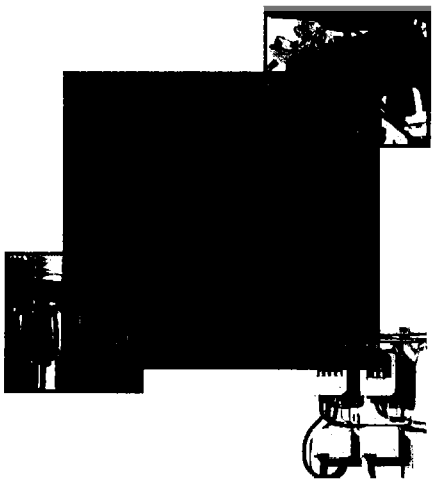
ชุดที่ 3 ใช้สำหรับส่งสัญญาณเตือนเพื่อบอกว่าอุณหภูมิของน้ำมันส่วนบนมีค่าสูงถึงระดับที่ได้ตั้งไว้แล้วให้ปลดโหลดบางส่วนออก

ชุดที่ 4 สั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดหม้อแปลงออกจากระบบในกรณีที่อุณหภูมิน้ำมันส่วนบนมีค่าสูงเกินระดับที่ได้ตั้งเอาไว้

ข) เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิขดลวด จะแตกต่างไปจากแบบแรก เนื่องจากไม่สามารถจะวัดได้โดยตรงดังนั้นจึงต้องออกแบบทางอ้อมโดยวัดกระแสเข้าหม้อแปลงทางขดลวดแรงสูงแล้วมาปรับเทียบให้เป็นอุณหภูมิ

กระแสที่หม้อแปลงจ่ายให้กับโหลดจะมีความสัมพันธ์กับกระแสที่หม้อแปลงการแสจ่ายให้ขดลวดความร้อนในเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิขดลวดและความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายโอนไปยังกระเปาะ ซึ่งภายในกระเปาะจะมีท่อเล็กๆ ที่มีของเหลว ภายในท่อนี้จะขยายหรือหดตัวเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิที่กระเปาะได้รับ และเมื่อต่อท่อนี้เข้ากับหน้าปัดที่มีเข็มชี้แสดงอุณหภูมิก็จะทำให้เราสามารถทราบค่าอุณหภูมิขดลวดของหม้อแลงได้ สำหรับเข็มชี้บอกอุณหภูมิจำนวน 2 เข็ม และชุดหน้าสัมผัสจำนวน 4 ชุดของเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิที่มีหน้าที่การทำงานเหมือนกับเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิน้ำมัน

เมื่อเปรียบเทียบการป้องกันความร้อนเกินแล้ว พบว่า การตรวจวัดอุณหภูมิจากขดลวดหม้อแปลงจะดีกว่าเพราะเป็นผลมาจากการวัดกระแสโหลดที่ไหลผ่านขดลวดจริง



รูปที่ 3.19 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิขดลวดและน้ำมันในหม้อแปลง [13]

3.3 คำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ป้องกัน และ การใช้งานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลสามารถสรุปการป้องกันหม้อแปลงแบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆได้แก่ การป้องกันทางไฟฟ้า และการป้องกันทางกล โดยแบ่งตามขนาดพิกัดของหม้อแปลงดังนี้

- หม้อแปลงขนาดพิกัดตั้งแต่ 1- 5,000 kVA

ซึ่งหม้อแปลงพิกัดกำลังในช่วงนี้เราจะเห็นได้ตามเสาไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายแรงต่ำ (11-33 kV/400-480 V) หรือติดตั้งภายนอกอาคารใช้เป็นหม้อแปลงหลัก (Main transformer)

ตารางที่ 3.4 ตารางการป้องกันหม้อแปลงขนาดตั้งแต่ 1 ~ 5,000 kVA

อุปกรณ์ป้องกัน	กับดักเสิร์จ	ฟิวส์	รีเลย์กระแสเกิน	รีเลย์ผลต่าง	อุปกรณ์ป้องกันทางความร้อน
บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ป้องกัน (แนะนำ)	ใช้	ใช้ร่วมกับรีเลย์กระแสเกิน	ใช้หรือร่วมกับฟิวส์	ใช้ (ตั้งแต่ 2000 kVA)	ใช้
การใช้งานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ(EGAT)	ใช้	ใช้ร่วมกับรีเลย์กระแสเกินในสถานีไฟฟ้า	ใช้ (ในโรงไฟฟ้า)	ไม่ใช้	ใช้

- หม้อแปลงขนาดมากกว่า 5,000 ~ แต่ไม่เกิน 10 MVA

ซึ่งหม้อแปลงพิกัดกำลังในช่วงนี้เราจะเห็นได้ในอาคารพาณิชขนาดใหญ่ โรงงานอุตสาหกรรมรวมถึงสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง(11-33 kV/ (69-230 kV)

ตารางที่ 3.5 ตารางการป้องกันหม้อแปลงขนาดมากกว่า 5,000 ~ แต่ไม่เกิน 10MVA

อุปกรณ์ป้องกัน	กับดักเสิร์จ	ฟิวส์	รีเลย์กระแสเกิน	รีเลย์ผลต่าง	อุปกรณ์ป้องกันทางความร้อน
บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ป้องกัน (แนะนำ)	ใช้	ใช้ร่วมกับรีเลย์กระแสเกิน	ใช้อย่างเดียวหรือใช้ร่วมกับฟิวส์	ใช้ (ตั้งแต่2000 kVA)	ใช้
การใช้งานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ(EGAT)	ใช้	ไม่ใช้	ใช้	ไม่ใช้	ใช้

-หม้อแปลงขนาดตั้งแต่ 10 MVA ขึ้นไป

ซึ่งหม้อแปลงพิกัดกำลังในช่วงนี้เราจะเห็นได้ในสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง(11-33 kV/ 69-230 kV) หรือสถานีไฟฟ้าของกฟผ.ในระบบส่ง (69-500 kV) และในระบบผลิตหรือในโรงไฟฟ้า

ตารางที่ 3.6 ตารางการป้องกันหม้อแปลงขนาดตั้งแต่ 10 MVA ขึ้นไป

อุปกรณ์ป้องกัน	กับดักเสิร์จ	ฟิวส์	รีเลย์กระแสเกิน	รีเลย์ผลต่าง	อุปกรณ์ป้องกันทางความร้อน
บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ป้องกัน (แนะนำ)	ใช้	ไม่ใช้	ใช้	ใช้	ใช้
การใช้งานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ (EGAT)	ใช้	ไม่ใช้	ใช้	ใช้	ใช้

ตารางที่ 3.7 ตารางการป้องกันความดันหม้อแปลงขนาดตั้งแต่ 10 MVA ขึ้นไป

อุปกรณ์ป้องกัน	Pressure Relief	Press-Vacuum Bleeder Indicator	Sudden Gas/Oil Pressure Relay	Buchholz Relay	Gas Detector
บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ป้องกัน (แนะนำ)	ใช้ ตั้งแต่ 2500 kVA	ใช้ ตั้งแต่ 2500 kVA	ใช้ ตั้งแต่ 2500 kVA	ใช้ ตั้งแต่ 1 MVA	ใช้ ตั้งแต่ 10 MVA
การใช้งานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ(EGAT)	ใช้ ตั้งแต่ 2500 kVA	ใช้ ตั้งแต่ 2500 kVA	ใช้ ตั้งแต่ 2500 kVA	ใช้ ตั้งแต่ 1 MVA	ใช้ ตั้งแต่ 10 MVA

บทที่ 4
วิเคราะห์ผล

4.1 วิเคราะห์อุปกรณ์ป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้า

จากการศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า และได้เข้าไปในสถานที่ปฏิบัติการจริงเพื่อสอบถามข้อมูลเกี่ยวกับการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถวิเคราะห์หาความเหมาะสมของอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย และหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้ ดังนี้

4.1.1 อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย

หม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายโดยทั่วไปแล้วมีพิกัดกำลังตั้งแต่ 1 kVA~ไม่เกิน1 MVA ซึ่งหม้อแปลงพิกัดกำลังในช่วงนี้เราจะเห็นได้ตามเสาไฟฟ้าที่ในระบบจำหน่ายแรงต่ำ (11-33 kV/ 400-480 V)

ตารางที่ 4.1 วิเคราะห์อุปกรณ์ป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย

อุปกรณ์ป้องกัน	ใช้/ไม่ใช้	เหตุผล
รีเลย์ผลต่าง	ไม่ใช้	เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายมีภาวะของโหลดที่ไม่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โอกาสที่ฉนวนจะเกิดการเสียหายอันเนื่องจากการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลงมีน้อยมาก ดังนั้นอุปกรณ์ตัวนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องติดตั้งกับหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย
รีเลย์กระแสเกิน	ไม่ใช้	เนื่องจากรีเลย์กระแสเกินมีราคาสูงกว่าฟิวส์มาก และฟิวส์ก็สามารถทำงานแทนรีเลย์กระแสเกินได้ จึงได้เลือกฟิวส์ให้ทำงานแทนเพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย
ฟิวส์	ใช้	คำนึงถึงราคาที่ประหยัดเมื่อเทียบกับรีเลย์กระแสเกิน ส่วนมากมักติดตั้งฟิวส์ทางด้านแรงสูงและแรงต่ำ เพื่อป้องกันการเกิดฟอลต์จากภายนอก
กับดักเสิร์จ	ใช้	การที่ตัวหม้อแปลงต่อร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆผ่านสายเคเบิ้ลที่เปิดโล่งทำให้มีโอกาสที่จะได้รับผลกระทบจากฟ้าผ่าได้ ดังนั้นจึงต้องมีกับดักเสิร์จเพื่อป้องกันฟ้าผ่าและเสิร์จต่างๆที่จะทำให้เกิดภาวะแรงดันชั่วขณะ

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) วิเคราะห์อุปกรณ์ป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย

อุปกรณ์ป้องกัน	ใช้/ไม่ใช้	เหตุผล
อุปกรณ์ปล่อยความดัน	ใช้	ในขณะที่มีการจ่ายโหลดสูงๆของหม้อแปลง น้ำมันในหม้อแปลงจะเกิดการขยายตัวอันเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้ภายในหม้อแปลงมีความดันเพิ่มขึ้น เพื่อป้องกันไม่ให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายจึงต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ระบายความดัน (ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายที่มีขนาด 500 kVA ขึ้นไป)
รีเลย์ความดันทันทีทันใด	ไม่ใช้	เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายมีพิกัดกระแสที่ไม่สูงมากนัก หากเกิดฟอลต์ขึ้นภายในตัวถังหม้อแปลงแล้วนั้นความดันที่เกิดขึ้นจะมีค่าไม่มาก ซึ่งอุปกรณ์ปล่อยความดันสามารถทำงานทดแทนได้
บุคโฮลซ์รีเลย์	ไม่ใช้	เนื่องหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายไม่มีถังคอนเซอร์เวเตอร์ ดังนั้นจึงไม่สามารถติดตั้งบุคโฮลซ์รีเลย์ได้
อุปกรณ์ระบายความดันและวัดความดัน	ไม่ใช้	หากติดตั้งอุปกรณ์ปล่อยความดันแล้วไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ระบายความดันและวัดความดัน เพราะมีลักษณะการทำงานที่คล้ายกัน และที่สำคัญคือเพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย
ตัวตรวจจับก๊าซ	ไม่ใช้	เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายไม่มีถังคอนเซอร์เวเตอร์ ดังนั้นจึงไม่มีถุงยางในถังคอนเซอร์เวเตอร์ให้ป้องกัน
อุปกรณ์ป้องกันทางความร้อน	ใช้	เนื่องจากอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันจะสะท้อนถึงการจ่ายโหลดของหม้อแปลง ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้มีความสำคัญมาก หากความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงมีค่ามากเกินไปอาจจะทำให้ฉนวนและอุปกรณ์ต่างๆภายในหม้อแปลงเสื่อมสภาพเร็วขึ้นได้ (อุปกรณ์วัดอุณหภูมิใช้กับหม้อแปลงขนาด 50 kVA ขึ้นไป , อุปกรณ์วัดอุณหภูมิขดลวดใช้กับหม้อแปลงขนาด 500 kVA ขึ้นไป)

4.1.2 อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปแล้วมีพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 1 MVA ขึ้นไป ซึ่งหม้อแปลงพิกัดกำลังในช่วงนี้ เราจะเห็นได้ในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ระดับแรงดันปานกลาง (11-33 kV / 69-230 kV) หรือสถานีไฟฟ้าของ กฟผ.ในระบบส่ง (69-500 kV) และในระบบผลิตหรือในโรงไฟฟ้า

ตารางที่ 4.2 วิเคราะห์อุปกรณ์ป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

อุปกรณ์ป้องกัน	ใช้/ไม่ใช้	เหตุผล
รีเลย์ผลต่าง	ใช้	ที่ไม่ใช้รีเลย์กระแสเกินอย่างเดียวนั้น เพราะรีเลย์กระแสเกินป้องกันได้เฉพาะสภาวะโหลดเกิน และฟอลต์ที่เกิดขึ้นจากภายนอก หากเกิดการลัดวงจรขึ้นภายในหม้อแปลง รีเลย์กระแสเกินจะตรวจจับได้ไม่ดีเท่ารีเลย์ผลต่าง ดังนั้นจึงต้องใช้รีเลย์ผลต่างเพื่อป้องกันฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในนั่นเอง
รีเลย์กระแสเกิน	ใช้	สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้น จะใช้รีเลย์กระแสเกินแทนฟิวส์ เพราะรีเลย์กระแสเกินสามารถทำงานได้เร็วกว่าในช่วงที่กระแสลัดวงจรมีค่าต่ำ และยังสามารถป้องกันฟอลต์ลงดินได้ด้วย ซึ่งในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะใช้รีเลย์กระแสเกินเป็นการป้องกันสำรองให้กับการป้องกันแบบผลต่างและรีเลย์วัดความดัน
ฟิวส์	ไม่ใช้	เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีพิกัดกระแสที่สูงและต้องการการป้องกันที่มีความไวสูง ซึ่งฟิวส์นั้นไม่สามารถป้องกันได้ ดังนั้นจึงต้องใช้รีเลย์กระเกินแทน และที่ไม่ใช้ฟิวส์เพราะต้องเสียเวลาในการเปลี่ยนฟิวส์ ซึ่งเวลาที่เสียไปจะมีผลกระทบต่อผู้ประกอบการ
กับดักเสิร์จ	ใช้	การที่ตัวหม้อแปลงต่อร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆผ่านสายเคเบิ้ลที่เปิดโล่งทำให้มีโอกาสที่จะได้รับผลกระทบจากฟ้าผ่าได้ ดังนั้นจึงต้องมีกับดักเสิร์จเพื่อป้องกันฟ้าผ่าและเสิร์จต่างๆที่จะทำให้เกิดภาวะแรงดันชั่วขณะ
อุปกรณ์ปล่อยความดัน	ใช้	ในขณะที่มีการจ่ายโหลดสูงๆของหม้อแปลง น้ำมันในหม้อแปลงจะเกิดการขยายตัวทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความดัน เพื่อป้องกันไม่ให้หม้อแปลงระเบิดจึงต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ระบายความดันได้อย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) วิเคราะห์อุปกรณ์ป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

อุปกรณ์ป้องกัน	ใช้/ไม่ใช้	เหตุผล
รีเลย์ความดันทันทีทันใด	ใช้	สำหรับฟอลต์ที่เกิดภายในหม้อแปลง มีฟอลต์บางประเภทที่รีเลย์ผลต่างไม่สามารถตรวจจับได้เช่น ฟอลต์ระหว่างขดลวด ซึ่งฟอลต์ชนิดนี้รีเลย์ความดันทันทีทันใดสามารถตรวจจับได้ สำหรับหม้อแปลงที่ถังคอนเซอร์เวเตอร์จะไม่ใช้รีเลย์ความดันทันทีทันใดเพราะสามารถใช้บุคโฮลซ์รีเลย์ทำงานแทนได้
บุคโฮลซ์รีเลย์	ใช้	โดยทั่วไปจะใช้อุปกรณ์นี้กับหม้อแปลงที่มีถังคอนเซอร์เวเตอร์ เป็นอุปกรณ์ป้องกันความดันสูงเกินทันทีทันใดอันเนื่องมาจากการลัดวงจรภายในหม้อแปลงอย่างรุนแรง และป้องกันการสะสมของปริมาณก๊าซภายในตัวถังหม้อแปลงอันเนื่องมาจากการลัดวงจรระหว่างขดลวดที่มีค่ากระแสลัดวงจรต่ำหรือเกิดการดิสชาร์จบางส่วน รวมทั้งป้องกันกรณีที่เกิดรอยรั่วของตัวถังหลัก ซึ่งถ้าหากไม่มีอุปกรณ์ตัวนี้ช่วยป้องกันปัญหาที่กล่าวมาอาจจะทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายได้
อุปกรณ์ระบายความดันและวัดความดัน	ใช้	ใช้งานกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ไม่มีถังคอนเซอร์เวเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยรักษาระดับความดันในถังหม้อแปลง ซึ่งจะไม่ค่อยพบเห็นอุปกรณ์ชนิดนี้เพราะหม้อแปลงกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นแบบที่มีถังคอนเซอร์เวเตอร์
ตัวตรวจจับก๊าซ	ใช้	ใช้งานกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีถังคอนเซอร์เวเตอร์ จะใช้สำหรับตรวจจับความเสียหายของถุงยางในถังคอนเซอร์เวเตอร์ เพื่อป้องกันอากาศในถุงยางสัมผัสกับน้ำมันในถังคอนเซอร์เวเตอร์
อุปกรณ์ป้องกันทางความร้อน	ใช้	เนื่องจากอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันจะสะท้อนถึงการจ่ายโหลดของหม้อแปลง ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้มีความสำคัญมาก หากความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงมีค่ามากเกินไปอาจจะทำให้ฉนวนและอุปกรณ์ต่างๆภายในหม้อแปลงเสื่อมสภาพเร็วขึ้นได้

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 สรุปผลที่ได้จากการศึกษา

เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายมีขนาดพิกัดและโครงสร้างที่ต่างกันดังนั้นการเลือกอุปกรณ์ป้องกันจะต้องมีความเหมาะสมเพื่อประโยชน์สูงสุดของผู้ประกอบการ โดยปัจจัยในการเลือกอุปกรณ์สามารถจำแนกได้ดังนี้

ด้านราคาหากจะต้องเปลี่ยนอุปกรณ์ป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้าบ่อยๆ อาจส่งผลให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลกระทบต่อชิ้นงาน ผู้ประกอบการอาจเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีราคาแพงกว่าแต่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ซึ่งจะคุ้มค่ากว่าที่จะต้องสิ้นเปลืองกับการเปลี่ยนอุปกรณ์บ่อยๆ

ด้านพิกัดกำลังและโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากพิกัดกำลังมีความสำคัญอย่างมากต่อการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกัน เพราะ เมื่อพิกัดกำลังสูงขึ้น จึงทำให้พิกัดกระแสนั้นสูงขึ้นตามการป้องกันจึงต้องมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ส่วนอุปกรณ์ป้องกันบางอย่างจำเป็นจะต้องติดตั้งกับหม้อแปลงที่มีลักษณะเฉพาะ เช่นบุคโฮลซ์รีเลย์ จะติดตั้งเฉพาะหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีถังคอนเซอร์เวเตอร์

จากการศึกษาและวิเคราะห์สามารถจำแนกอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย ได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 อุปกรณ์ป้องกันพื้นฐานที่ควรมีในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	หม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย
รีเลย์ผลต่าง รีเลย์กระแสเกิน กับดักเสิร์จ อุปกรณ์ปล่อยความดัน รีเลย์ความดันทันทีทันใด บุคโฮลซ์รีเลย์ อุปกรณ์ระบายความดันและวัดความดัน ตัวตรวจจับก๊าซ รีเลย์ความร้อน	ฟิวส์ กับดักเสิร์จ อุปกรณ์ปล่อยความดัน รีเลย์ความร้อน

5.2 ปัญหาที่พบ

ข้อมูลส่วนมากเป็นข้อมูลที่เป็นความลับ เนื่องจากเป็นข้อมูลเฉพาะของแต่ละสถานประกอบการที่มีความแตกต่างกัน จึงทำให้การหาข้อมูลนั้นทำได้ยาก

เอกสารอ้างอิง

[1] IEEE Standard. 2000. **IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers.** C37.91.

[2] IEEE Standard. 1998. **IEEE Standard General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers Including Those with Solid- Cast and/or Resin-Encapsulated Windings.** C57.12.01.

[3] IEEE Standard. 1999. **IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.** C57.12.90.

[4] IEEE Standard. 2000. **IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.** C57.12.00.

[5] มงคล ทองสงคราม. ม.ป.ป. **หม้อแปลงไฟฟ้า.** พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัทรามาการพิมพ์ จำกัด, 691 ถ. พระราม 4สะพานเหลือง ปทุมวัน กรุงเทพฯ.

[6]ศุภชัย สุรินทร์วงศ์. **หม้อแปลงระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส.** พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 5-7 ซอยสุขุมวิท 29 ถ. สุขุมวิท แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพฯ. 2543.

[7] นาย ชาลี ทาสีทอง. " **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า.**"[Online]:เข้าถึงได้จาก/: http://pirun.ku.ac.th/~b4655076/page2.htm

[8] ไชยพร หล่อทองคำ. "**หลักการของรีเลย์ป้องกัน.**" [Online]:เข้าถึงได้จาก/: http://www.pwclub.mut.ac.th/Pdf/EEPW0424(5).pdf

[9] Electrical Community for EEHVs. "**Differential Relay.**" [Online]:เข้าถึงได้จาก/: http://highvoltage.thairelaying.com/index.php/protective-relay/36-2008-01-26-04-51-10/104-differential-relay-87

[10] http://eestud.kku.ac.th/~u4267248/protect/, สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[11] http://arthit.org/Classes/plants/Final%20Exam/Transformer%20Protection.pdf, สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[12] http://eestud.kku.ac.th/~u4267248/protect/Chapter3.htm, สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[13] ฝ่ายซ่อมบำรุง. "**Trouble หม้อแปลง และการแก้ไข.**"[Microsoft PowerPoint].EGAT

[14] www.unistarelectric.ca/dry%20type.jpg,สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[15] http://www.power-technology.com/contractor_images/pauwels/2_Big-DT.jpg,สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

[16] http://irrigation.rid.go.th/rid8/royal_coin/electrical/transformer/dropout2.jpg,สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[17] http://sukrutelectric.com/PRV.aspx, สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[18] http://sukrutelectric.com/img/png/IMG_5045.png, สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[19] ธนาศักดิ์ เกตุเสถียร. "Transmission System Maintenance Division" [Slide].EGAT

[20]http://www02.abb.com/global/cnabb/cnabb051.nsf/0/dd2a21ca0a892967482572b2002426c4/$file/Hermetically+Sealed+Oil+Immersed+Distribution+Transformer+.jpg , สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[21] http://www.specialtytransformers.com/pets.jpg, สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[22] http://victoryelectricals.com/images/power.jp, สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[23]http://www.made-in-china.com/image/2f0j00bBhtuPWrODkVM/Dry-Type-Power-Transformer.jpg, สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[24]http://www.made-in-china.com/image/2f0j00mCVtuAlnLDoLM/Oil-Immersed-Power-Transformer-SZ11-.jpg, สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[25]http://product-image.tradeindia.com/00273378/b/On-Load-Tap-Changer-Power-Transformer-.jpg, สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[26]http://www.nhpa40.org/b2b/pics/S11_On_Loading_Regulating_Transformer__20_000kVA_.jpg, สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[27] http://www.btw-usa.com/resources/_wsb_537x371_BTW_Pacificorp_2003_2.jpg, สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[28]http://www.powergeneration.siemens.com/NR/rdonlyres/CC373FF3-F102-49B7-BE9C-F838EA9CB24C/0/ptdt200607422.jpg, สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[29]http://images.absoluteastronomy.com/images/encyclopediaimages/s/sc/scott-t.jpg, สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52

[30]http://www.osha.gov/SLTC/etools/electric_power/images/neutral_grounding_transformer.jpg , สืบค้นวันที่ 21 เม.ย. 52