



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขณะเกิดการลัดวงจรที่ขดลวด
โดย นายดุสิต อุทิศสุนทร

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

21 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.สมพร สิริสำราญกุล)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ธีรธรรม บุญยะกุล)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.วิฑูรย์ ผ่องญาติ)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อนวัช แสงสว่าง)

การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขณะเกิดการลัดวงจรที่ขดลวด

นายดุสิต อุทิศสุนทร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายคุสิต อุทิศสุนทร
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขณะเกิดการลัดวงจรที่ขดลวด
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร.สมพร สิริสำราญนุกุล
อาจารย์ ดร.ธีรธรรม บุญยะกุล
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

แบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการหาขนาดของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า การลัดวงจรภายในประกอบด้วย การลัดวงจรจากขดลวดลงดิน และการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบและจำลองผลบนโปรแกรม PSCAD/EMTDC ผลลัพธ์จากการจำลองจะแสดงขนาดกระแสลัดวงจรลงดินและการเปรียบเทียบกระแสผลต่างเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลงแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการจำลองการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่างๆ ได้ (วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 101 หน้า)

คำสำคัญ : ความผิดปกติภายในขดลวด, การลัดวงจรภายใน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Dusit Uthitsunthorn
Thesis Title : Design of Power Transformer Winding Fault Model
Major Field : Electrical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisors : Dr.Somporn Sirisamrannukul
Dr.Teratom Bunyagul
Academic Year : 2006

Abstract

A power transformer with internal winding faults is designed to study the magnitude of fault current. There are two types of the winding fault: turn to ground and turn to turn faults. The paper presents the design and results of a power transformer winding faults by using PSCAD/EMTDC program. The simulation results show the magnitude of earth fault current and differential current and the comparison of primary and secondary fault of the transformer. The model provides a tools for transformer protection simulation.

(Total 101 pages)

Keywords : Transformer Winding Fault, Transformer Model, Turn to Ground Fault,
Turn to Turn Fault, Transformer Protection

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทั้งสองท่าน คือ อาจารย์ ดร.ธีรธรรม บุญยะกุล และอาจารย์ ดร.สมพร สิริสำราญกุล ที่ได้ให้โอกาสและคำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ระหว่างการทำวิจัย สอนลูกศิษย์มากกว่าความรู้ที่มีอยู่ในหนังสือ นั่นก็คือ ความเพียรพยายาม ความอดทน และประสิทธิภาพของการทำงาน ตลอดเวลาอันยาวนานจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี นอกจากนั้นผู้วิจัยขอขอบคุณ Dr.Dharshana Muthumuni ผู้ให้คำแนะนำในการเขียนโปรแกรม PSCAD/EMTDC

ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ร่วมทุกข์ ร่วมสุข และทำให้รู้จักการทำงานเป็นกลุ่ม ความสนุกสนาน และการให้กำลังใจทำให้เกิดความสมบูรณ์ในชีวิต มีแรงผลักดันทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่ให้กำลังใจตลอดการศึกษาปริญญาโท

ศุสิต อุทิศสุนทร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังคืออะไร	1
1.2 สาเหตุของการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	2
1.3 การป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้า	4
1.4 งานวิจัยนี้ต้องการอะไร	7
1.5 โครงสร้างวิทยานิพนธ์	7
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	9
2.1 การออกแบบการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	9
2.2 การป้องกันแบบผลต่างหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	21
2.3 สรุปผลการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา	26
บทที่ 3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการป้องกันหม้อแปลง	29
3.1 ความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	29
3.2 การป้องกันแบบผลต่าง	33
3.3 คุณสมบัติของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างของโปรแกรม PSCAD/EMTDC	37
บทที่ 4 การออกแบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	39
4.1 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 50 MVA 115/23 kV	39
4.2 การเตรียมข้อมูลเพื่อใส่ค่าในโปรแกรม BCTRAN	40
4.3 การต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเวกเตอร์รูปอื่น ๆ	43
4.4 การสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 50 MVA 115/23 kV	46
4.5 แบบจำลองการเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดบนโปรแกรม PSCAD	54
4.6 การคำนวณหาค่ากระแสของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	60
4.7 การทดสอบผลของแบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดบนโปรแกรม PSCAD	64
4.8 สรุปผล	79

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	81
5.1 การลัดวงจรภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	81
5.2 การจำลองระบบการป้องกันหม้อแปลงแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	85
5.3 การคำนวณค่าปรับตั้งของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง	86
5.4 สรุปผล	94
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	95
6.1 การออกแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานะปกติ	95
6.2 การออกแบบจำลองการเกิดการลัดวงจรภายในขดลวด	95
6.3 การออกแบบระบบป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้า	96
6.4 การนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้งาน	96
6.5 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย	97
6.6 งานวิจัยที่สามารถทำได้ในอนาคต	97
เอกสารอ้างอิง	99
ประวัติผู้วิจัย	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 สรุปผลการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง	4
3-1 การรวมการชดเชยเฟสตามภาคเตอร์ของการต่อขดลวดหม้อแปลง	36
4-1 ความต้านทานและความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 MVA	42
4-2 กระแสไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดปกติ 10 MW	61
4-3 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าย่อยจอมเทียน	61
4-4 การเปรียบเทียบกระแสจากการคำนวณ	63
4-5 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรชนิดต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละบัส	63
4-6 กระแสลัดวงจรลงดินและกระแสผลต่างของหม้อแปลงขดลวดที่ 1	69
4-7 กระแสลัดวงจรลงดินและกระแสผลต่างของหม้อแปลงขดลวดที่ 2	72
5-1 การปรับตั้งค่าของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง	89
5-2 การเปรียบเทียบกระแสผลต่างและกระแสด้านการทำงานของรีเลย์	93

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 การเกิดสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส	1
1-2 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 3 เฟส 200 MVA 230/115 kV	2
1-3 สถิติการเกิดความผิดปกติของหม้อแปลง	4
1-4 เกิดความผิดปกติภายนอกเขตการป้องกัน (External Fault)	5
1-5 เกิดความผิดปกติภายในเขตการป้องกัน (Internal Fault)	5
1-6 ลักษณะของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง	6
2-1 ความต้านทานและความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงสภาวะปกติ	10
2-2 การลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า	10
2-3 การลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดด้านแรงสูงแบบเคลด้า	13
2-4 การลัดวงจรลงดินขดลวดด้านแรงสูงแบบเคลด้า	13
2-5 การลัดวงจรลงดินของขดลวดด้านแรงสูงเชื่อมต่อกับสายส่งระยะสั้น	14
2-6 วงจรการสร้างแบบจำลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงโดยโปรแกรม ATP	16
2-7 การเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า	17
2-8 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงกระแส (CT)	18
2-9 การต่อวงจรป้องกันหม้อแปลงโดยใช้การตรวจเช็คกระแสผลต่างของรีเลย์	18
2-10 การลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าในการทดสอบด้านปฐมภูมิ	20
2-11 วงจรในการทดสอบการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า	20
2-12 กระแสการทำงาน (Operating Current) ในสภาวะปกติ	22
2-13 กระแสการทำงาน (Operating Current) เมื่อเกิดความผิดปกติภายใน	22
2-14 คุณสมบัติรีเลย์ป้องกันผลต่างแบบเปอร์เซ็นต์	23
2-15 การตรวจวัดกระแสผลต่างเมื่อมีการเปลี่ยนแท่งขดลวดหม้อแปลง	24
2-16 เขตการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง	24
2-17 คุณลักษณะของรีเลย์ป้องกันผลต่างแบบ 2 ความชัน	25
3-1 การต่อความต้านทานลงดินที่ขดลวดสตาร์	30
3-2 กระแสผิดปกติลงดินที่ขดลวดสตาร์ต่อความต้านทานลงดิน	31
3-3 กระแสผิดปกติลงดินที่ขดลวดสตาร์ต่อลงดินเพียงอย่างเดียว	32
3-4 กระแสลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-5 การป้องกันผลต่างของหม้อแปลง	34
3-6 การป้องกันผลต่างของหม้อแปลงที่ต่อแบบ delta-star	35
3-7 คุณสมบัติรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างของโปรแกรม PSCAD/EMTDC	37
4-1 การป้อนค่าของการทดสอบหม้อแปลงใน BCTRAN	41
4-2 การต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟสแบบวาย - ยาย	43
4-3 การต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟสแบบเดลต้า – เดลต้า	44
4-4 การต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟสแบบวาย – เดลต้า	45
4-5 การต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟสแบบเดลต้า – ยาย	45
4-6 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 2 ขดลวด (3 Phase 2 Winding)	46
4-7 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงหลายขดลวด	47
4-8 วงจรการพิจารณาออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานะต่าง ๆ	48
4-9 เมนูของโปรแกรม PSCAD/EMTDC ในการสร้างแบบจำลอง	54
4-10 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าสถานะปกติ	55
4-11 การเลือกรายการกำหนดค่าข้อมูลในแบบจำลอง	55
4-12 แบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดบนโปรแกรม PSCAD/EMTDC	59
4-13 การป้อนค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้า	60
4-14 ระบบไฟฟ้าของแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย	63
4-15 การจำลองระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานะปกติ	64
4-16 กระแสด้านปฐมภูมิขณะจ่ายโหลดปกติขนาด 10 MW	65
4-17 กระแสด้านทุติยภูมิขณะจ่ายโหลดปกติขนาด 10 MW	65
4-18 กระแส RMS ของหม้อแปลงทั้งสองด้านขณะจ่ายโหลด 10 MW	66
4-19 การทดสอบแบบจำลองการลัดวงจรขดลวดลงดินของขดลวด ด้านปฐมภูมิเฟส A	67
4-20 สัญญาณกระแสลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A	68
4-21 สัญญาณกระแสลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A	68
4-22 การทดสอบแบบจำลองการลัดวงจรขดลวดลงดินของขดลวด ด้านทุติยภูมิเฟส A	70
4-23 สัญญาณกระแสลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-24 สัญญาณกระแสลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A	71
4-25 การทดสอบแบบจำลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิเฟส A	73
4-26 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A	74
4-27 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A	74
4-28 ขนาดของกระแสลัดวงจรระหว่างรอบทางด้านปฐมภูมิ	75
4-29 การทดสอบแบบจำลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิเฟส A	76
4-30 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A	77
4-31 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A	77
4-32 ขนาดของกระแสลัดวงจรระหว่างรอบทางด้านทุติยภูมิ	78
5-1 การลัดวงจรภายนอกหม้อแปลงแบบเฟสเดียวลงดิน	81
5-2 สัญญาณกระแสลัดวงจรลงดินเฟส A ภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ	82
5-3 สัญญาณกระแสลัดวงจรลงดินเฟส A ภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ	83
5-4 การลัดวงจรภายนอกหม้อแปลงแบบสามเฟส (Three Phase Fault)	83
5-5 สัญญาณกระแสลัดวงจรสามเฟสภายนอกทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า	84
5-6 สัญญาณกระแสลัดวงจรสามเฟสภายนอกทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า	85
5-7 ระบบการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้า	86
5-8 ระบบการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	87
5-9 การปรับตั้งค่าคุณลักษณะของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง	90
5-10 กระแสผลต่างและกระแสด้านการทำงานของรีเลย์	90
5-11 รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างไม่ทำงาน	91
5-12 รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างทำงาน	91
5-13 ระบบการป้องกันแบบผลต่างเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในและภายนอก	92
5-14 การทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างในสภาวะต่างๆ	94

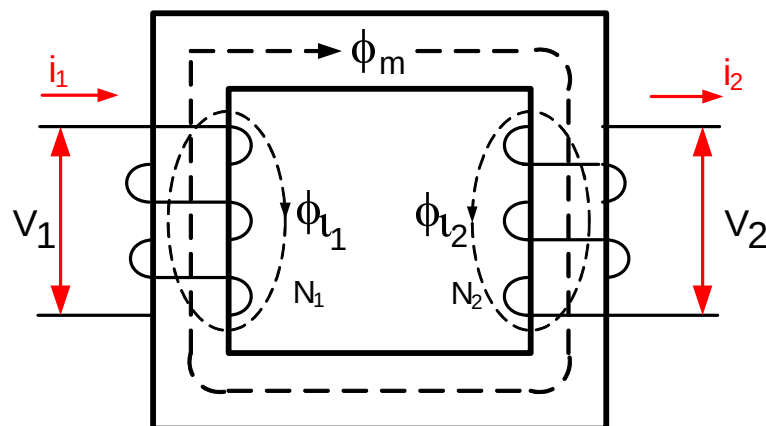
บทที่ 1

บทนำ

1.1 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังคืออะไร

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่สำคัญในระบบไฟฟ้ากำลัง ที่ใช้เปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ หม้อแปลงไฟฟ้านั้นเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่อยู่กับที่ (Static Transformer) สามารถเปลี่ยนระดับของแรงดันไฟฟ้าต่ำให้เป็นแรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อใช้ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าในระยะทางไกลๆ และเปลี่ยนจากแรงดันสูงให้เป็นแรงดันต่ำเพื่อใช้ในการจำหน่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับผู้บริโภค

หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด คือ ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) สำหรับหม้อแปลงกำลัง (Power Transformer) ขนาดใหญ่ บางตัวอาจมีขดลวดที่สาม (Tertiary Winding) เพิ่มขึ้นมา แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นในขดลวดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่ตัดขดลวดในแต่ละรอบ โดยที่ขดลวดและแกนเหล็กจะอยู่กับที่ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิเกิดจากการเหนี่ยวนำร่วมกันจากขดลวดปฐมภูมิโดยอาศัยวงจรแม่เหล็กปิดในแกนเหล็ก



ภาพที่ 1-1 การเกิดสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส

จากการค้นพบเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ปัจจุบันได้พัฒนาการใช้วัสดุในการทำแกนเหล็กโดยใช้เหล็กแผ่นเหล็กลามิเนต เพื่อลดความสูญเสียในแกนเหล็กทำให้หม้อแปลงมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง [1]



ภาพที่ 1-2 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 3 เฟส 200 MVA 230/115 kV

1.2 สาเหตุของการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

สำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ ความผิดปกติที่เกิดจากหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะหยุดการจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลดหรือผู้ใช้ไฟ (User) จำนวนมาก ถ้าไม่กำจัดการผิดปกติของหม้อแปลงโดยเร็ว จะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเสียหาย ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพในการจ่ายไฟเพราะฉะนั้นจะต้องเลือกกระบวนการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ทำงานได้ดี มีประสิทธิภาพและราคาไม่แพง จากเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงต้องนำหลักทางเศรษฐศาสตร์มาประกอบในการพิจารณาเพื่อให้ได้ระบบป้องกันไฟฟ้าดี ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเมื่อระบบเกิดความเสียหาย สาเหตุของความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การเกิดความผิดปกติภายในและการเกิดความผิดปกติภายนอก

1.2.1 ความผิดปกติภายนอก (External Faults)

การเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลงนั้นจะอยู่นอกเขตการป้องกันหม้อแปลง (Zone Protection) ซึ่งถูกกำหนดหม้อแปลงกระแส (CT) ผลของการเกิดความผิดปกติภายนอกจะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับความเครียดภายในหม้อแปลงทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลง การเกิดความผิดปกติประเภทนี้ประกอบด้วย [1, 2]

1.2.1.1 การจ่ายโหลดเกินขนาด (Overloads)

1.2.1.2 การลัดวงจรภายนอก (External System Short Circuit)

1.2.1.3 แรงดันเกิน (Over Voltage)

1.2.1.4 ความถี่ของระบบลดลง (Reduced System Frequency)

สำหรับสาเหตุของความผิดปกติภายนอกที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างจะต้องไม่ทำงาน ซึ่งเป็นหลักการในการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แต่ก็มีผลกระทบจากความรุนแรงของกระแสความผิดปกติภายนอก จะทำให้เกิดฟลักแม่เหล็กภายในหม้อแปลงเกินขนาด (Overfluxing) กรณีนี้รีเลย์จะไม่ตัดวงจรออกจากระบบทันทีเพราะว่าอาจจะเกิดขึ้นชั่วขณะ แต่ถ้าเกิดเป็นเวลานานจะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเป็นอันตรายต่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง รีเลย์ต้องตัดวงจรออกจากระบบเพื่อป้องกันความเสียหาย

1.2.2 ความผิดปกติภายใน (Internal Faults)

การเกิดความผิดปกติภายในนั้นจะอยู่ในเขตการป้องกันหม้อแปลง ไม่ใช่ภายในหม้อแปลง เพียงอย่างเดียวแต่รวมทั้งภายนอกหม้อแปลงด้วย อยู่ภายในเขตการป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้า ถูกกำหนดโดยหม้อแปลงกระแส (CT) การเกิดความผิดปกติขึ้นภายในนั้นสาเหตุเบื้องต้นประกอบด้วย หม้อแปลงเกิดความร้อนเกิน (Overheating) ฟลักแม่เหล็กเกิน (Overfluxing) และการเกิดแรงดันเกิน (Overpressure) จากสาเหตุดังกล่าวนี้จะทำให้น้ำมันเสื่อมสภาพและทำให้เกิดความเครียดภายในหม้อแปลง ถ้าไม่มีการตรวจสอบและแก้ไขปัญหาดังกล่าวจะทำให้เกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงต่อไป แต่เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นแล้วนั้นรีเลย์ป้องกันต้องทำงานอย่างรวดเร็ว โดยการตัดวงจรหม้อแปลงออกจากระบบไฟฟ้าเพื่อลดความเสียหายภายในเขตการป้องกันหม้อแปลงเท่านั้น เราสามารถพิจารณาแบ่งประเภทของการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงได้ดังนี้

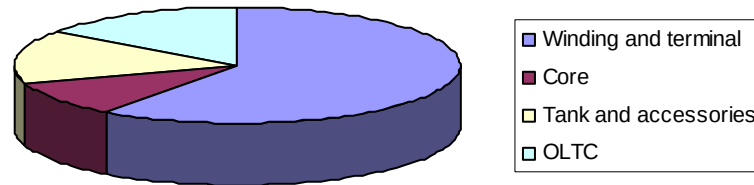
1.2.2.1 การลัดวงจรในขดลวดที่มีการต่อเป็นแบบสตาร์

- ก) การต่อลงกราวด์ผ่านความต้านทาน (Grounded Through a Resistance)
- ข) การต่อลงกราวด์โดยตรง (Solidly Grounded)
- ค) ไม่มีการต่อกราวด์ (Ungrounded)

1.2.2.2 การลัดวงจรในขดลวดที่มีการต่อเป็นแบบเดลต้า

- ก) การลัดวงจรระหว่างเฟส
- ข) การลัดวงจรในรอบของขดลวด
- ค) การลัดวงจรที่แกนเหล็ก
- ง) การลัดวงจรที่ตัวถัง

การเกิดความผิดปกติโดยส่วนมากจะเกิดจากความผิดปกติภายในขดลวด และขั้วของหม้อแปลง ซึ่งแสดงเป็นสถิติบนแผนภาพที่ 1-3 โดยจะแบ่งเป็นสัดส่วนตามสาเหตุของการเกิดความผิดปกติในแต่ละกรณี [2]



ภาพที่ 1-3 สถิติการเกิดความผิดพลาดของหม้อแปลง

การเลือกระบบป้องกันนั้นจะต้องคำนึงถึงหลักเศรษฐศาสตร์ [2] โดยขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เลือกใช้ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายและระบบส่งไฟฟ้านั้นมีขนาดตั้งแต่ KVA ถึง 100 MVA จะต้องออกแบบระบบการป้องกันให้เหมาะสมกับหม้อแปลง

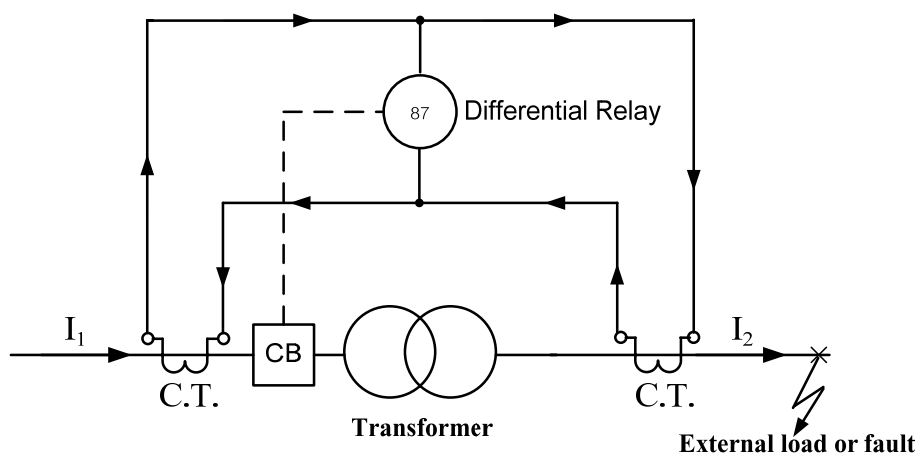
ตารางที่ 1-1 สรุปผลการเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลง

ประเภทของความผิดพลาด	สาเหตุของความผิดพลาด
ไดอิเล็กทริก	การลัดวงจรระหว่างขดลวดหรือขดลวดลงดิน
อิเล็กทรอนิกส์	หน้าสัมผัสไม่ดี หรือ หน้าสัมผัสโหลดแท๊ปเสียหาย
อิเล็กทรอนิกส์ไดนามิก	แรงที่เกิดจากการลัดวงจรภายในและภายนอก
อิเล็กทรอนิกส์แมกเนติก	กระแสไฟฟ้าไหลวนทำให้เกิดความเหนี่ยวนำในวงจรแม่เหล็ก หรือ โครงสร้างของตัวถังขยายตัว
ความร้อน	อุณหภูมิที่สูงขึ้นผิดปกติ หรือ ความร้อนเนื่องจากความสกปรกของน้ำมัน
เครื่องกล	การสั่นสะเทือน ความร้อนแต่ละจุด การรั่วไหลหรือข้อบกพร่องของการเปลี่ยนแท๊ป

1.3 การป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้า (Differential Protection of Transformer)

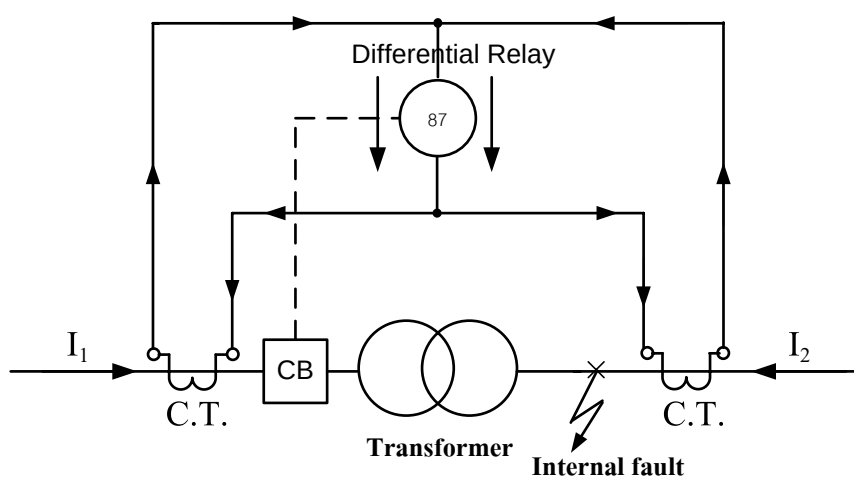
การป้องกันผลต่างนั้นใช้หลักการเปรียบเทียบกระแสที่ไหลเข้าและออก จากอุปกรณ์ป้องกันทั้งหมด โดยอาศัยหลักการที่ว่า “ผลรวมของกระแสที่ไหลเข้ามีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลออก” ตามกฎของกระแสของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff Current Law's) [3]

ผลรวมในสภาวะปกติเมื่อไม่มีความผิดปกติเกิดขึ้นกระแสจะเท่ากับศูนย์ เมื่อเกิดความผิดปกติภายนอก (External Fault) จะไม่มีกระแสไหลผ่านรีเลย์เช่นเดียวกับในสภาวะปกติ แสดงดังภาพที่ 1-4 ในสภาวะปกติหรือเกิดความผิดปกติภายนอก (External Fault) จะมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เล็กน้อย มีค่าไม่เกินกระแสปรับตั้งของรีเลย์



ภาพที่ 1-4 เกิดความผิดปกติภายนอกเขตการป้องกัน (External Fault)

แต่เมื่อเกิดความผิดปกติภายใน (Internal Fault) จะมีกระแสผลต่างไหลผ่านรีเลย์จึงทำให้รีเลย์ทำงาน แสดงดังภาพที่ 1-5



ภาพที่ 1-5 เกิดความผิดปกติภายในเขตการป้องกัน (Internal Fault)

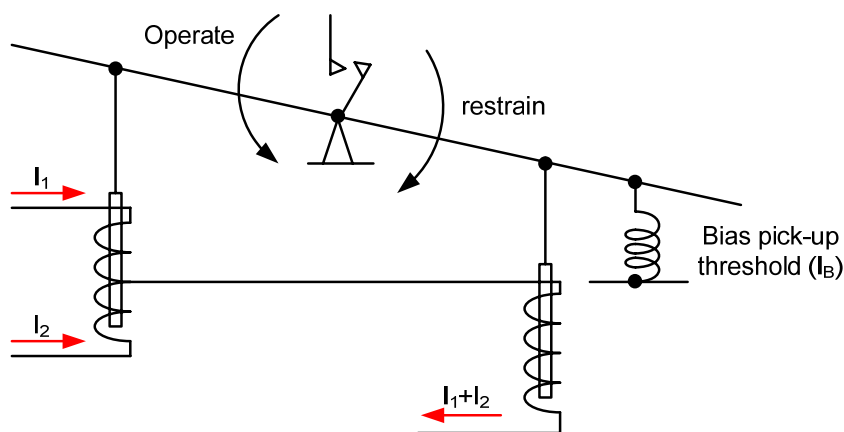
รีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง จะใช้ร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ถูกติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่สามารถสังเกตรวดจร เพื่อแยกหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบ รีเลย์แบบผลต่างที่ใช้ในปัจจุบันนี้มี 2 ชนิด คือ

1. รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างกระแสเกิน (Overcurrent Differential Relay)

เป็นรีเลย์ที่ทำงานโดยอาศัยการเปรียบเทียบกระแสผลต่างจากหม้อแปลงกระแส (CT) เมื่อเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงจะมีกระแสผลต่างสูงกว่ากระแสเริ่มทำงาน รีเลย์จะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงาน ในสภาวะปกตินั้นผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์จะเท่ากับศูนย์และมีกระแสผลต่างต่ำกว่ากระแสเริ่มทำงานรีเลย์จึงไม่ทำงาน

2. รีเลย์ป้องกันผลต่างแบบเปอร์เซ็นต์ (Percentage Differential Relay)

ปัญหาการเกิดความผิดปกติภายนอกเขตการป้องกันนั้นทำให้หม้อแปลงกระแส (CT) ที่ใช้ตรวจจับเกิดการอิ่มตัวกระแสที่วัดได้นั้นคลาดเคลื่อนมีกระแสผลต่างในรีเลย์ ซึ่งเป็นการทำงานที่ผิดพลาด [4] และปัญหาการสูญเสียในการป้องกันเนื่องจากการปรับตั้งค่าเริ่มต้น (Pick Up) มากกว่าค่ากระแสที่แท้จริงของรีเลย์ทำให้มีความไวลดลงเกิดความผิดพลาดในการป้องกัน การแก้ปัญหาดังกล่าวจึงใช้รีเลย์แบบผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ (Percentage Differential Relay) โดยรีเลย์จะมีขดลวด 2 ชุด คือ ขดลวดด้านการทำงาน (Restraint Coil) และขดลวดทำงาน (Operating Coil) ดังแสดงในภาพที่ 1-6 กระแสที่จะสั่งให้รีเลย์ทำงานจะเป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลเข้าขดลวดด้านการทำงาน โดยจะเป็นอัตราส่วนคงที่ตลอด แรงบิดที่เกิดจากขดลวดทำงาน (Operating Coil) จะสร้างแรงไปปิดหน้าสัมผัส ส่วนขดลวดด้านการทำงาน (Restraint Coil) จะสร้างแรงด้านการปิดหน้าสัมผัส



ภาพที่ 1-6 ลักษณะของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง

1.4 งานวิจัยนี้ต้องการอะไร

ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจะต้องมีความมั่นคงในการจ่ายไฟฟ้า โดยต้องเกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟน้อยและจำกัดขอบเขตของความเสียหายที่จะเกิดขึ้น ซึ่งสาเหตุส่วนมากนั้นเกิดจากความผิดปกติต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถที่จะทดสอบการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าได้ เนื่องจากความปลอดภัยและความเสียหายที่จะเกิดขึ้นเพราะฉะนั้นจึงต้องมีการจำลองสภาวะความผิดปกติที่จะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า เพื่อศึกษาพฤติกรรมและปรากฏการณ์ต่างๆ แล้วทำการป้องกัน โดยแยกส่วนที่ผิดปกติออกจากระบบให้เร็วที่สุดเพื่อทำการซ่อมแซม ปรับปรุงแก้ไขให้กลับสู่สภาวะปกติ

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้า ใช้สำหรับเปลี่ยนระดับแรงดันในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเกิดความเสียหายจะทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าทำให้ระบบขาดความมั่นคงในการจ่ายไฟฟ้า เพราะฉะนั้นจึงต้องเลือกอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมกับขนาดของระบบไฟฟ้า ราคา และความยืดหยุ่นในการใช้งาน อุปกรณ์ป้องกันที่มีการทำงานที่ดีนั้นจะต้องมีความเชื่อมั่นสูง ทำงานได้เร็วและราคาไม่แพงในการป้องกันรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างเป็นอุปกรณ์ป้องกันที่ถูกนำมาใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เพราะว่ามีการทำงานเร็ว โดยใช้หลักการเปรียบเทียบกระแสผลต่างของหม้อแปลงทั้งสองด้าน เมื่อมีกระแสผลต่างเกิดขึ้นรีเลย์จะทำการประมวลผลตามขั้นตอนวิธีการ (Algorithm) ที่ออกแบบไว้ในแต่ละเงื่อนไขในการป้องกันเพื่อควบคุมการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์

จากปัญหาที่กล่าวมาทั้งหมดในงานวิจัยนี้ นำเสนอการศึกษาการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Differential Protection of Power Transformer) ขณะเกิดการลัดวงจรในขดลวดและความผิดปกติภายนอก เพื่อวิเคราะห์ผลของกระแสความผิดปกติที่เกิดขึ้นแล้วนำผลลัพธ์มาใช้ในการศึกษาพัฒนาปรับปรุงวิธีการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ขนาดของกระแสความผิดปกติจากการจำลองนั้นจะนำไปใช้ในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้า (Protective Devices) และปรับตั้งค่ารีเลย์ (Relay Setting) ให้เหมาะสมและปลอดภัยในระบบป้องกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีประโยชน์และความสำคัญต่อระบบไฟฟ้ากำลังโดยทำการจำลองและวิเคราะห์ผลบนโปรแกรม PSCAD/EMTDC

1.5 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท ในแต่ละบทอธิบายขอบเขตของเนื้อหาโดยสรุปดังต่อไปนี้

บทที่ 1 รายละเอียดในบทนี้ อธิบายความสำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในระบบไฟฟ้า หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า สาเหตุของการผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วย

ความผิดปกติภายในและภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า หลักการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและจุดมุ่งหมายของงานวิจัย และส่วนประกอบทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 รายละเอียดของเนื้อหาประกอบด้วย การรวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบการเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าและการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ทำการเผยแพร่ตามอินเทอร์เน็ตและวารสารต่างๆ เช่น IEEE IEE โดยสรุปเนื้อหาที่สำคัญและวิธีการที่นำมาใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ ประโยชน์ที่ได้รับจากการสำรวจงานวิจัยนี้ก็คือทำให้ทราบถึงขั้นตอนและขีดจำกัดของงานวิจัย จุดเด่นและข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

บทที่ 3 เนื้อหาในบทนี้ จะอธิบายผลของกระแสลัดวงจรจากการต่อหม้อแปลงแบบต่างๆ ชนิดของการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง การคำนวณค่าของกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานะปกติ และกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของหม้อแปลงของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ การคำนวณค่าในการปรับตั้งรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างตามคุณลักษณะ ในงานวิจัยนี้ใช้รีเลย์จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC และ ตารางที่ใช้ในการปรับตั้งค่ารีเลย์

บทที่ 4 รายละเอียดบทนี้เป็นส่วนสำคัญในการทำวิจัย เพราะว่าจะอธิบายถึงขั้นตอนในการออกแบบสร้างและทดสอบแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานะปกติ และเกิดการลัดวงจรภายในขดลวด เริ่มต้นจากการหาค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำมาใช้ในการออกแบบ ซึ่งจะต้องใช้ผลการทดสอบหม้อแปลงป้อนค่าลงใน BCTRAN แล้วนำค่าไปสร้างแบบจำลองตามเงื่อนไขการลัดวงจรและทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองเปรียบเทียบกับ การคำนวณในบทที่ 3 ตลอดจนการเก็บข้อมูลของกระแสลัดวงจรแบบต่างๆ มาวิเคราะห์ผลเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบป้องกัน

บทที่ 5 จะกล่าวถึงการจำลองกระแสลัดวงจรภายนอกแบบต่างๆ และการจำลองสถานะการทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และความผิดปกติภายนอกกรณีเกิดการลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน (Single Line to Ground Fault) และการลัดวงจรแบบสามเฟส (Three Phase Fault) ซึ่งเป็นความผิดปกติภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เพื่อศึกษาการทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างตามเงื่อนไขที่ปรับตั้งไว้ในบทที่ 3

บทที่ 6 รายละเอียดของบทนี้จะสรุปผลของการวิจัยทั้งหมด เทคนิคและขั้นตอนวิธีการสร้างแบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และระบบป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลง นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย การปรับปรุงแก้ไขและข้อเสนอแนะต่างๆ ในการออกแบบที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและแนวทางในการปรับปรุงแบบจำลองให้มีความสมบูรณ์ต่อการใช้งานให้เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ใกล้เคียงกับของจริง และการพัฒนาโปรแกรมต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

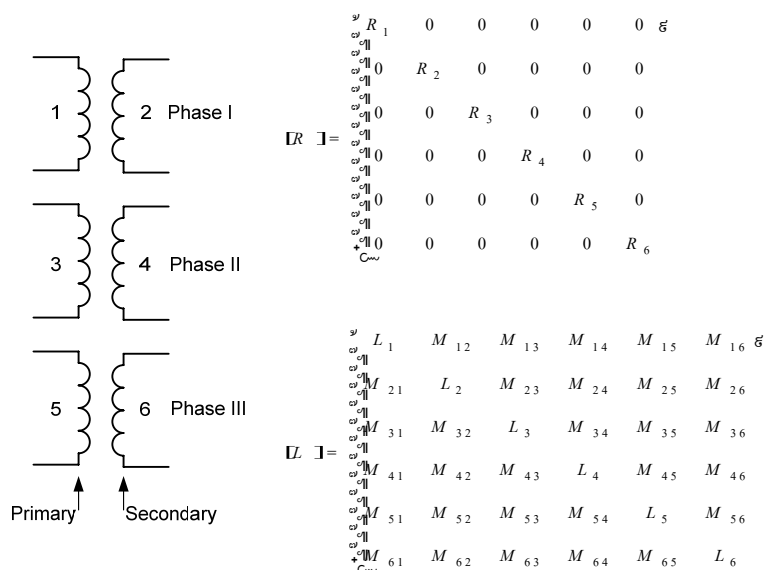
รายละเอียดของบทนี้ จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดและการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่ผ่านมานั้นได้มีงานวิจัยที่ทำการพัฒนาแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ารวมทั้งระบบป้องกันแบบผลต่างมากมาย สำหรับเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ที่ได้ทำการเผยแพร่ทางวารสารวิชาการแบ่งออกเป็น 2 ส่วนมีดังนี้

2.1 การออกแบบการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาค้นคว้าบทความที่เกี่ยวข้องกับการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดการลัดวงจรภายในขดลวดประกอบด้วยการลัดวงจรจากขดลวดลงดินและการลัดวงจรระหว่างขดลวด ซึ่งมีบทความที่สำคัญและใช้ในงานวิจัยดังนี้

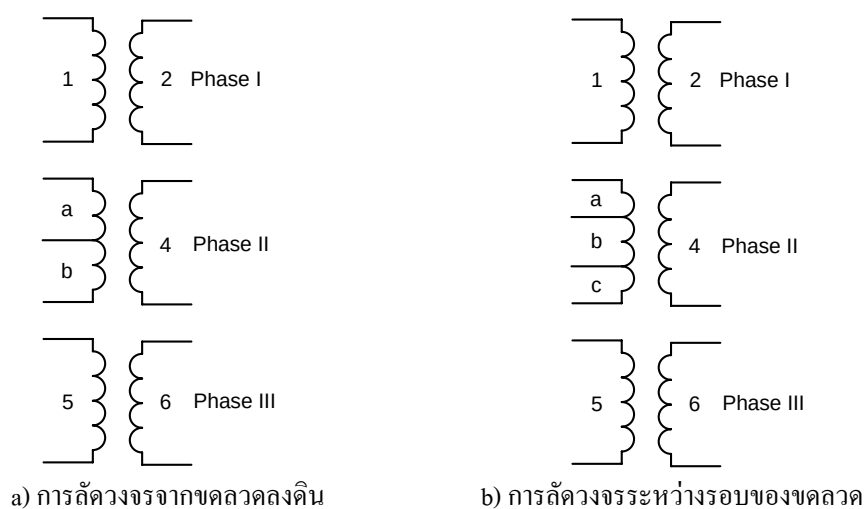
2.1.1 การออกแบบหม้อแปลงสำหรับการศึกษาความผิดปกติในขดลวด [5, 6]

เป็นบทความที่น่าสนใจแนวคิด ในการออกแบบความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยใช้โปรแกรม EMTDC ในการจำลองสถานะการลัดวงจรระหว่างขดลวดและขดลวดลงดิน การสร้างแบบจำลองเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 3 เฟส 2 ขดลวดในสถานะปกติ ใช้ค่าการทดสอบหม้อแปลงในสถานะลัดวงจร และเปิดวงจรในลำดับบวกและลำดับลบมาป้อนค่าลงใน BCTRAN ซึ่งเป็นโปรแกรมย่อยของ ATP/Draw โปรแกรมจะทำการประมวลผลเป็นการประมาณค่าความต้านทาน [R] และความเหนี่ยวนำ [L] ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการออกแบบหม้อแปลงในสถานะปกติเป็นเมตริกขนาด 6 x 6 แสดงดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 ความต้านทานและความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงสภาวะปกติ

การลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้านั้นมีอยู่ 2 กรณี คือ การลัดวงจรจากขดลวดลงดิน และการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด กรณีเกิดการลัดวงจรจากขดลวดลงดินนั้นขดลวดจะถูกแบ่งเป็น 2 ขดลวดย่อย แสดงดังภาพที่ 2-2 a) ทำให้ขนาดของเมตริกเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะปกติเป็นขนาด 7×7 แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบ ขดลวดที่ลัดวงจรนั้นจะถูกแบ่งเป็น 3 ขดลวดย่อยแสดงดังภาพที่ 2-2 b) ขนาดของเมตริกก็เปลี่ยนไปเป็นขนาด 8×8



ภาพที่ 2-2 การลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อขนาดของเมตริกเปลี่ยนแปลงจากสภาวะปกติต้องทำการคำนวณหาค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดย่อยในแต่ละชุด ซึ่งค่าความต้านทานนั้นแปรผันตามจำนวนรอบของตำแหน่งของการลัดวงจรใช้สมการที่ (2-1) ส่วนการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดย่อยในแต่ละขดลวด ใช้หลักการของ Consistency, Leakage Factor และ Proportionality [5, 6] เป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นมีความแม่นยำ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองวัดค่าของลิกเกจแฟกเตอร์ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าการคำนวณโดยใช้ข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 100 kVA 5,500V /410 V Dyn จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงต่ำ (LV) 67 รอบ การพันเป็นแบบ 2 ชั้น และจำนวนรอบของขดลวดด้านแรงสูง (HV) 1,556 รอบ การพันเป็นแบบ 8 ชั้น

$$R_a = \frac{n_a}{n_3} R_3 ; R_b = \frac{n_b}{n_3} R_3 ; k = \frac{n_a}{n_b} \quad (2-1)$$

โดยที่ $n_a + n_b = n_3$

n_a และ n_b = จำนวนรอบของขดลวดย่อย a and b

n_3 = จำนวนรอบของขดลวดที่ 3

สำหรับค่า k เป็นอัตราส่วนของแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดย่อยเมื่อเกิดการลัดวงจร เมื่อทราบค่าความต้านทานแล้วนั้นขั้นตอนต่อไปก็การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำภายใน (Self Inductance) และความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) ระหว่างขดลวดย่อย a และ b ซึ่งจะใช้ความสัมพันธ์ของหลักการทั้ง 3 มาใช้ในการคำนวณ

$$\text{Consistency} \quad L_a + 2M_{ab} + L_b = L_3 \quad (2-2)$$

$$\text{Leakage factor} \quad s_{ab} = 1 - \frac{M_{ab}^2}{L_a L_b} \quad (2-3)$$

$$\text{Proportionality} \quad \frac{L_a}{L_b} = \left(\frac{n_a}{n_b} \right)^2 \quad (2-4)$$

ค่าลิกเกจแฟกเตอร์ (s_{ab}) จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการลัดวงจรลงดิน ในงานวิจัยนี้จะทำการประมาณการและเปรียบเทียบการทดสอบจากหม้อแปลงไฟฟ้าจริง ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดย่อยคำนวณได้ตามสมการที่ (2-5)-(2-7)

$$L_a = \frac{L_3}{\frac{1}{k^2} + \frac{2\sqrt{1-sab}}{k} + 1} \quad (2-5)$$

$$L_b = \frac{L_3}{k^2 + 2k\sqrt{1-sab} + 1} \quad (2-6)$$

$$M_{ab} = \frac{L_3 \sqrt{1-sab}}{\left(k + \frac{1}{k}\right) + 2\sqrt{1-sab}} \quad (2-7)$$

บทสรุปค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำในเมตริก [R] และ [L] จะเปลี่ยนแปลงขนาดตามกรณีการเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลง ในบทความนี้จะใช้การประมาณค่าของลิกเกจแฟลคเตอร์เปรียบเทียบกับกรวดลอง เมื่อเกิดการลัดวงจรจากขดลวดลงดินทางด้านแรงสูงค่าจะมีค่าลิกเกจแฟลคเตอร์สูงเมื่อเทียบกับการคำนวณ ส่วนกรณีการเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบนั้นค่าลิกเกจแฟลคเตอร์มีค่าน้อยมาก

งานวิจัยต่อไปจะใช้วิธีการวัดค่าลิกเกจแฟลคเตอร์แล้วนำค่าที่ได้มาประมวลผล โดยใช้วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element) จะทำให้ทราบค่าที่แม่นยำและถูกต้อง

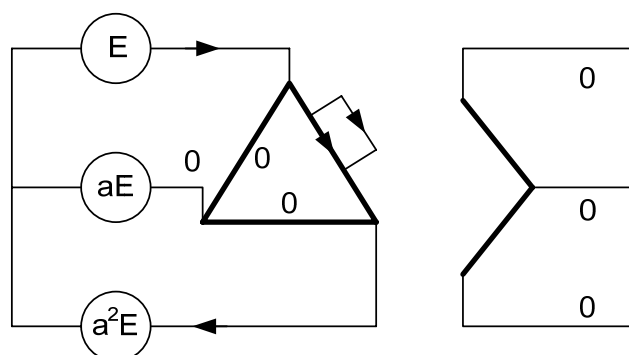
2.1.2 แบบจำลองสำหรับการเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลง สำหรับการศึกษาและติดตามผลของระบบป้องกัน [5]

บทความนี้เป็นการศึกษาการเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลง การหาค่ากระแสความผิดปกติและการตรวจจับค่ากระแสความผิดปกติภายนอก ซึ่งมีประโยชน์และการพิจารณาที่น่าสนใจดังนี้

1. การวัดหาประสิทธิภาพของระบบป้องกันและการพัฒนาระบบ
2. การหาสาเหตุของการเกิดความผิดปกติที่แท้จริงโดยใช้การติดตามผลของกระแส
3. การออกแบบหม้อแปลงให้ฉนวนสามารถทนได้ขณะเกิดความผิดปกติ ซึ่งจะอยู่ในช่วงเวลารูปคลื่นแรกของการเกิดการลัดวงจร

จุดประสงค์หลักเพื่อพัฒนาการป้องกันแบบผลต่าง และการตรวจจับการเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลง ในการจำลองการเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดและขดลวดลงดินใช้หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 100 kVA มีการวัดสัญญาณจริงเพื่อใช้ในการป้องกันโดยจำลองความผิดปกติทางด้านแรงดันสูงของหม้อแปลง และศึกษาถึงประสิทธิภาพของการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงขนาด 100 kVA 5,500/410 V Dyn จำนวนรอบด้านแรงต่ำ 67 รอบ 2 ชั้น และจำนวนรอบด้านแรงสูง 1,556 รอบ 8 ชั้น มีการทดสอบดังนี้

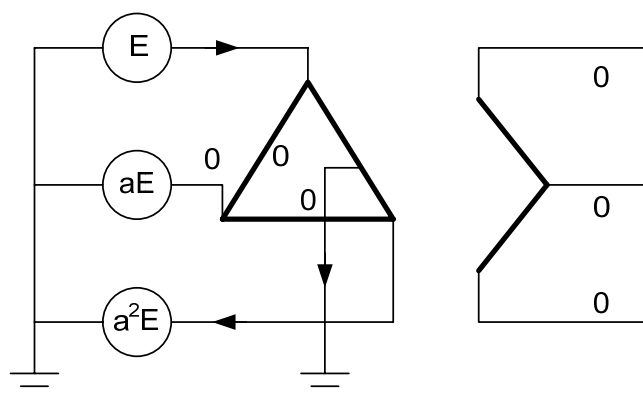
2.1.2.1 การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด



ภาพที่ 2-3 การลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดด้านแรงสูงแบบเคลด้า

ผลการจำลองในกรณีของการลัดวงจรระหว่างขดลวด เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนรอบของการลัดวงจรแล้วทำการวัดค่ากระแสเฟสที่เกิดการลัดวงจร เมื่อจำนวนรอบของขดลวดลัดวงจรมาก ค่ากระแสลัดวงจรจะน้อยในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบของการลัดวงจรเพิ่มขึ้น ขนาดของกระแสลัดวงจรจะถูกจำกัดโดยแหล่งจ่าย

2.1.2.2 การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด



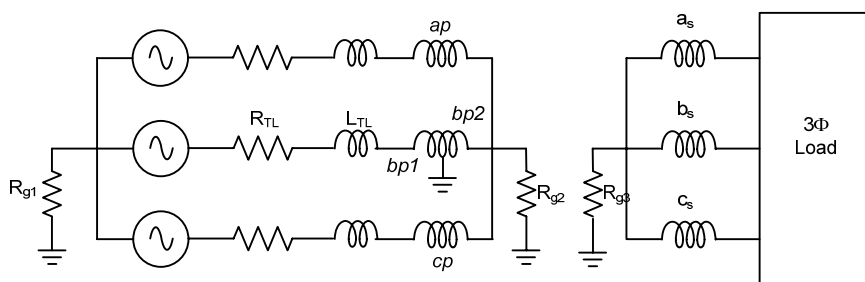
ภาพที่ 2-4 การลัดวงจรลงดินขดลวดด้านแรงสูงแบบเคลด้า

เมื่อตำแหน่งของความผิดปกติเปลี่ยนแปลงตามจำนวนรอบขดลวดทำให้กระแสความผิดปกติสูงในช่วงแรกแล้วจะค่อยๆ ลดลงตามค่ารีเอกแตนซ์ของขดลวดที่เกิดลัดวงจรลงดินจะมีค่าน้อยเมื่อตำแหน่งการลัดวงจรอยู่ใกล้จุดนิวทรัล

สรุปผลการวิเคราะห์การวัดสัญญาณของกระแสความผิดปกติของกรณีลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดจะมีการตรวจจับการทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง กระแสผลต่างจะมีค่าตั้งแต่เกิดการลัดวงจรของขดลวดประมาณ 10 % ผลของกระแสดังกล่าวจะใช้ในการปรับความไวของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง ส่วนที่สำคัญของบทความนี้เป็นการหาค่ากระแสเนื่องจากเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงโดยเปรียบเทียบกับค่าการจำลองบนโปรแกรมเพื่อใช้ในการปรับตั้งค่ากระแสผลต่างของรีเลย์

2.1.3 แบบจำลองความผิดปกติของลงดินภายในหม้อแปลง [7]

วัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาแบบจำลองของความผิดปกติและการประยุกต์วิธีการวัดค่ากระแสความผิดปกติเพื่อใช้ในระบบป้องกันแบบดิจิทัล ในบทความนี้นำเสนอวิธีการจำลองกรณีเกิดการลัดวงจรลงดินภายในจากขดลวดลงสู่ดินของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยทำการจำลองบนโปรแกรม EMTP เพื่อทดสอบหม้อแปลงการพัฒนาแบบจำลองของการลัดวงจรภายในและภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและระบบป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้า แบบจำลองถูกสร้างขึ้นเพื่อจำลองสภาวะของการลัดวงจรจากขดลวดลงสู่ดินโดยใช้วิธีการตาม [4, 5] ด้านปฐมภูมิจะต่อเชื่อมกับสายส่งระยะสั้นซึ่งมีความต้านทานและความเหนี่ยวนำของสายส่ง ทางด้านทุติยภูมิหม้อแปลงจะต่ออยู่กับโหลด เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นขดลวดก็จะแยกหม้อแปลงออกเป็นสองขดลวดย่อยมีกระแสความผิดปกติสูงมาก แต่ในทางปฏิบัติจะมีความต้านทานต่อเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรลงดินแสดงดังภาพที่ 2-5 จากวงจรเป็นการจำลองการลัดวงจรลงดินเฟสเดียวที่ตำแหน่ง 60% ของขดลวด มีค่าความต้านทานต่อลงดินดังนี้ $R_{g1} = 42 \Omega$, $R_{g2} = 0$ และ $R_{g3} = 10 \Omega$ ค่าความต้านทานดังกล่าวจะทำให้ขนาดกระแสความผิดปกติลดลง



ภาพที่ 2-5 การลัดวงจรลงดินของขดลวดด้านแรงสูงเชื่อมต่อกับสายส่งระยะสั้น

สรุปผลของบทความนี้เป็นการจำลองกระแสความผิดปกติลงดิน โดยการต่อความต้านทานเพื่อจำกัดกระแส ซึ่งจะต้องเลือกค่าความต้านทานที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าเพื่อลดความรุนแรง

ของกระแสลัดวงจรลงดิน ในแบบจำลองได้ทำการจำลองและวิเคราะห์ผลกระทบของกระแสลัดวงจรลงดินที่มีต่อระบบไฟฟ้า

2.1.4 แบบจำลองความผิดปกติพ่วงภายในสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของโปรแกรม ATP [8]

การหาวิธีการป้องกันกระแสในสภาวะชั่วขณะ และสภาวะอยู่ตัวของกระแสนั้นต้องออกแบบใช้อุปกรณ์ป้องกันให้เหมาะสมกับระบบ และจะต้องเลือกปรับตั้งค่าวิธีให้ถูกต้องกับผลของกระแสในสภาวะต่างๆ เพื่อให้ระบบป้องกันทำงานไม่ผิดพลาด ซึ่งในบทความนี้นำเสนอหัวข้อสำคัญที่น่าสนใจรวมถึงผลของกระแสในสภาวะต่างซึ่งใช้ในการป้องกันประกอบด้วย

1. ค่าเริ่มต้นกระแสสร้างสนามแม่เหล็กในขณะปลดออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. การกระตุ้นเกินของแกนเหล็กเนื่องจากการลัดวงจรระหว่างรอบ ค่าแรงดันอยู่ตัว และการลดลงของความถี่
3. การลัดวงจรภายในหม้อแปลงซึ่งประกอบด้วย การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดและขดลวดลงดิน

4. การเกิดความผิดปกติพ่วงภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า และความผิดพลาดของอัตราส่วนหม้อแปลงของการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลงขณะทำงาน และการอิ่มตัวของหม้อแปลง

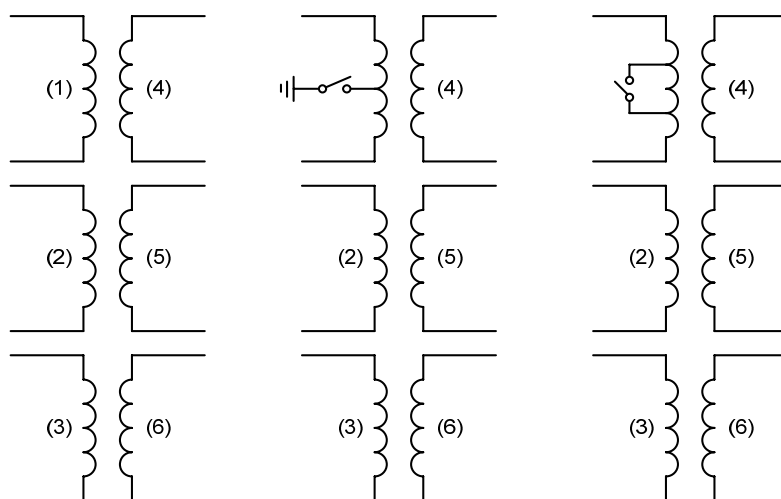
5. เหตุการณ์ล่อแหลมเช่น การสับสวิตช์เมื่อเกิดความผิดปกติพ่วงของหม้อแปลงไฟฟ้า หรือการเกิดความผิดปกติพ่วงภายในเนื่องจากเหตุการณ์จากความผิดปกติพ่วงภายนอก

การตรวจวัดและการบันทึกความผิดปกติ เมื่อเกิดความผิดปกติพ่วงภายในหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นก่อนข้างจะทำได้ยาก ซึ่งการกระทำดังกล่าวนี้จะทำให้ได้ข้อมูลที่สำคัญมากในระบบป้องกันเพื่อทำการวางแผนซ่อมแซมระบบและจะทำให้ระบบการป้องกันนั้นมีประสิทธิภาพ บทความนี้สร้างแบบจำลองบนโปรแกรม ATP แล้วทำการวิเคราะห์ของการลัดวงจรภายในหม้อแปลง ในการสร้างแบบจำลองนี้มีค่าที่ต้องพิจารณาดังนี้

1. ความเหนี่ยวนำภายในและภายนอกซึ่งใช้ข้อมูลการคำนวณการลัดวงจร และการสูญเสียที่แกนเหล็กของหม้อแปลงในโปรแกรม ATP
2. ลีคเกจอินดักแตนซ์แบบการจำลองนี้จะใช้ค่าที่สมมุติขึ้นมาแต่ในทางปฏิบัตินั้น ค่านี้จะขึ้นอยู่กับแกนเหล็ก
3. ความแม่นยำของแบบจำลองจะขึ้นอยู่กับค่าลีคเกจอินดักแตนซ์ในแต่ละรอบของขดลวดขณะเกิดการลัดวงจรแบบจำลองนี้ เป็นการจำลองสัญญาณกระแสขณะเกิดความผิดปกติพ่วงภายในโดยกำหนดค่าลีคเกจแฟกเตอร์ระหว่างขดลวดที่ลัดวงจรเท่ากับ 1
4. การวัดเป็นสิ่งที่สำคัญในการวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้า โดยเฉพาะสเปกตรัมความกว้างของความถี่จะเกี่ยวข้องกับคำตอบสนองทางความถี่จะได้จากการทดสอบของหม้อแปลง

5. ความเข้มของสนามแม่เหล็ก เป็นวิธีการวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้แบบจำลองมีแม่นยำมากและสมบูรณ์ในการออกแบบ

การสร้างแบบจำลองการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงนั้น ได้ทำการสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม ATP โดยใช้วงจรการลัดวงจรดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 วงจรการสร้างแบบจำลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงโดยโปรแกรม ATP

แบบจำลองสถานะการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลง ใช้วงจร RL เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองแล้วทำการเปลี่ยนแปลงเมตริกตามเงื่อนไขของความผิดปกติ นำค่าที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงป้อนค่าลงใน BCTRAN ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม ATP โปรแกรมจะทำการประมวลผลข้อมูลได้ผลลัพธ์เป็น [R]-[L] เอาท์พุทไฟล์ (*.pch file) เมื่อเกิดความผิดปกติ ค่าของ [R] และ [L] ก็เปลี่ยนแปลงตามด้วยเพราะฉะนั้นต้องบันทึกข้อมูลเป็น Includable File (*.lib file) แล้วก็นำกลับไปยังแบบจำลองของ ATP ในไฟล์ *.Lib ซึ่งประกอบด้วยวงจร RL เมื่อเกิดความผิดปกติ

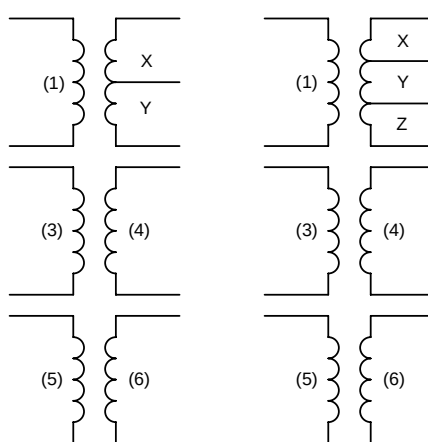
2.1.5 การจำลองแบบดิจิทัลของปรากฏการณ์ของหม้อแปลงแรงดันสูงของ โดยเฉพาะการอ้างอิงความแม่นยำของการตรวจจับของความผิดปกติ [9]

การพัฒนาเทคนิคเพื่อตรวจจับความผิดปกติให้เกิดความแม่นยำ โดยการสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับจำลองกระแสในสถานะชั่วขณะขณะการเกิดความผิดปกติ และกระแสสร้างสนามแม่เหล็กขณะเกิดการกระตุ้นวิธีการการแยกแยะระหว่างกระแสสร้างสนามแม่เหล็กและความผิดปกติภายในประกอบด้วยความผิดปกติสมมาตร และความผิดปกติไม่สมมาตรในขณะเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดลงดิน และระหว่างรอบของขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

รวมทั้งผลกระทบของหม้อแปลงกระแส (CT) เนื่องจากการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก การพัฒนาระบบการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายใต้สภาวะการใช้งานจริงเมื่อเกิดความผิดปกติ โดยการแยกแยะความผิดปกติภายในและกระแสกระตุ้นสร้างสนามแม่เหล็ก

2.1.5.1 แบบจำลองของการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

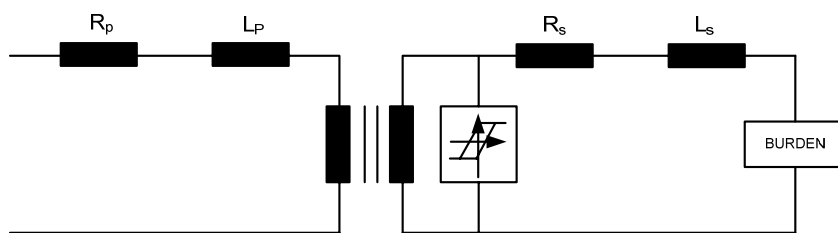
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วย การลัดวงจรจากขดลวดลงดิน และการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดโดยใช้วิธีการตามงานวิจัยในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ



ภาพที่ 2-7 การเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

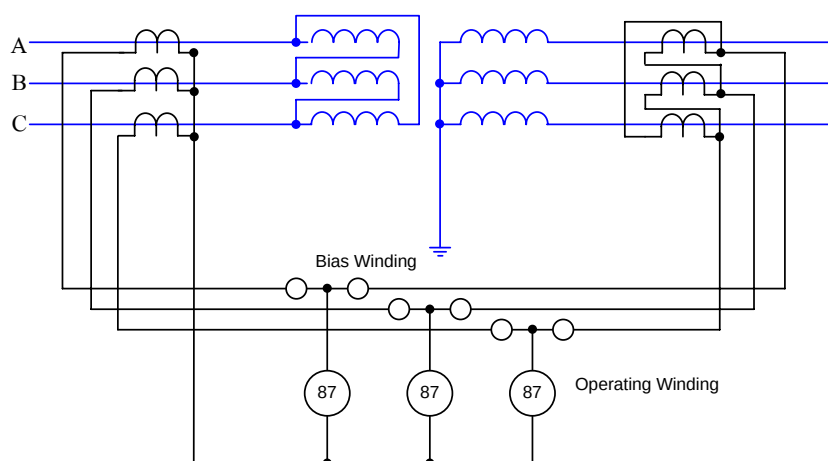
2.1.5.2 การออกแบบหม้อแปลงกระแส (CT)

หม้อแปลงกระแสนั้นใช้สำหรับตรวจวัดค่ากระแสผลต่างของหม้อแปลงทั้งสองด้าน แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบและประมวลผลในรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง หม้อแปลงกระแสที่ใช้ขดลวดในการเหนี่ยวนำนั้นจะมีกระแสสร้างสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กในแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำในแกนเหล็กเปลี่ยนแปลงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear) ขึ้นอยู่กับเส้นโค้งสร้างสนามแม่เหล็ก (B-H curve) จนกระทั่งเกิดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กในขดลวด สิ่งที่ได้กล่าวมานั้นจะทำให้ได้กระแสที่ไม่ถูกต้อง เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สร้างแบบจำลองของหม้อแปลงกระแส (CT) แสดงดังภาพที่ 2-8 เพื่อใช้จำลองสภาวะดังกล่าวให้ใกล้เคียงกับระบบไฟฟ้าจริง



ภาพที่ 2-8 วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแส (CT)

บทความนี้จำลองปรากฏการณ์กระแสความผิดพลาดโดยใช้หม้อแปลงขนาด 11 kV/132 kV โดยด้าน 11 kV เชื่อมต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและด้าน 132 kV เชื่อมกับระบบส่งจ่ายไฟฟ้า วิธีการต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้านั้นประกอบด้วย $Y-\Delta$, $\Delta-Y$ และ Y_0-Y_0 ในงานวิจัยนี้ต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแบบ Y_0-Y_0 พร้อมทั้งติดตั้งรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างเพื่อตรวจเช็คค่ากระแสที่ผิดปกติของหม้อแปลง แสดงดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 การต่อวงจรป้องกันหม้อแปลงโดยใช้การตรวจเช็คกระแสผลต่างของรีเลย์

ในการทดสอบได้จำลองการเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงนั้น ได้ทำการจำลองตามเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

1. การเกิดความผิดพลาดแบบสามเฟสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
2. การเปลี่ยนตำแหน่งของการเกิดความผิดพลาดจากขดลวดจนถึงจุดนิวทรัล
3. การกระตุ้นหม้อแปลงขณะไม่จ่ายโหลด

2.1.5.3 ผลกระทบจาก CT เนื่องมาจากการเกิดความผิดปกติขึ้นภายใน

- ก) ผลกระทบจากมุมเริ่มต้นของการวัดกระแสของ CT
- ข) ผลกระทบเนื่องจากฟลักแม่เหล็กตกค้างใน CT
- ค) ผลต่างของเบอร์เดนทางด้านทฤษฎีของ CT

2.1.5.4 ผลกระทบจากกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

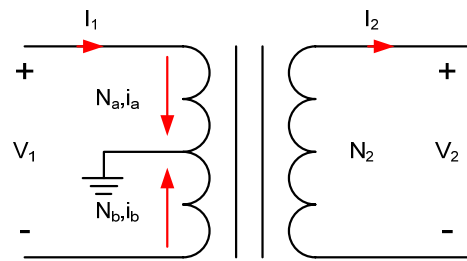
- ก) การกระตุ้นหม้อแปลงไฟฟ้า
- ข) ฟลักแม่เหล็กตกค้าง
- ค) ความแตกต่างของการต่อขดลวด
- ง) ผลกระทบเนื่องจากความผิดปกติภายนอก

บทความนี้จะเป็นการสร้างแบบและวิธีการจำลอง เพื่อให้ได้ความแม่นยำในการตรวจจับความผิดปกติในสถานะต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย สถานะชั่วขณะ, ผลกระทบจากหม้อแปลงกระแสภายใต้สถานะการเกิดความผิดปกติภายในและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก ภายใต้เงื่อนไขการลัดวงจร ขดลวดลงดินและระหว่างขดลวด และผลกระทบของ CT ขณะเกิดการอิ่มตัว ของกระแสความผิดปกติสมมาตรและไม่สมมาตร เป็นการพัฒนาเทคนิคในการใช้กับวิธีป้องกันแบบผลต่างของระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง การใช้วิธีป้องกันแบบผลต่างเพื่อให้เกิดความแม่นยำและพัฒนาาระบบการป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

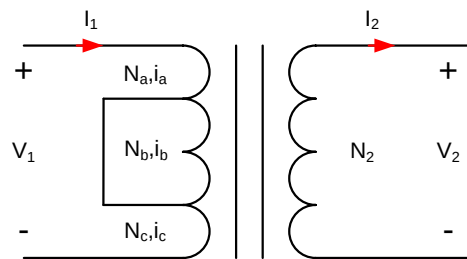
2.1.6 คุณสมบัติของค่าพารามิเตอร์ในหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องมาจากความผิดปกติภายในขดลวดจากการทดลอง [10]

เป็นการทดสอบหม้อแปลงขนาด 1 เฟส ในระบบจำหน่ายเพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดความผิดปกติภายในขดลวด โดยการต่อแท่งจากขดลวดออกมาภายนอกเพื่อทำการทดสอบและประเมินผลเปรียบเทียบค่ากระแสและแรงดัน ในการทดสอบนั้นใช้หม้อแปลงขนาด 25 kVA 60 Hz 7200/240/120 V ต่ออยู่กับโหลดขนาด 25 kW ทำการทดสอบในระดับแรงดันต่ำเพื่อศึกษาความเสียหายของหม้อแปลงในระหว่างความผิดปกติ การทดสอบหม้อแปลงขณะเกิดความผิดปกติภายใน แสดงดังภาพที่ 2-9 นั้นประกอบด้วย

1. การลัดวงจรจากขดลวดลงดินและระหว่างรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ
2. การลัดวงจรจากขดลวดลงดินและระหว่างรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ



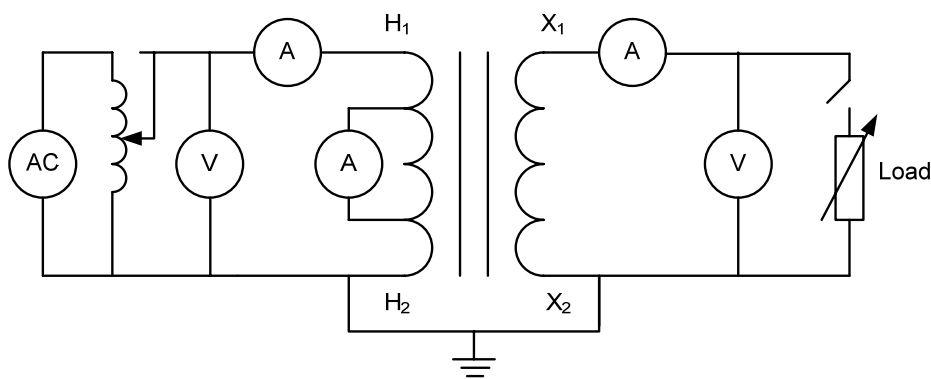
ก) การลัดวงจรจากขดลวดลงดิน



ข) การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด

ภาพที่ 2-10 การลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าในการทดสอบด้านปฐมภูมิ

การลัดวงจรภายในขดลวดทั้งสองกรณีนั้นใช้การทดสอบจริง ซึ่งมีวงจรในการวัดผลของกระแสและแรงดันแสดงดังภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-11 วงจรในการทดสอบการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

ผลการทดสอบในกรณีที่เกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดจริงทางด้านปฐมภูมินั้น ค่าของกระแสจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อจำนวนรอบในการลัดวงจรเพิ่มมากขึ้น โดยแรงดันคงที่ด้านปฐมภูมิขนาด 100 V แต่เมื่อจ่ายโหลดความต้านทานขนาด 2.304 โอห์ม กระแสที่ไหลไปสู่โหลดจะเป็นสัดส่วนโดยตรง

กับแรงดันด้านทุติยภูมิเพราะว่าแรงดันด้านทุติยภูมิลดลง ในขณะที่จำนวนรอบของการลัดวงจรเพิ่มขึ้น ส่วนผลการทดสอบการลัดวงจรจากขดลวดลงดินนั้นกระแสด้านปฐมภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ในขณะที่แรงดันด้านทุติยภูมิลดลงเมื่อจำนวนรอบของการลัดวงจรเพิ่มขึ้น

บทสรุปบทความนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบจริงกับการจำลองแรงดันที่ชั่ว และกระแสโดยมีองค์ประกอบที่จะต้องพิจารณาคือ

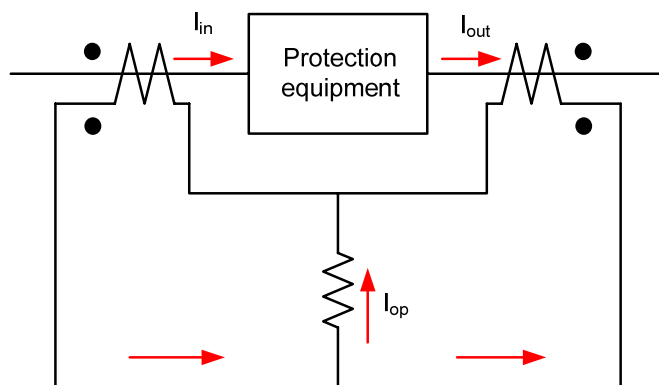
1. แรงดันที่ใช้ในการทดสอบจริงนั้น มีความแตกต่างกับการจำลองเพราะในระบบจริงนั้นจะมีสัญญาณรบกวนต่างๆ
2. ลีเกจแฟกเตอร์เป็นค่าที่สมมุติหรือไม่นำมาพิจารณา โดยสมมุติค่าให้เท่ากับศูนย์เพราะมีค่าน้อยมาก เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญ
3. สายที่ใช้ในการเชื่อมต่อตำแหน่งของแท่งบนแผงลูกออกแบบ โดยเป็นตัวด้านทานอย่างเดียว

2.2 การป้องกันแบบผลต่างหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

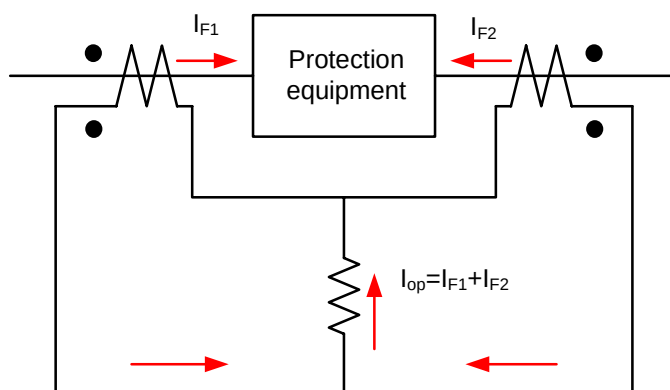
รายละเอียดส่วนนี้ ทำการศึกษาค้นคว้าบทความที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้า การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง การปรับตั้งค่ารีเลย์และผลกระทบของกระแสในสถานะต่างๆ ต่อการทำงานของรีเลย์ ซึ่งมีบทความที่สำคัญดังนี้

2.2.1 ผลกระทบของฮาร์โมนิกสับรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างสำหรับหม้อแปลง [11]

เนื่องจากปัจจุบันนั้นมีการใช้อุปกรณ์สวิตซ์มากขึ้น จึงทำให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิกสับในระบบไฟฟ้า บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์โมนิกสับต่อการทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างและปัญหาการทำงานของหม้อแปลงกระแส CT เนื่องมาจากความถี่ตอบสนองโดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนโปรแกรม EMTP เปรียบเทียบกับการทดสอบจริง จากการทดสอบดังกล่าวเป็นส่วนสำคัญของการพิจารณาออกแบบระบบป้องกันแบบผลต่างในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์โมนิกสับต่อการทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง



ภาพที่ 2-12 กระแสการทำงาน (Operating Current) ในสภาวะปกติ



ภาพที่ 2-13 กระแสการทำงาน (Operating Current) เมื่อเกิดความผิดปกติภายใน

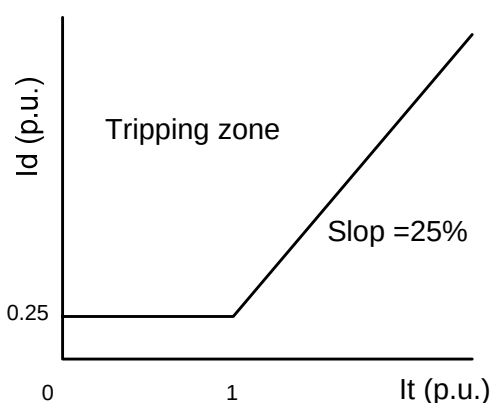
ผลที่ได้จากงานวิจัยนำไปใช้ออกแบบรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง กำหนดส่วนประกอบของฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ขณะเกิดกระแสกระตุ้นไม่น้อยกว่า 15 % ของส่วนประกอบหลัก และขณะเกิดการลัดวงจรจะมีส่วนประกอบกระแสตรงในฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ไม่น้อยกว่า 7 % ของส่วนประกอบหลัก ซึ่งกระแสกระตุ้นสร้างสนามแม่เหล็กและกระแสลัดวงจรจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างต้องออกแบบโดยไม่ให้ทำงานเมื่อเกิดฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้น

บทสรุปการจำลองผลการทดสอบ CT ไม่สามารถทำงานได้ดีในทุกความถี่ของ ค่าสูงสุดของกระแสกระตุ้นสร้างสนามแม่เหล็กและกระแสอิ่มตัวของ CT ทำให้การทำงานของรีเลย์ผิดพลาดในการทดสอบจริงนั้นการวัดค่าทำได้ยาก ดังนั้นจึงทดสอบการลัดวงจรภายในและภายนอกโดยการตรวจสอบส่วนประกอบของฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 และ 5 และลำดับอื่นๆ สำหรับการทดสอบจริงรีเลย์แบบผลต่างจะไม่ทำงานเมื่อมีฮาร์โมนิกส์เพิ่มขึ้นในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น รีเลย์ใช้เวลาในการตัดวงจรเป็นอัตราส่วนกับความถี่และฮาร์โมนิกส์หรือรีเลย์ไม่ตัดวงจรอีกต่อไป เมื่อเกิดการลัดวงจร

ภายในส่วนประกอบของฮาร์โมนิกส์จะทำให้การทำงานของรีเลย์ช้า รีเลย์ไม่สามารถตัดวงจรเมื่อมีฮาร์โมนิกส์ที่ 3 มากกว่า 66.66 % ของความถี่หลัก จุดที่สำคัญก็คือเวลาในการตัดวงจรจะหน่วงเวลาเมื่อมีฮาร์โมนิกส์ บทความนี้สามารถนำไปประยุกต์เพื่อช่วยในการออกแบบระบบการป้องกันแบบผลต่าง

2.2.2 การปรับปรุงความไวของดิจิทัลรีเลย์ ป้องกันผลต่างสำหรับการป้องกันการลัดวงจรลงดินภายในหม้อแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแท๊ป [12]

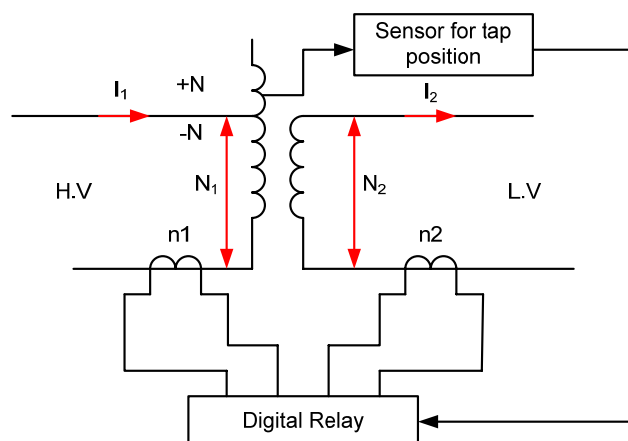
เป็นวิธีการพัฒนาความไวของดิจิทัลรีเลย์ป้องกันผลต่าง เพื่อใช้ในการตรวจจับการป้องกันความผิดปกติลงดินในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ Δ -Y ที่มีการเปลี่ยนแท๊ป วิธีการนี้จะนำไปประยุกต์ใช้กับรีเลย์แบบผลต่างเพื่อปรับปรุงให้มีความไวในการตรวจจับความผิดปกติภายใน หม้อแปลงเปลี่ยนแท๊ปของหม้อแปลงแล้วเกิดการลัดวงจรลงดินจะทำให้เกิดกระแสสูง ในการป้องกันนั้นจะใช้รีเลย์ป้องกันผลต่างแบบเปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 2-14 คุณสมบัติรีเลย์ป้องกันผลต่างแบบเปอร์เซ็นต์

การป้องกันหม้อแปลงนั้น จะใช้การป้องกันแบบผลต่างในการตรวจจับความผิดปกติภายในหม้อแปลง แต่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแท๊ปของหม้อแปลงจะทำให้กระแสเปลี่ยนแปลงตามด้วยแสดงดังภาพที่ 2-15 จึงจำเป็นต้องปรับค่าของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างใหม่ในการประมวลผลและส่งสัญญาณไปตัดวงจรออกจากระบบ โดยทั่วไปในการปรับตั้งค่าจะให้ความชันประมาณ 25 % รีเลย์ป้องกันผลต่างแบบเปอร์เซ็นต์นั้นสามารถปรับตั้งค่าความชันได้ ในคุณสมบัติของเปอร์เซ็นต์ของความชันซึ่งจะบอกถึงการทำงานไม่สมดุลประกอบด้วย

1. การเปลี่ยนแท๊ปของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ความแตกต่างระหว่างกระแสของ CT และพิกัดกระแสของรีเลย์
3. ความแตกต่างระหว่าง ความผิดพลาดของกระแสหม้อแปลงของหม้อแปลงด้านใดด้านหนึ่ง

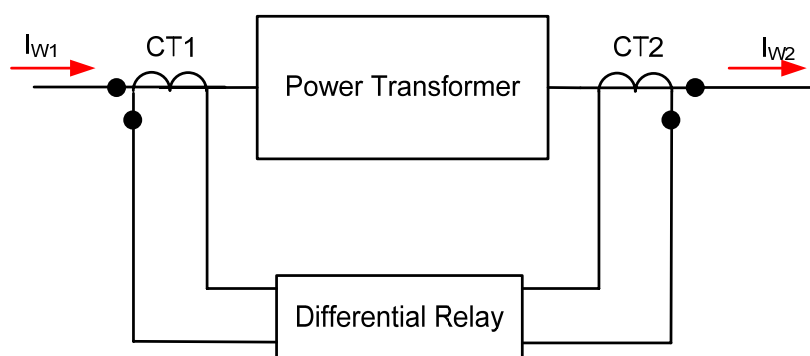


ภาพที่ 2-15 การตรวจวัดกระแสผลต่างเมื่อมีการเปลี่ยนแท็ปขดลวดหม้อแปลง

บทสรุปเป็นการปรับปรุงวิธีการปรับตั้งค่ารีเลย์แบบผลต่าง เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินภายในหม้อแปลงโดยทำการปรับตั้งความชันไว้ที่ 25% ก็จะสามารถป้องกันขดลวดได้ 100 % ของขดลวดทั้งหมดเป็นงานวิจัยเพื่อหาค่ากระแสปรับตั้งของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งแท็ปของขดลวดหม้อแปลง

2.2.3 การพัฒนาการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยใช้รีเลย์เชิงตัวเลข [13]

บทความนี้ได้ปรับปรุงการป้องกันผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในการป้องกันนั้นจะประกอบด้วย การลัดวงจรภายใน กระแสพุ่งเข้าสร้างสนามแม่เหล็กและเงื่อนไขการกระตุ้นเกินวงจรการด้านฮาร์โมนิกส์และเทคนิคการปิดกั้นสัญญาณเมื่อเกิดฮาร์โมนิกส์ในกระแสผลต่าง รีเลย์จะต้องไม่ทำงาน



ภาพที่ 2-16 เขตการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง

รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างใช้หลักการเปรียบเทียบกระแสผลต่าง (I_{OP}) กับกระแสด้านการทำงาน (I_{RT}) โดยการรวมกันทางเฟสเซอร์

$$I_{OP} = \left| \frac{\sum \vec{I}_{W1}}{I_{W1}} + \frac{\sum \vec{I}_{W2}}{I_{W2}} \right| \quad (2-8)$$

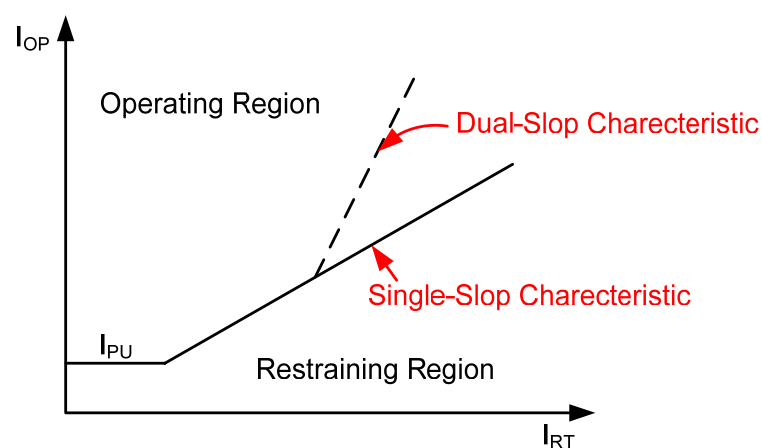
กระแสผลต่าง (I_{OP}) จะเป็นสัดส่วนกับกระแสความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง ในอุดมคติจะมีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับคุณสมบัติของกระแสด้านการทำงานของรีเลย์ (I_{RT}) ทั้งหมดจะรวมอยู่ในคุณลักษณะของรีเลย์ประกอบด้วย

$$I_{RT} = k \left| \frac{\sum \vec{I}_{W1}}{I_{W1}} + \frac{\sum \vec{I}_{W2}}{I_{W2}} \right| \quad (2-9)$$

$$I_{RT} = k \left(\left| \frac{\sum \vec{I}_{W1}}{I_{W1}} \right| + \left| \frac{\sum \vec{I}_{W2}}{I_{W2}} \right| \right) \quad (2-10)$$

$$I_{RT} = M a x \left(\left| \frac{\sum \vec{I}_{W1}}{I_{W1}} \right|, \left| \frac{\sum \vec{I}_{W2}}{I_{W2}} \right| \right) \quad (2-11)$$

โดยค่า k เลือกใช้ค่า 1 หรือ 0.5 ในสมการที่ (2-9) และ (2-10) เป็นการประยุกต์เมื่อรีเลย์มีจุดของกระแสด้านการทำงาน 2 จุด ซึ่งเป็นแบบความชันคู่โดยมีค่ากระแสเริ่มต้นทำงานต่ำสุดที่ I_{PU} แสดงดังภาพที่ 2-17



ภาพที่ 2-17 คุณลักษณะของรีเลย์ป้องกันผลต่างแบบ 2 ความชัน

ข้อพิจารณาประกอบการใช้รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จะทำให้กระแสผลต่างเกิดการเปลี่ยนแปลงมีดังนี้

1. ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนของ CT และอัตราส่วนของหม้อแปลง
2. อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงแท็ปของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
3. มุมต่างเฟสของกระแสการเลื่อนเฟสระหว่างหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของการต่อแบบเดลต้า-วาย
4. กระแสกระตุ้นสร้างสนามแม่เหล็ก
5. การเกิดการกระตุ้นเกินของหม้อแปลงไฟฟ้า
6. การอิ่มตัวของ CT

ปัญหาของรีเลย์ป้องกันผลต่างแบบเปอร์เซ็นต์ในการทำงานผิดพลาดมีสาเหตุต่างๆ เช่น การต่อหม้อแปลงกระแส CT การเลื่อนเฟสของหม้อแปลงกระแส CT การแยกกันระหว่างการเกิดกระแสการลัดวงจรภายในกับกระแสพุ่งเข้าสร้างสนามแม่เหล็ก การกระตุ้นเกินของหม้อแปลงไฟฟ้า สิ่งที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้จะทำให้รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างทำงานผิดพลาด บริษัทผู้ผลิตจะต้องออกแบบรีเลย์ป้องกันให้ครอบคลุมปัญหาดังกล่าวด้วย

สรุปคุณลักษณะของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างแบบ 2 ความชัน (Dual slope) ดังนี้

1. ป้องกันการทำงานที่ผิดพลาดของรีเลย์ เนื่องจากเกิดกระแสผลต่างจากการเปลี่ยนแท็ปของหม้อแปลง
2. ป้องกันความผิดพลาดของรีเลย์จากการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กของ CT
3. รีเลย์ที่มีความชันเดียว (Single Slope) เมื่อกระแสลัดวงจรสูงจะทำให้ความไวในการทำงานของรีเลย์ลดลง

2.3 สรุปผลการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้น เป็นการสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรภายในขดลวด โดยการนำข้อมูลเบื้องต้นจากการทดสอบหม้อแปลงในสถานะเปิดวงจร (Open-circuit Test) และการทดสอบขณะลัดวงจร (Short-circuit Test) มาใส่ค่าลงใน BCTRAN ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม ATPDraw 3.5 จะทำให้ได้ค่าความต้านทาน [R] และค่าความเหนี่ยวนำ [L] แล้วนำค่าที่ได้นั้นไปออกแบบหม้อแปลงในสถานะปกติ แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดก็จะทำให้แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงโดยมีขนาดเพิ่ม เพราะฉะนั้นจึงต้องทำการคำนวณหาความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดย่อยที่เกิดการลัดวงจร ซึ่งจะมีค่าความเหนี่ยวนำร่วมกับขดลวดอื่นๆ รวมอยู่ด้วย โดยการคำนวณนั้นจะใช้ความสัมพันธ์ตามกฎ 3 ข้อ ประกอบด้วย Consistency, Leakage Factor และ Proportionality ซึ่งมีค่าที่สำคัญก็คือ ลีคเกจแฟกเตอร์ ในงานวิจัยที่สำรวจมานั้น

ส่วนมากใช้การประมาณค่าขึ้นมา แต่ค่าของลิกเกอร์แอกแตนชันนั้นมีค่าน้อยมากจึงกำหนดค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อทำการสร้างแบบจำลองแล้วนั้นจึงนำมาทดสอบกับระบบไฟฟ้าโดยส่วนมากจะใช้การจำลองบนโปรแกรม ATP แล้วทำการวิเคราะห์ผลของกระแสลัดวงจรและกระแสผลต่างเพื่อใช้ในการปรับตั้งรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง

รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างจะทำงานภายใต้การป้องกันหม้อแปลง ซึ่งถูกกำหนดโดยหม้อแปลงกระแส CT อาศัยการเปรียบเทียบกระแส ในสภาวะปกตินั้นจะมีกระแสผลต่างเท่ากับศูนย์แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นภายในจะทำให้เกิดกระแสผลต่างขึ้นรีเลย์ก็จะทำงาน โดยการปรับตั้งค่าจะใช้คุณสมบัติของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง ซึ่งจะต้องมีการปรับตั้งค่าความชันเพื่อป้องกันการทำงานเมื่อเกิดการลัดวงจรภายนอกหม้อแปลง ความชันนี้นั้นเป็นการปรับความไวในการทำงานของรีเลย์ป้องกัน การที่จะได้ค่าที่ถูกต้องก่อนจะนำไปเปรียบเทียบนั้นก็จะมีผลของกระแสมากมายเช่น กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก ความคลาดเคลื่อนจากหม้อแปลงกระแส CT ผลของฮาร์โมนิกส์ สิ่งต่างๆ ได้กล่าวมาแล้วบริษัทผู้ผลิตจะต้องทำการออกแบบรีเลย์เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว จะทำให้รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

บทที่ 3

ทฤษฎีเกี่ยวกับการป้องกันหม้อแปลง

รายละเอียดของเนื้อหาจะกล่าวถึงกระแสลัดวงจรจากการต่อหม้อแปลงแบบต่างๆ การเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง การคำนวณหาค่าของกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติและกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของหม้อแปลง เมื่อทราบค่ากระแสลัดวงจรแล้วนั้น นำค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณมาทำการปรับตั้งรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง ซึ่งมีรายละเอียดทั้งหมดดังต่อไปนี้

3.1 ความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในระบบไฟฟ้า ใช้สำหรับส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ เมื่อเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้เกิดไฟฟ้าดับ รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างต้องตรวจจับที่เกิดความผิดปกติออกอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันความเสียหายต่ออุปกรณ์และทำการซ่อมแซมให้กลับสู่สภาวะปกติให้ใช้งานได้ ความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงนั้นส่วนมากเกิดจากการลัดวงจรภายในขดลวด [14] การลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้านั้นขนาดของกระแสความผิดปกติจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

1. อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Impedance Source)
2. อิมพีแดนซ์นิวทรัลลงดิน (Neutral Earthing Impedance)
3. ความต้านทานรั่วไหลของขดลวดหม้อแปลง (Leakage Reactance)
4. แรงดันที่เกิดความผิดปกติ (Fault Voltage)
5. การต่อขดลวดของหม้อแปลง

สาเหตุของความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะแตกต่างกันออกไปในแต่ละกรณี ทำให้ขนาดของกระแสลัดวงจรนั้นต่างกันด้วยดังนี้

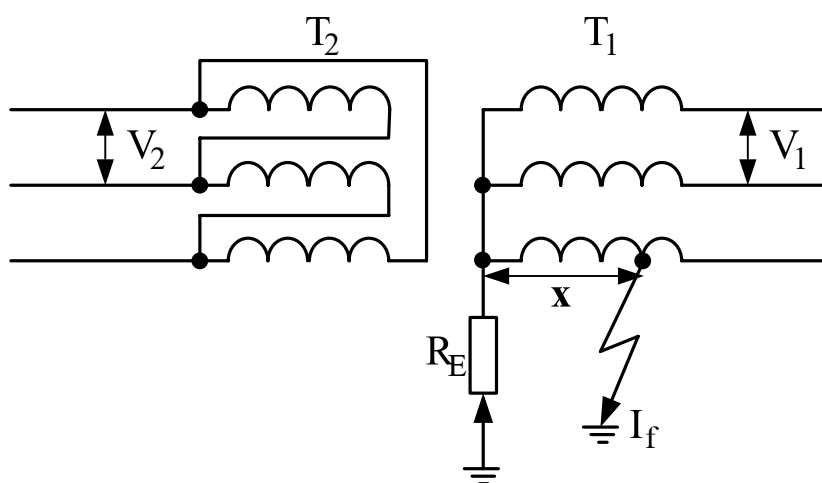
3.1.1 การผิดปกติลงดินจากการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า (Earth Fault Current on Transformer Winding) [14]

การผิดปกติลงดินเป็นความผิดปกติชนิดหนึ่งที่สำคัญในหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินขึ้นอยู่กับวิธีการต่อลงดิน, ขนาดของความต้านทานที่ต่อลงดินและวิธีการต่อหม้อแปลง การหาขนาดของกระแสลัดวงจรลงดินนั้น จะนำส่วนประกอบลำดับศูนย์มาใช้ในการคำนวณด้วย โดยค่ากระแสผิดปกติลงดินขึ้นอยู่กับวิธีการต่อขดลวดลงดินแบบต่างๆ ดังนี้

1. การต่อหม้อแปลงแบบสตาร์ที่นิวทรัลลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ (Star-Connected Winding with Neutral Point Earthed through an Impedance)

เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงลงสู่ดิน กระแสผิดพลาดจะไหลผ่านค่าอิมพีแดนซ์ลงดินดังภาพที่ 3-1 ปริมาณกระแสจะถูกจำกัดโดยค่าอิมพีแดนซ์และตำแหน่งในการเกิดความผิดพลาดจากจุดนิวทรัล (Neutral) ขนาดของแรงดันที่เกิดความผิดพลาดนั้น ก็จะเป็นสัดส่วนกับระยะทาง [14]

สำหรับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ขดลวดทุติยภูมิจะแปรผันตรงกับตำแหน่งที่ลัดวงจร กล่าวคือ เมื่อตำแหน่งของการลัดวงจรอยู่ห่างจากนิวทรัลมากกระแสลัดวงจรก็จะมากตามไปด้วยดังสมการที่ 3-3 ส่วนกระแสลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของหม้อแปลงโดยกระแสลัดวงจรจะแปรผันกำลังสอง ขนาดของกระแสความผิดพลาดและกระแสในขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงแสดงดังภาพที่ 3-2 ถ้าตำแหน่งการเกิดความผิดพลาดอยู่ใกล้จุดนิวทรัลปริมาณกระแสในขดลวดปฐมภูมิจะน้อยเพราะฉะนั้นการตรวจจับค่ากระแสในขดลวดปฐมภูมินั้นจะทำได้ยาก



ภาพที่ 3-1 การต่อความต้านทานลงดินที่ขดลวดสตาร์

พิกัดของกระแส Full load current ถูกจำกัดโดยความต้านทานที่ต่อลงดิน R_E

$$\text{เมื่อ} \quad I_{FL} = \frac{V_1}{\sqrt{3} R_E} \quad (3-1)$$

กำหนดให้ $V_1 = V_2$ และ $T_2 = \sqrt{3} T_1$

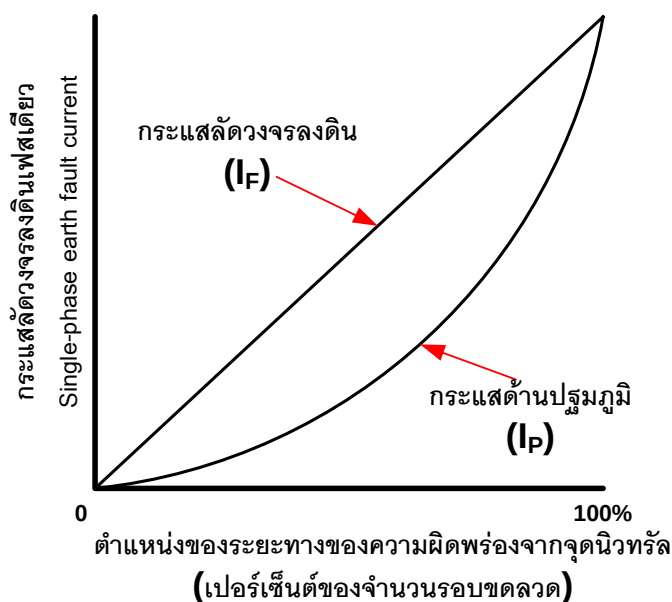
สำหรับความผิดพลาดที่ตำแหน่ง X p.u. จากจุดนิวทรัล

$$I_f = \frac{X^{\Delta} V_1}{\sqrt{3} R} \quad (3-2)$$

อัตราส่วนของหม้อแปลงเท่ากับ T_2 / xT_1

เพราะฉะนั้น

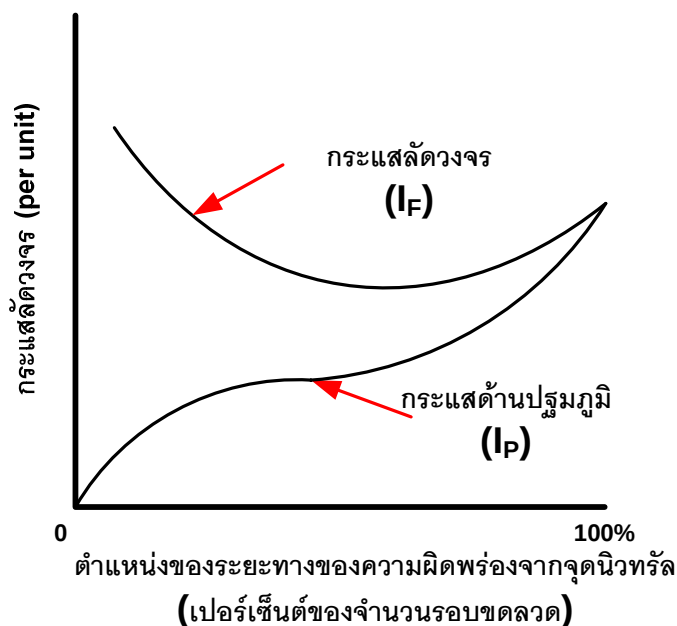
$$\begin{aligned} I_{\text{primary}} &= \frac{x^{\Delta} V_1}{\sqrt{3} R} \frac{x^{\Delta} T_1}{T_2} \\ &= x^2 I_{F.L} \frac{1}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (3-3)$$



ภาพที่ 3-2 กระแสลัดวงจรดินที่ขดลวดสตาร์ต่อความต้านทานลงดิน

2. การต่อหม้อแปลงแบบสตาร์ที่นิวทรัลลงดินอย่างเดี่ยว (Star-connected Winding with Neutral Point Solidly Earthed) [14, 15]

กระแสลัดวงจรจะถูกจำกัดโดยค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหล (Leakage Reactance) ของขดลวด ซึ่งจะเปลี่ยนตามตำแหน่งการลัดวงจรตลอดความยาวของขดลวด เมื่อเกิดการลัดวงจรใกล้จุดนิวทรัล จะมีกระแสลัดวงจรสูง เพราะว่าที่จุดนิวทรัลต่อลงดินอย่างเดี่ยวไม่มีการต่อค่ารีแอคแตนซ์เพื่อจำกัดขนาดของกระแสลัดวงจร ตำแหน่งของการลัดวงจรจะมีผลต่อขนาดของกระแสลัดวงจรจะมีกระแสสูงเมื่อเกิดการลัดวงจรใกล้จุดนิวทรัลแล้วค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งตำแหน่งของการลัดวงจรอยู่ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ กระแสก็จะเปลี่ยนเพิ่มขึ้น เพราะว่าค่ารีแอคแตนซ์ลดลง แสดงดังภาพที่



ภาพที่ 3-3 กระแสผิดพลาดลงดินที่ขดลวดสตาร์ต่อลงดินเพียงอย่างเดียว

เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ขดลวดทุติยภูมิใกล้จุดนิวทรัล กระแสลัดวงจรจะมีค่าสูงกว่ากรณีการต่อนิวทรัลลงดินผ่านความต้านทาน

3. การต่อหม้อแปลงแบบเดลต้า (Delta-connected Winding)

ในส่วนการต่อขดลวดแบบเดลต้าจะไม่มีส่วนใดของขดลวดต่อลงดิน ดังนั้นค่ากระแสลัดวงจรจะน้อยกว่าการต่อแบบสตาร์ ค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเกิดความผิดพลาดจะมีค่าสูง [14] ขณะที่แรงดันก่อนเกิดการลัดวงจรมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันเฟสทำให้กระแสความผิดพลาดมีค่าไม่เกินกระแสฟลักซ์ของหม้อแปลง

3.1.2 การผิดพลาดภายในหม้อแปลง (Internal Fault)

การเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้สรุปสาเหตุสำคัญที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้

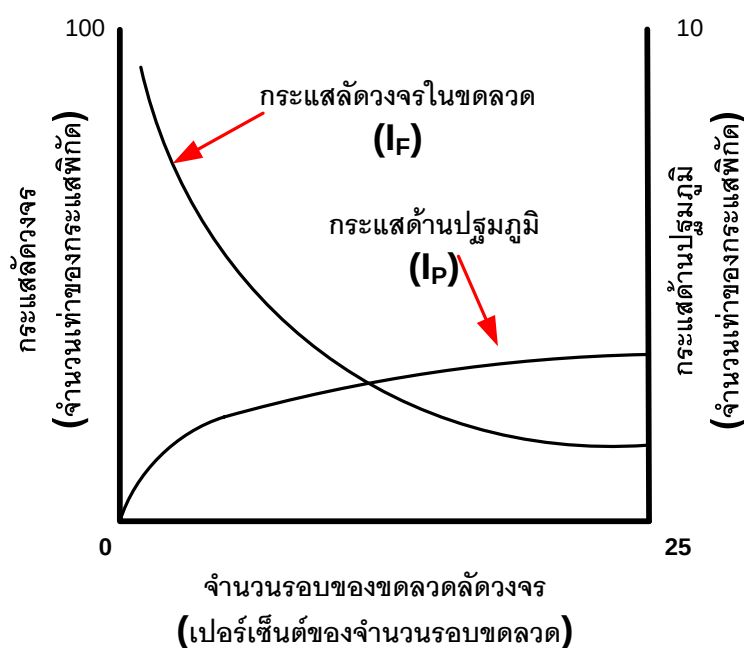
1. การลัดวงจรระหว่างเฟส (Phase to Phase Faults)

การเกิดความผิดพลาดระหว่างเฟสของหม้อแปลงมักจะไม่ค่อยเกิดขึ้น [15] แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสจะมีค่ากระแสสูงสุดซึ่งพิจารณาในช่วงสถานะชัตทรานเซียนต์ มีผลกระทบคล้ายกับการเกิดความผิดพลาดลงดิน [15]

2. การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด (Interturn Faults) [15]

หม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านการสูงนั้นจะต่อกับสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูงบนอากาศ ดังนั้นจะมีโอกาสเกิดแรงดันอิมพัลส์สูง (Steep Fronted Impulse Voltage) สาเหตุอันเนื่องมาจากการเกิดฟ้าผ่า

(Lingtning Strikes) การผิดปกติ (Fault) และการสับวิตซ์ซิ่ง (Switching) เมื่อเกิดเสิร์จที่สายส่ง (Line Surge) จะมีแรงดันเสิร์จเคลื่อนที่เข้ามายังหม้อแปลง มีค่ายอดของแรงดัน (Voltage Peak) สูงกว่าแรงดันที่ปกติ ทำให้เกิดกระแสไหลในวงรอบของขดลวด (Coil Winding) สูงกว่ากระแสที่ขั้วของหม้อแปลงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น คุณสมบัติความเป็นฉนวนของขดลวดเสื่อมสภาพเป็นสาเหตุของการลัดวงจรในขดลวดตัวนำ

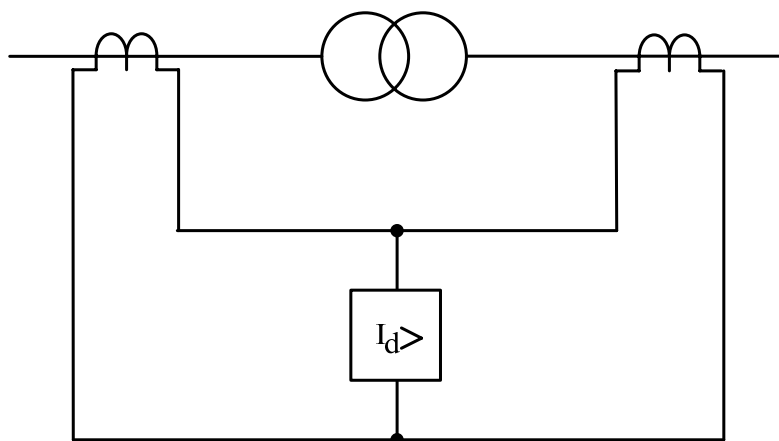


ภาพที่ 3-4 กระแสลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด

ภาพที่ 3-4 เมื่อเกิดการลัดวงจรของขดลวดจำนวนน้อยจะมีขนาดกระแสลัดวงจรสูงหลังจากนั้น กระแสลัดวงจรจะลดลงมาเมื่อจำนวนรอบของการลัดวงจรเพิ่มมากขึ้น

3.2 การป้องกันแบบผลต่าง (Differential Protection)

การป้องกันแบบผลต่างใช้หลักการที่ว่า “ผลรวมของกระแสที่ไหลเข้ามีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลออก” ตามกฎของกระแสของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff Current Law's) โดยอาศัยผลต่างของกระแสของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ภาพที่ 3-5 แสดงหลักการป้องกันแบบผลต่างโดยการต่อหม้อแปลงกระแส (CT) ทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิในลักษณะอนุกรมเพื่อตรวจวัดกระแสและต่อรีเลย์แบบผลต่างเปรียบเทียบกระแสทั้งสอง กระแสผลต่างในสภาวะปกติหรือเมื่อเกิดความผิดปกติภายนอกผลรวมของกระแสจะเท่ากับศูนย์ แต่หากเกิดความผิดปกติขึ้นภายในจะมีผลต่างกระแสเกิดขึ้นรีเลย์ก็จะทำงาน



ภาพที่ 3-5 การป้องกันผลต่างของหม้อแปลง

หลักการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงจะพิจารณาที่สำคัญๆ มีดังนี้ [15]

1. การเลื่อนเฟสที่เกิดจากการต่อขดลวดหม้อแปลง (Phase Correction)
2. ผลกระทบที่เกิดจากการต่อขดลวดลงดิน (Effect of Earthing)
3. อัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส CT (Ratio Correction)
4. ผลกระทบอันเนื่องมาจากกระแสพุ่งเข้าสร้างสนามแม่เหล็ก (Inrush Current)
5. ปรากฏการณ์ของการเกิดขึ้นของฟลักสูงเกิน
6. การเปลี่ยนแท็ปของขดลวดขณะมีโหลด (Onload Tap Changing)

ในวงจรการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงนั้นการทำงานจะอาศัยการเปรียบเทียบเฟสและขนาดของกระแสจากหม้อแปลงกระแส (CT) ซึ่งต้องหาอัตราส่วนของที่เหมาะสมและการชดเชยของสัญญาณกระแสเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องก่อนการประมวลผลที่รีเลย์ ในปัจจุบันนี้รีเลย์ส่วนใหญ่เป็นแบบดิจิทัลรีเลย์จะมีการแก้ไขอัตราส่วนและชดเชยเฟสในซอฟต์แวร์

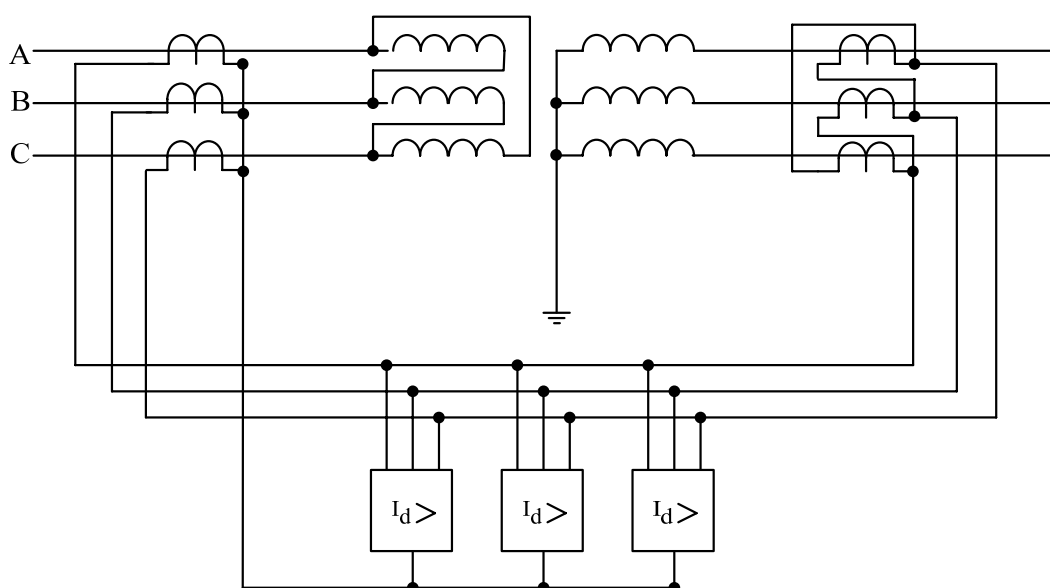
3.2.1 การแก้ไขอัตราส่วน (Ratio Correction)

เนื่องจากกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแส (CT) ทั้งสองจะไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องเลือกขนาดอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส (CT) ให้เหมาะสม โดยจะคำนวณหาค่ากระแสจากฟลักซ์ของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส (CT) เมื่อต่อแบบเดลค่ากระแสจะมากกว่าการต่อแบบสตาร์ $\sqrt{3}$ เท่า เพราะฉะนั้นต้องเลือกไม่ให้เกินขนาดฟลักซ์กระแสของรีเลย์โดยทั่วไปจะมีขนาด 1A และ 5A

ปัจจุบันนี้รีเลย์แบบดิจิทัลสามารถปรับอัตราส่วนที่ถูกต้องโดยจะคำนวณจากโปรแกรมอัตโนมัติเพียงทราบค่าอัตราส่วน CT และฟลักซ์กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง MVA ซึ่งเมื่อก่อนนั้นจะใช้หม้อแปลงกระแสชดเชย (Interposing CT) ในการปรับอัตราส่วนที่ถูกต้อง

3.3.2 การแก้ไขการเลื่อนเฟส (Phase Correction)

การทำงานที่ถูกต้องของการป้องกันผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้กระแสทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิทำการวัดและเปรียบเทียบโดยใช้รีเลย์ในเฟสเดียวกัน ถ้าหม้อแปลงต่อแบบเดลต้า/สตาร์ระบบแบบสมดุลสามเฟสดังแสดงในภาพที่ 3-6 เฟสเซอร์ของกระแสจะมีมุมต่างกัน 30 องศา จึงต้องมีการชดเชยการเลื่อนเฟสโดยขดลวดของหม้อแปลงด้านที่ต่อสตาร์ต้องต่อหม้อแปลงกระแส (CT) เป็นแบบเดลต้าและด้านที่ต่อแบบเดลต้าต้องต่อหม้อแปลงกระแส (CT) เป็นแบบสตาร์ ถ้าไม่มีการชดเชยการเลื่อนเฟสของกระแสผลต่างในเฟสเดียวกัน รีเลย์จะมองเห็นเป็นมุนนำหน้า โดยพิจารณาเป็นกระแสผิดพ้องสามเฟสไม่สมดุลจะทำให้รีเลย์ทำงาน เพราะฉะนั้นต้องมีการชดเชยเฟสให้ถูกต้อง



ภาพที่ 3-6 การป้องกันผลต่างของหม้อแปลงที่ต่อแบบ Delta-star

สำหรับรีเลย์แบบดิจิทัลจะชดเชยปัญหาในการเลื่อนเฟสในโปรแกรม เนื่องจากการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าตามเวกเตอร์กรุปจะเกิดมุมต่างเฟสขึ้น ซึ่งจะต้องมีการชดเชยการเลื่อนเฟสตามตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 การรวมการชดเชยเฟสตามเวกเตอร์ของการต่อขดลวดหม้อแปลง

การต่อหม้อแปลง		การเลื่อนเฟสของหม้อแปลง	การหมุนของเวกเตอร์	การชดเชยเฟส
Yy0		0 °	0	0 °
Zd0				
Dz0				
Dd0				
Yz1	Zy1	- 30 °	1	30 °
Yd1				
Dy1				
Yy6		- 180 °	6	180 °
Zd6				
Dd6				
Yy11	Zy11	30 °	11	- 30 °
Yd11				
Dy11				

3.2.3 การเปลี่ยนแท็ปของหม้อแปลง (Tap Changing)

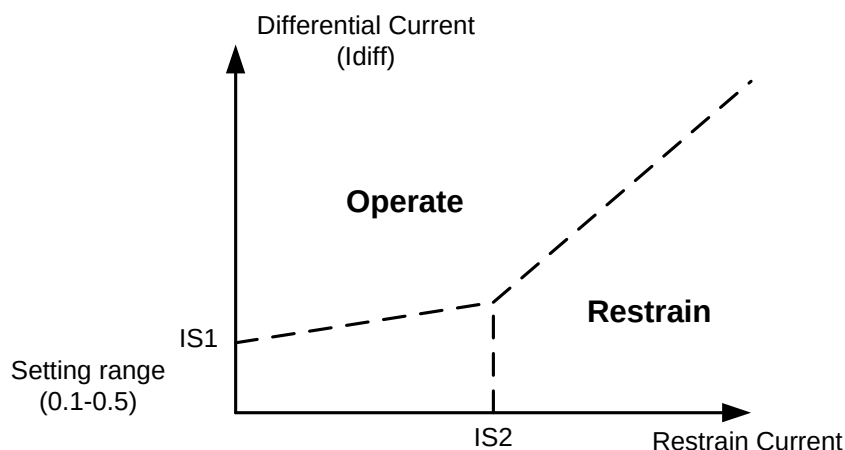
เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดจะทำให้แรงดันลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนแท็ปของหม้อแปลงเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า โดยทำการปรับทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเพราะว่ามีกระแสต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับด้านทุติยภูมิ เมื่ออัตราส่วนของหม้อแปลงเปลี่ยนกระแสก็เปลี่ยนตามด้วย ทำให้กระแสผลต่างมากขึ้นส่งผลให้รีเลย์ป้องกันผลต่างพิจารณาเป็นความผิดปกติในทันทีที่เป็นสภาวะปกติ เราต้องแก้ไขโดยการปรับค่าความชันของรีเลย์ผลต่างเพื่อให้ครอบคลุมถึงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสูงสุดด้วย ซึ่งจะทำให้รีเลย์มีความไวและทำงานไม่ผิดพลาด

3.2.4 การใช้หม้อแปลงกระแสชดเชย (Interposing CT)

รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างจะทำการเปรียบเทียบกระแสของหม้อแปลง เพราะฉะนั้นต้องเลือกอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส CT ให้เหมาะสมและไม่ให้เกิดฟลักตกระแสของรีเลย์ แต่เราไม่สามารถหาอัตราส่วนของ CT เท่ากับกระแสที่ไหลผ่านได้ จึงต้องมี Interposing CT ในการปรับค่าของกระแสทั้งสองด้านให้มีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุด

3.3 คุณลักษณะของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างของโปรแกรม PSCAD/EMTDC [16]

คุณลักษณะของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างในโปรแกรม PSCAD/EMTDC นั้นจะมีพื้นที่แยกออก ระหว่างการทำงาน (Operate) และไม่ทำงาน (Restrain) ลักษณะเป็นสัดส่วนเชิงเส้น โดยแบ่ง ออกเป็น 2 ช่วงการทำงานซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามกระแสผลต่าง แสดงดังภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 คุณสมบัติรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างของโปรแกรม PSCAD/EMTDC

จากภาพที่ 3-7 สามารถปรับตั้งค่าเริ่มต้นในการทำงานและค่าความชันของเส้นกราฟดังนี้

กำหนดให้ I_{S1} = กระแสเริ่มการทำงาน (Trip)

K_1 = เปอร์เซนต์ความชันต่ำสุด

I_{S2} = จุดเริ่มต้นของกระแสในการปรับตั้ง

K_2 = ค่าสูงสุดของความชันในการปรับตั้งค่าเปอร์เซนต์

กระแสในแกนตั้งคือกระแสผลต่าง (I_{diff}) ส่วนกระแสในแกนนอนคือกระแสด้านการทำงาน (Bias Current) จะพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง คือ

1. ในสภาวะปกติกระแสผลต่างในสภาวะปกติจะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่จะเมื่อกระแส กระตุ้นสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลง $IS1$ ประมาณ 0.1-0.5 ของกระแสผลต่าง ส่วนความชัน ในช่วงแรกนั้นจะปรับตั้งไว้เพื่อป้องกันกระแสผลต่างที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง

2. เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นมีกระแสด้านการทำงาน ($I_{Restrain}$) ก็จะมีค่าสูง โดยเริ่มตั้งแต่ $IS2$ จนกระทั่งถึงพิกัดสูงสุดของการปรับตั้งรีเลย์ในการทำงาน (Trip) ความไวในการทำงานของรีเลย์ ในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับปรับความชัน (Slope) ของเส้นกราฟ

กฎเกณฑ์ข้อกำหนดในการตัดวงจร [16]

กรณีที่ 1 : $|I_{bias}| < I_{S2}$

If $|I_{diff}| > K_1 |I_{bias}| + I_{S1}$ then trip

กรณีที่ 2 : $|I_{bias}| \geq I_{S2}$

If $|I_{diff}| > K_2 |I_{bias}| - (K_2 - K_1) I_{S2} + I_{S1}$ then trip

สรุปการปรับตั้งรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างแบบ 2 ความชัน (Dual Slope) มีดังนี้

1. เมื่อหม้อแปลงเกิดการเปลี่ยนแท็ปจะมีกระแสผลต่างเกิดขึ้นเกินกระแสปรับตั้ง จึงทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดแต่เป็นการทำงานในสถานะปกติของหม้อแปลงไม่ใช่ความผิดปกติประการใด เพราะฉะนั้นการปรับความชันของคุณสมบัติในช่วงแรกนั้นเพื่อป้องกันสาเหตุดังกล่าว

2. เมื่อเกิดความผิดปกติภายนอก (External Fault) จะมีกระแสด้านการทำงานสูง จากภาพที่ 3-7 จะเห็นว่ากระแสผลต่างก็มีค่าสูงตามด้วย ทำให้รีเลย์มีความไวในการทำงานต่ำ เพราะฉะนั้นจึงต้องปรับความชันของกราฟในช่วงที่ 2 การปรับตั้งค่าความชันสูงจะทำให้บริเวณทำงาน (Operate) น้อยลง

3. ความไวในการทำงานของรีเลย์นั้นขึ้นอยู่กับ การปรับตั้งค่าความชันของกราฟ

บทที่ 4

การออกแบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

รายละเอียดของบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า งานวิจัยนี้ใช้ผลของการทดสอบหม้อแปลงในขณะเปิดวงจร (Open-circuit Test) และการทดสอบขณะลัดวงจร (Short-circuit Test) ทั้งลำดับบวกและลำดับลบ ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 50 MVA มาใช้ในการออกแบบหม้อแปลงในสภาวะปกติและผิดปกติเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดซึ่งประกอบด้วยการลัดวงจรจากขดลวดลงดิน และการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด แล้วทำการทดสอบแบบจำลองกับระบบไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC เพื่อหาขนาดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและกระแสผลต่างของหม้อแปลง

4.1 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 50 MVA 115/23 kV [17]

การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้นในงานวิจัยนี้ใช้ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นหม้อแปลงกำลังขนาด 3 เฟส 2 ขดลวด 50 MVA 115/23 kV 50 Hz YNyn0 โดยมีข้อมูลในการทดสอบดังนี้

Current 251.02 / 1255.11 A YNyn0

Serial No : 56039

Three-phase Transformer with Both Primary and Secondary Windings WYE-connected and with Both STAR-points Grounded (YNyn0)

Power Rating S	50 MVA
Voltage Rating	115 / 23 kV
Current Rating	251.01/1255.11
Positive Excitation Losses	22.18 kW
Positive Excitation Current	0.922 A
Positive Excitation Voltage	23 kV
Positive Short-circuit Losses	148.10 kW
Positive Short-circuit Current	251.07 A
Positive Short-circuit Voltage	14.44 kV
Zero Excitation Losses	221 kW

Zero Excitation Current	200 A
Zero Excitation Voltage	1.993 kV
Zero short-circuit Losses	345 kW
Zero short-circuit Current	200.2 A
Zero short-circuit Voltage	3.224 kV

4.2 การเตรียมข้อมูลเพื่อใส่ค่าในโปรแกรม BCTRAN [18]

นำผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Test report Serial No : 56039) ในสภาวะเปิดวงจร (Open-circuit Test) และสภาวะลัดวงจร (Short-circuit Test) มาป้อนใน BCTRAN ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม ATP Draw 3.5 เพื่อใช้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ [R] และ [L] ดังนี้คือ

4.2.1 ค่าที่ป้อนในโปรแกรม BCTRAN ในสภาวะการทดสอบเปิดวงจร (Open-circuit Test)

$$\text{FREQ} = 50.0 \text{ (Hz)}$$

$$\text{IEXPOS} = 0.1316 \text{ (\%)}$$

เมื่อทำการทดสอบหม้อแปลงจะทราบค่ากระแสขณะทำการทดสอบ Excitation Current (I_o)

$$\text{เพราะฉะนั้น } I_o = 0.922 \text{ A}$$

เปลี่ยนให้อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์จะได้

$$\text{IEXPOS} = 0.922 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{3} \times 23}{50} \times 100 = 0.0735 \%$$

$$\text{SPOS} = 50 \text{ (MVA)}$$

$$\text{LEXPOS} = 22.18 \text{ (kW)}$$

$$\text{IEXZERO} = 35.39 \text{ (\%)}$$

เพราะว่าการทำ Homopolar Excitation Test ไม่สามารถทำในเงื่อนไขปกติ [18] ดังนั้นค่ากระแสกระตุ้นลำดับศูนย์จะมีค่าดังนี้

$$I_o = \frac{200}{3} \times \frac{23}{\sqrt{3} \times 1.993} = 444.19 \text{ A}$$

เปลี่ยนค่าให้อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์

$$\text{IEXZERO} = 444.19 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{3} \times 23}{50} \times 100 = 35.39 \%$$

$$\text{SZERO} = 50 \text{ (MVA)}$$

$$\text{LEXZERO} = 9810.97 \text{ (kW)}$$

ภายใต้เงื่อนไขสภาวะ Homopolar Excitation Losses

$$\text{LEXZERO} = 221.0 \times \left(\frac{23}{\sqrt{3} \times 1.993} \right)^2 = 9810.97 \text{ kW}$$

4.2.2 ค่าที่ใช้ป้อนในโปรแกรม BCTRAN ในสภาวะการทดสอบลัดวงจร (Short-circuit Test)

Positive Short-Circuit Losses = 148.10 kW

ZPOS12 = 12.557 (%)

$$ZPOS12 = \frac{14.44}{0.251} \times \frac{50/\sqrt{3}}{115^2} \times 100 = 12.557\%$$

SPOS = 50 (MVA)

ZZERO12 = 18.265 (%)

$$ZZERO12 = 3 \times \frac{3224}{200.2} \times \frac{50}{115^2} \times 100 = 18.265\%$$

SZERO = 50 (MVA)

BCTRAN: D:\Bct\50MVA.bct

Number of phases: 3
Number of windings: 2
Type of core: Shell core
Test frequency [Hz]: 50
☐ AR Output

HV LV
L-L voltage: 115 23
Power: 50 50
Connections: Y Y
Phase shift [deg]: 0

Factory tests
Open circuit | Short circuit

Performed at: LV Connect at: LV ☒ Zero sequence data available

positive sequence

Volt (%)	Curr (%)	Loss (kW)
100	0.0735	22.18

zero sequence

Volt (%)	Curr (%)	Loss (kW)
100	35.39	9810.97

Positive core magnetization:
☒ Linear internal ☐ External Lm ☐ External Lm || Rm

View/Copy:
☒ Rm ☐ Lm-rms ☐ Lm-flux

Group No.: 0 Label: Yy0 Factory test data ☐ Hide

Comment:

OK Cancel Import Save As Run ATP View + Copy + Help

Factory tests
Open circuit | Short circuit

☒ Zero sequence data available

positive sequence

	Imp. (%)	Pow. (MVA)	Loss (kW)
HV-LV	12.557	50	148.1

zero sequence

	Imp. (%)	Pow. (MVA)	Loss (kW)
HV-LV	18.265	50	345

Group No.: 0 Label: Yy0 Factory test data ☐ Hide

Comment:

OK Cancel Import Save As Run ATP View + Copy + Help

ภาพที่ 4-1 การป้อนค่าของการทดสอบหม้อแปลงใน BCTRAN

เมื่อนำข้อมูลต่างๆ ใส่ลงในโปรแกรม BCTRAN แล้วโปรแกรมจะทำการประมวลผลและสร้างเอาพุทเป็น Punch File (*.pch) ประกอบด้วยวงจรเชื่อมต่อความต้านทานและความเหนี่ยวนำ (RL Coupled Circuit) เป็นเมตริกขนาด 6 x 6 แสดงค่าในตารางที่ 4-1

C <+++++> Cards punched by support routine on 03-May-07 20.34.57 <+++++>

C ACCESS MODULE BCTRAN

C \$ERASE

C C Excitation test data card

C C <FREQ> IEXPOS < SPOS < LEXPOS < IEXZERO < SZERO < LEXZERO < < < <

C 2 50. .0735 50. 22.18 35.39 50. 9810.97 0 2 2

C C Winding data cards

C C < VRAT < R > < PHASE1 < PHASE2 < PHASE3 >

C 1 66.3952810 A B C

C 2 13.2790562 A B C

C C Short-circuit test data cards

C C < < PIJ < ZPOSIJ < SPOS < ZZEROIJ < SZERO < < <

C 1 2 148.1 12.557 50. 18.265 50. 0 1

ตารางที่ 4-1 ความต้านทานและความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 MVA

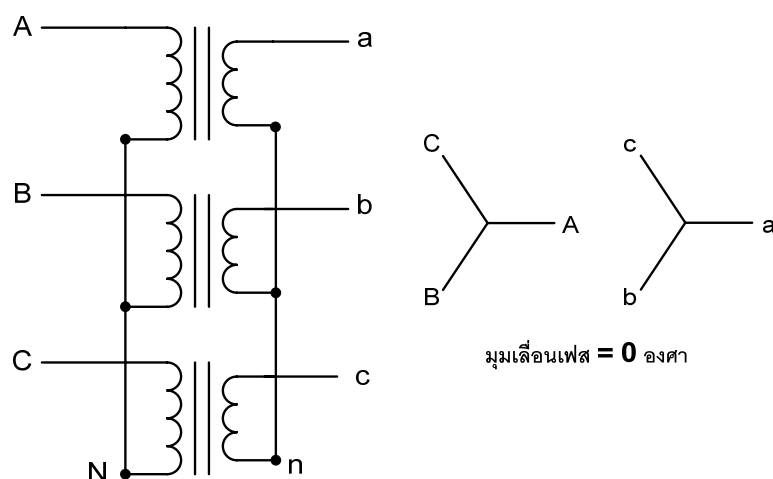
Bus	R	ΩL
1A	0.39172450050967	301226.10304893
2A	0.01566898002039	60237.573101832 12047.514620366
3B	0.39172450050967	-150140.1272902 -30029.03216127 301226.10304893
4B	0.01566898002039	-30029.03216127 -6005.806432255 60237.573101832 12047.514620366
5C	0.39172450050967	-150140.1272902 -30029.03216127 -150140.1272902 -30029.03216127 301226.10304893
6C	0.01566898002039	-30029.03216127 -6005.806432255 -30029.03216127 -6005.806432255 60237.573101832 12047.514620366

4.3 การต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเวกเตอร์รูปอื่นๆ [19]

การต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปมีอยู่ 4 แบบคือ การต่อขดลวดแบบวาย-วาย (Y-Y) เกล็ดต้า-เกล็ดต้า (Δ - Δ) เกล็ดต้า-วาย (Δ -Y) และ ยาย-เกล็ดต้า (Y- Δ) ในการสร้างแบบจำลองนั้น ต้องใช้ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันตามการต่อขดลวดในแต่ละแบบดังที่ได้กล่าวมาในตอนต้น แล้วนำมาป้อนค่าใน BCTRAN ดังภาพที่ 4-1 จะได้ค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำ (RL Coupled Circuit) ของการต่อหม้อแปลงแต่ละแบบไม่เท่ากัน แต่จะมีขนาดเมตริกเท่ากันคือ ขนาด 6×6 เพราะว่าหม้อแปลงเป็นแบบ 3 เฟส 2 ขดลวด ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ข้อมูลของการทดสอบหม้อแปลงแบบ YNyn0 มาทำการสร้างแบบจำลอง แต่เมื่อทราบข้อมูลของการทดสอบหม้อแปลงแบบอื่นๆ ก็สามารถนำมาสร้างแบบจำลองได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงได้ทำการสรุปข้อดีและข้อเสียของการต่อขดลวดหม้อแปลงแบบต่างๆ ดังนี้

4.3.1 การต่อขดลวดแบบวาย-วาย (Wye-Wye Connection)

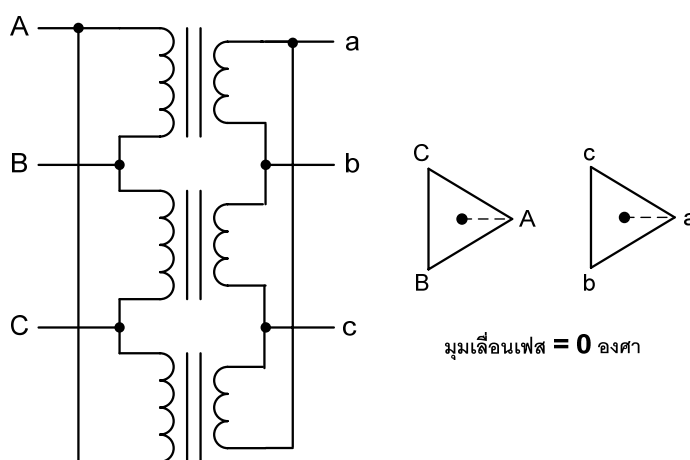
การต่อขดลวดหม้อแปลงแบบวาย-วาย จะไม่มีมูมเลี่ยนเฟสระหว่างขดลวดทั้งสอง การต่อขดลวดแบบนี้ใช้ได้กับระบบ 3 เฟสที่มีโหลดสมดุล เมื่อโหลดไม่สมดุลจะทำให้จุดนิวทรัลเลื่อนจากจุดศูนย์กลางทำให้แรงดันระหว่างสายกับนิวทรัลทั้ง 3 เฟสมีค่าไม่เท่ากัน โดยเฟสใดเฟสหนึ่งจะมีแรงดันต่ำกว่าพิกัดแต่อีกสองเฟสจะมีแรงดันเกิน ข้อดีการต่อขดลวดแบบวาย-วาย จะลดความเครียดของสนามไฟฟ้าของแรงดันระหว่างสายกับนิวทรัล



ภาพที่ 4-2 การต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟสแบบวาย - ยาย

4.3.2 การต่อขดลวดแบบเดลต้า-เดลต้า (Delta-Delta Connection)

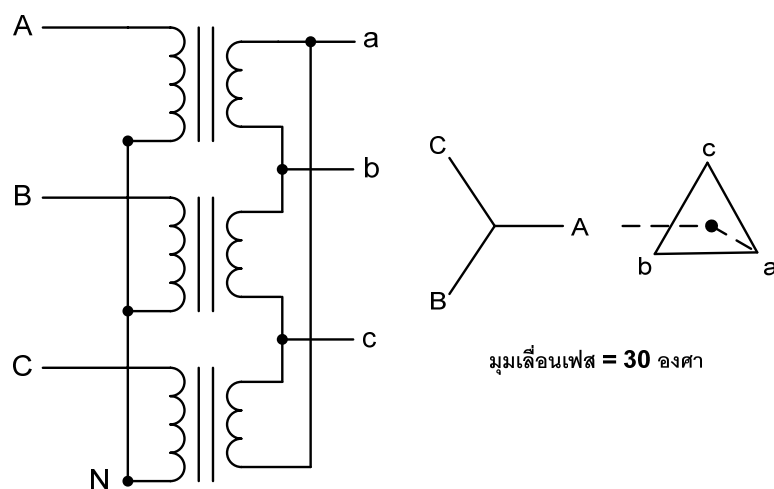
การต่อขดลวดแบบเดลตานั้นจะใช้กับระดับแรงดันที่ไม่สูงมาก ข้อดีของการต่อขดลวดแบบนี้ก็คือเมื่อเกิดความผิดปกติที่ขดลวดชุดใดชุดหนึ่ง ขดลวดจะทำการจ่ายไฟอย่างต่อเนื่องโดยขดลวดหม้อแปลงที่ต่อแบบเดลต้า-เดลต้า จะเปลี่ยนเป็นเดลต้าแบบเปิด (Open Delta) นอกจากนั้นเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่ไม่สมดุลก็จะมีผลกระทบเมื่อเทียบกับการต่อแบบวาย ซึ่งแรงดันทั้ง 3 เฟสจะมีค่าเท่ากันและคงที่แม้จะเกิดโหลดไม่สมดุล



ภาพที่ 4-3 การต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟสแบบเดลต้า – เดลต้า

4.3.3 การต่อขดลวดแบบวาย-เดลต้า (Wye-Delta Connection)

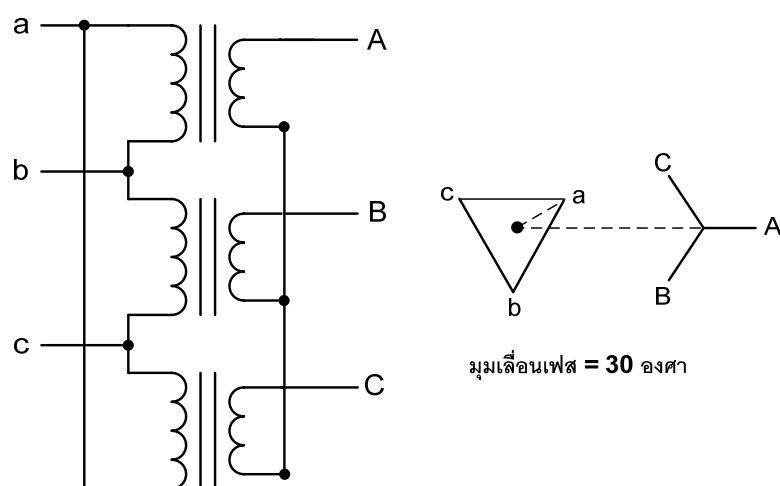
การต่อขดลวดหม้อแปลงแบบนี้จะใช้เปลี่ยนระดับแรงดันให้ต่ำลงในระบบส่งจ่าย โดยทางด้านขดลวดปฐมภูมิที่ต่อแบบวายจะมีการต่อลงดิน สำหรับอัตราส่วนของแรงดันระหว่างสายที่ขดลวดทุติยภูมิและปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{3}}$ เท่าของอัตราส่วนของหม้อแปลง โดยมีการเลื่อนเฟส (Phase Shift) ของของแรงดันระหว่างสายด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็นมุม 30 องศา



ภาพที่ 4-4 การต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟสแบบวาย – เดลต้า

4.3.4 การต่อขดลวดแบบเดลต้า-วาย (Delta-Wye Connection)

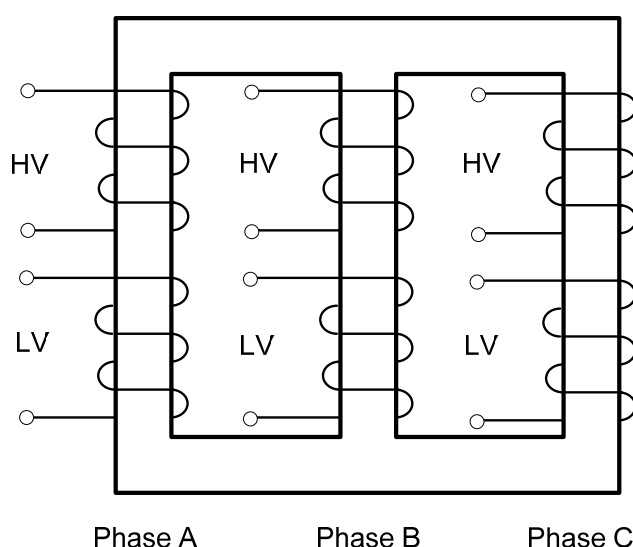
การต่อขดลวดแบบนี้จะใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นจากระบบกำเนิด (Generation) ไปยังระบบส่งจ่าย (Transmission) เพื่อส่งจ่ายพลังงานไปในระยะทางไกลๆ ข้อดีของการต่อขดลวดแบบนี้ก็คือ จะลดความเครียดสนามไฟฟ้าด้านขดลวดแรงสูงและเมื่อเกิดโหลดไม่สมดุลจุดนิวทรัลจะไม่ลอย อัตราส่วนของแรงดันระหว่างสายทางด้านปฐมภูมิต่อทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ $\sqrt{3}$ ของอัตราส่วนหม้อแปลงโดยมีมุมต่างเฟส 30 องศา



ภาพที่ 4-5 การต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟสแบบเดลต้า – ยาย

4.4 การสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 50 MVA 115/23 kV

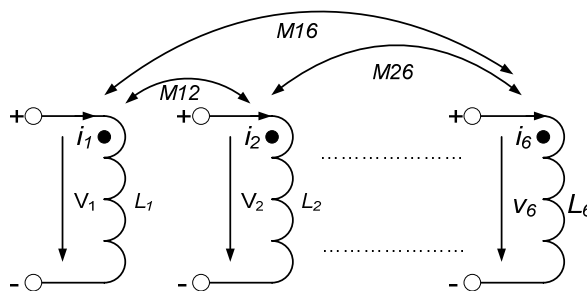
ในการสร้างแบบจำลองนั้นจะใช้ผลการทดสอบการกระตุ้น และกระแสลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าในลำดับบวกและลำดับลบป้อนค่าลงใน BCTRAN ของโปรแกรม ATP/EMTP จะทำให้ทราบค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด คือ R และ L ในการสร้างแบบจำลองนี้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 2 ขดลวด แต่ละเฟสประกอบด้วยขดลวดจำนวน 2 ชุด อยู่ทางด้านแรงดันสูง (HV) และแรงต่ำ (LV) ดังภาพที่ 4-1 เพราะฉะนั้นในการสร้างแบบจำลองนั้นจะประกอบไปด้วยขดลวดทั้งหมดจำนวน 6 ชุด [20]



ภาพที่ 4-6 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 2 ขดลวด (3 Phase 2 winding)

เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงมาตัดกับขดลวดตัวนำจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด ตามกฎของฟาราเดย์ ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดในแต่ละชุดจำนวน n ขดลวด และเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงกับขดลวดนั้น (λ_i) ในวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งแสดงเป็นสมการดังนี้ [20]

$$V_i = R_i i_1 + \frac{d\lambda_i}{dt} \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4-1)$$



ภาพที่ 4-7 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงหลายขดลวด

ลักษณะของฟลักกลิงค์นั้นจะไม่ใช่เส้นจะขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวด และวัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ตามคุณสมบัติของเส้นโค้งสนามแม่เหล็ก (B-H curve)

$$l_i = l_i(i_1, i_2, \dots, i_n)$$

เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กล้อมรอบขดลวด นอกจากนั้นเส้นแรงแม่เหล็กยังเกิดการเหนี่ยวนำไปยังขดลวดอื่นด้วยซึ่งเราเรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง (Flux Link) ทำให้เกิดแรงดันที่ขั้วของขดลวด แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_i = R_i i_i + \frac{dl_i}{di_1} \frac{di_1}{dt} + \frac{dl_i}{di_2} \frac{di_2}{dt} + \dots + \frac{dl_i}{di_n} \frac{di_n}{dt} \quad (4-2)$$

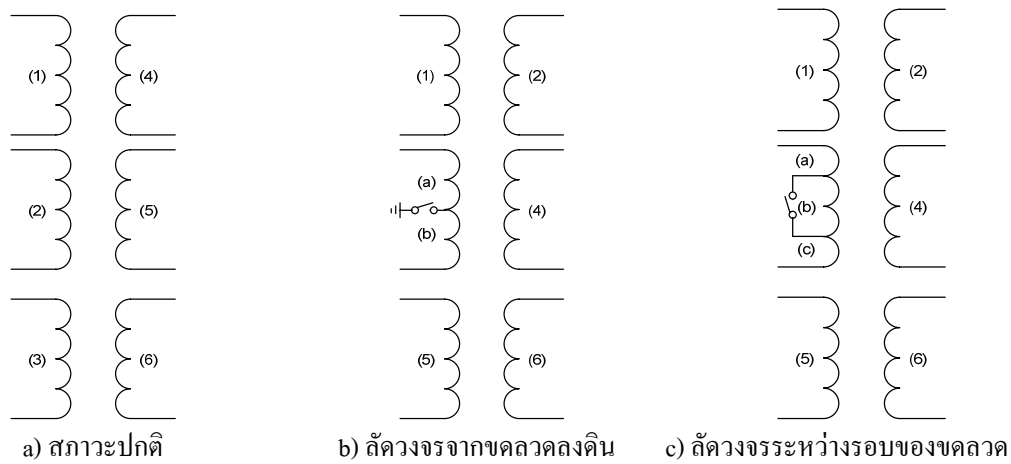
อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักกลิงค์ (l_i) ซึ่งเกิดจากกระแสในแต่ละขดลวด i_k ($k = 1, 2, \dots, n$) จะทำให้เพิ่มค่าความเหนี่ยวนำ (L_i) และมีจลอินดัคแตนซ์ (M_{ik})

$$L_i = \frac{dl_i}{di_1} \quad (4-3)$$

$$M_{ik} = \frac{dl_i}{di_k} \text{ เมื่อ } (i \neq k) \quad (4-4)$$

ในการสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะใช้วงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานะต่างๆ มาพิจารณาประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าในสถานะปกติ แสดงดังภาพที่ 4-8 a) และขณะการเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ การลัดวงจรจากขดลวดลงดิน (Turn-to-ground Fault) แสดงดังภาพที่ 4-8 b) และการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด (Turn-to-turn Fault)

แสดงดังภาพที่ 4-8 c) มาใช้ประกอบในการคำนวณหาค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำในหม้อแปลงไฟฟ้า [20]



ภาพที่ 4-8 วงจรการพิจารณาออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะต่างๆ

4.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ในสภาวะปกติ [20]

หม้อแปลงในสภาวะปกติดังภาพที่ 4-8 a) จะต้องทราบค่าความต้านทาน $[R_i]$ ค่าเซลฟอินดักแตนซ์ $[L_i]$ และค่ามิวจวลอินดักแตนซ์ $[M_{ij}]$ ระหว่างขดลวด i และ j ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์เป็นเมตริกขนาด 6×6

$$[V] = [R][I] + L \frac{di}{dt} \quad (4-5)$$

หรือ

$$\frac{di}{dt} = [L]^{-1}[V] - [L]^{-1}[R][I] \quad (4-6)$$

เมื่อ

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix}$$

$$[V] = [V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6]^T$$

$$[i] = [i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6]^T$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{di_1}{dt} \frac{di_2}{dt} \frac{di_3}{dt} \frac{di_4}{dt} \frac{di_5}{dt} \frac{di_6}{dt}^T$$

โดยกำหนดให้

$V_1, V_2, \dots, V_6$ คือ แรงดันที่ขั้วของขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิ

$i_1, i_2, \dots, i_6$ คือ กระแสของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

$R_1, R_2, \dots, R_6$ คือ ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิ

$L_1, L_2, \dots, L_6$ คือ เซลฟ์อินดักแตนซ์ภายในขดลวด

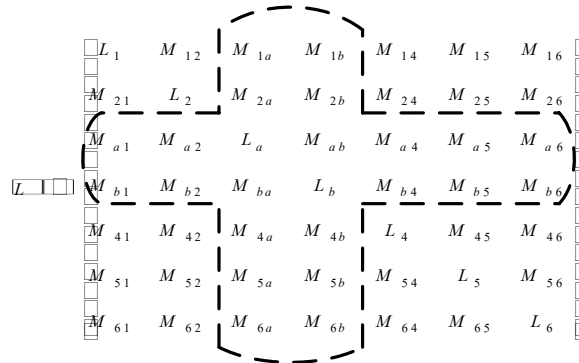
M_{ij} คือ มิวจวลอินดักแตนซ์ระหว่างขดลวด i และ j

เมื่อ $(i = 1, 2, \dots, 6) ; (j = 1, 2, \dots, 6)$

4.4.2 ความผิดปกติจากขดลวดลัดวงจรลงดิน (Turn-to-earth Fault) [20]

เมื่อเกิดการลัดวงจรจากขดลวดลงดิน (Turn-to-earth Fault) ดังภาพที่ 4-8 b) ขดลวดที่เกิดการลัดวงจรนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ขดลวดย่อย การที่มีขดลวดย่อยเพิ่มขึ้นมาในการวิเคราะห์สถานะการเกิดขดลวดลัดวงจรลงดินจะพิจารณาเป็นเมตริกขนาด 7x7

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix}$$



ถ้าขดลวดถูกแบ่งออกเราต้องหาค่าของเซฟอินดักแตนซ์ และมิวจวลอินดักแตนซ์ของขดลวดย่อย a ,b ที่ลัดวงจรลงดินกับขดลวดที่เหลือ ส่วนค่าความต้านทานของขดลวดย่อยสามารถหาค่าดังนี้

$$R_a = \frac{n_a}{n_3} R_3 ; R_b = \frac{n_b}{n_3} R_3 \quad (4-7)$$

เมื่อ n_a, n_b จำนวนรอบของขดลวดในขดลวดย่อย a และ b ตามลำดับ

โดยที่ $n_a + n_b = n_3$

สำหรับการหาค่า เซฟอินดักแตนซ์และมิวจวลอินดักแตนซ์ ของขดลวดย่อย a และ b จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของสมการทั้ง 3 สมการ ดังนี้

$$1. \text{ Consistency} \quad L_a + 2M_{ab} + L_b = L_3 \quad (4-8)$$

จากสมการที่ (4-8) แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่เกิดการลัดวงจรจะมีค่าเท่ากับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดย่อยรวมกับความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดย่อยทั้งสองซึ่งมีค่าเป็นสองเท่า

$$2. \text{ Leakage Factor} \quad s_{ab} = 1 - \frac{M_{ab}^2}{L_a L_b} \quad (4-9)$$

จากสมการที่ (4-9) เป็นค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลของขดลวดย่อย สามารถหาได้จากลักษณะทางกายภาพของขดลวดหม้อแปลงขึ้นอยู่กับตำแหน่งการลัดวงจรลงดินของขดลวด

$$3. \text{ Proportionality} \quad \frac{L_a}{L_b} = \frac{n_a^2}{n_b^2} \text{ เมื่อ } k = \frac{n_a}{n_b} \quad (4-10)$$

จากสมการที่ (4-10) เป็นอัตราส่วนของจำนวนรอบของขดลวดย่อย ค่าของแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดย่อยก็จะเปลี่ยนแปลงตามอัตราจำนวนรอบของขดลวดด้วย

เมื่อทราบค่าตัวแปร (σ_{ab}) ซึ่งเป็นค่าการรั่วซึมของสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยมาก งานวิจัยนี้จึงไม่นำมาพิจารณาและแทนค่าของ $k = \frac{n_a}{n_b}$ ตามความสัมพันธ์ของสมการจะได้

$$L_a = \frac{L_3}{\frac{1}{k^2} + \frac{2\sqrt{1 - s_{ab}}}{k} + 1} \quad (4-11)$$

$$L_b = \frac{L_3}{k^2 + 2k\sqrt{1 - s_{ab}} + 1} \quad (4-12)$$

$$M_{ab} = \frac{L_3\sqrt{1 - s_{ab}}}{\left(k + \frac{1}{k}\right) + 2\sqrt{1 - s_{ab}}} \quad (4-13)$$

สำหรับการพิจารณาค่ามิตวอลอินดักเตนซ์ระหว่างขดลวดย่อย a และ b กับขดลวดอื่นๆ จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 ขดลวดย่อย a และ b อยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน

$$M_{ai} = M_{3i} \sqrt{e} \sqrt{\frac{L_a}{L_3}} \sqrt{1 + \frac{1 - e}{e} \frac{L_3 L_i}{M_{3i}^2}} \quad (4-14)$$

$$M_{bi} = M_{3i} - M_{ai} \quad (4-15)$$

เมื่อ

$$e = \frac{s_{ai}}{s_{3i}} \quad (4-16)$$

กรณีที่ 2 ขดลวดย่อย a และ b ไม่ได้อยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน

$$M_{ai} = M_{ia} = \frac{k}{1 + k} M_{3i} \quad (4-17)$$

$$M_{bi} = M_{ib} = \frac{1}{1 + k} M_{3i} \quad (4-18)$$

4.4.3 ความผิดปกติระหว่างขดลวด (Turn-to-turn Fault)

เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวด (turn-to-turn Fault) ดังภาพที่ 4-8 c) ตำแหน่งของขดลวดที่เกิดการลัดวงจรจะแบ่งขดลวดออกเป็น 3 ขดลวดย่อยคือ a, b และ c โดยพิจารณาเช่นเดียวกับการหาเมตริกในกรณีเกิดการลัดวงจรลงดินแต่จะเพิ่มขนาดเมตริกเป็น 8 x 8

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{1a} & M_{1b} & M_{1c} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & L_2 & M_{2a} & M_{2b} & M_{2c} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{a1} & M_{a2} & L_a & M_{ab} & M_{ac} & M_{a4} & M_{a5} & M_{a6} \\ M_{b1} & M_{b2} & M_{ba} & L_b & M_{bc} & M_{b4} & M_{b5} & M_{b6} \\ M_{c1} & M_{c2} & M_{ca} & M_{cb} & L_c & M_{c4} & M_{c5} & M_{c6} \\ M_{41} & M_{42} & M_{4a} & M_{4b} & M_{4c} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{5a} & M_{5b} & M_{5c} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{6a} & M_{6b} & M_{6c} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix}$$

เมื่อขดลวดถูกแบ่งย่อยออกเป็น 3 ส่วน เพราะฉะนั้นต้องคำนวณค่าเซฟอินดักแตนซ์และมิวจลอินดักแตนซ์ของขดลวดย่อย a, b และ c ที่เกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวด ตามความสัมพันธ์ของค่าทั้ง 3 คือ Consistency Leakage factor และ Proportionality ประกอบด้วย : M_{ab} , M_{ac} , M_{bc} , L_a , L_b และ L_c ในส่วนของความต้านทานของขดลวดย่อยสามารถหาค่าดังนี้

$$R_a = \frac{n_a}{n_3} R_3 ; R_b = \frac{n_b}{n_3} R_3 ; R_c = \frac{n_c}{n_3} R_3 \quad (4-19)$$

เมื่อ n_a, n_b และ n_c จำนวนรอบของขดลวดในขดลวดย่อย a, b และ c ตามลำดับ
โดยที่ $n_a + n_b + n_c = n_3$

สำหรับการคำนวณค่าเซฟอินดักแตนซ์และมิวจลอินดักแตนซ์ของขดลวดย่อย a, b และ c ใช้ความสัมพันธ์ของสมการทั้ง 3 ดังนี้

$$1. \text{ Consistency } L_a + L_b + L_c + 2(M_{ab} + M_{ac} + M_{bc}) = L_3 \quad (4-20)$$

$$2. \text{ Leakage Factor } s_{ab} = 1 - \frac{M_{ab}^2}{L_a L_b} \quad (4-21)$$

$$s_{ac} = 1 - \frac{M_{ac}^2}{L_a L_c} \quad (4-22)$$

$$s_{bc} = 1 - \frac{M_{bc}^2}{L_b L_c} \quad (4-23)$$

$$3. \text{ Proportionality } \frac{L_a}{L_b} = \frac{n_a^2}{n_b^2} \quad (4-24)$$

$$\frac{L_a}{L_c} = \frac{n_a^2}{n_c^2} \quad (4-25)$$

เมื่อทราบค่าตัวแปร (σ_{ab}) ซึ่งเป็นค่าการรั่วซึมของสนามแม่เหล็กและแทนค่าของ $k = \frac{n_a}{n_b}$ ตามความสัมพันธ์ตามสมการจะได้

$$L_a = L_3 \frac{n_a^2}{n_3^2} \quad L_b = L_3 \frac{n_b^2}{n_3^2} \quad L_c = L_3 \frac{n_c^2}{n_3^2} \quad (4-26)$$

$$M_{ab} = L_3 \frac{n_a n_b}{n_3^2} : M_{ac} = L_3 \frac{n_a n_c}{n_3^2} : M_{bc} = L_3 \frac{n_b n_c}{n_3^2} \quad (4-27)$$

สำหรับการพิจารณาค่ามิวจวลอินดักแตนซ์ระหว่างขดลวดย่อย a, b และ c กับขดลวดอื่นๆ จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 ขดลวดย่อย a, b และ c อยู่บนแกนหลักเดียวกัน

$$M_{ai} = M_{3i} \sqrt{e} \sqrt{\frac{L_a}{L_3} \sqrt{1 + \frac{1 - e}{e} \frac{L_3 L_i}{M_{3i}^2}}} \quad (4-28)$$

$$M_{bi} = M_{3i} \sqrt{e} \sqrt{\frac{L_b}{L_3} \sqrt{1 + \frac{1 - e}{e} \frac{L_3 L_i}{M_{3i}^2}}} \quad (4-29)$$

$$M_{ci} = M_{3i} - M_{ai} - M_{bi} \quad (4-30)$$

เมื่อ

$$e = \frac{s_{ai}}{s_{3i}} \text{ และ } e = \frac{s_{bi}}{s_{3i}} \quad (4-31)$$

กรณีที่ 2 ขดลวดย่อย a, b และ c ไม่ได้อยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน

$$M_{ai} = M_{ia} = \frac{M_{3i}}{1 + \frac{1}{k} + \frac{1}{k'}} \quad (4-32)$$

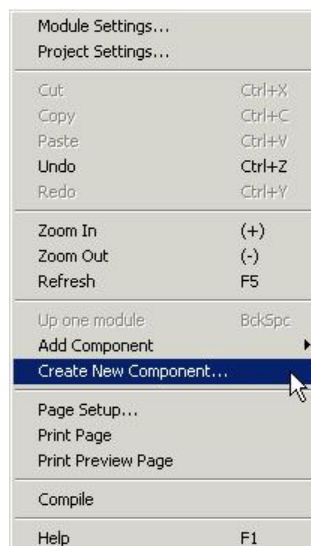
$$M_{bi} = M_{ib} = \frac{M_{3i}}{1 + k + \frac{k}{k'}} \quad (4-33)$$

$$M_{ci} = M_{ic} = \frac{M_{3i}}{1 + k + \frac{k}{k'}} \quad (4-34)$$

โดยที่ $\frac{M_{ai}}{M_{bi}} = \frac{n_a}{n_b} = k$ และ $\frac{M_{ai}}{M_{ci}} = \frac{n_a}{n_c} = k'$ (4-35)

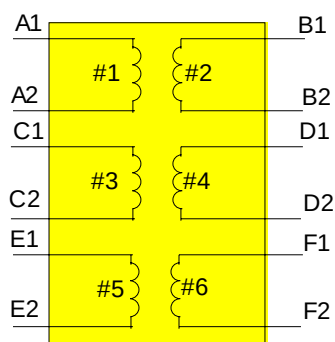
4.5 การสร้างแบบจำลองการเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดบนโปรแกรม PSCAD

ในการสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC นั้นเริ่มต้นจากการเขียนแบบสร้างแบบจำลองขึ้นมาใหม่โดยเลือกไปที่ Create New Component ดังภาพที่ 4-9



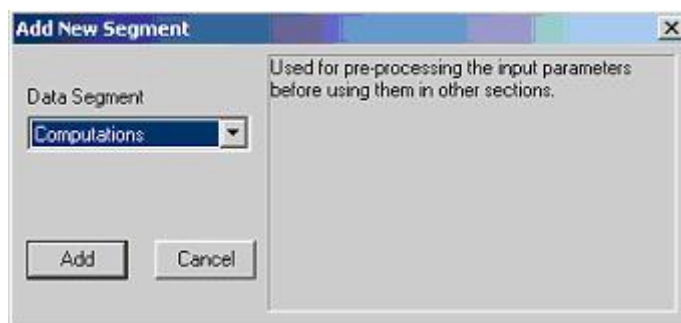
ภาพที่ 4-9 เมนูของโปรแกรม PSCAD/EMTDC ในการสร้างแบบจำลอง

ภาพที่ 4-9 แสดงการเลือกเมนูรายการในการสร้างแบบจำลองใหม่ขึ้นมาใช้ โดยทำการคลิกเลือกไปที่ Create New Component แล้วทำการเขียนแบบโครงสร้างของหม้อแปลงและจุดเชื่อมต่อสัญญาณต่างๆ ดังภาพที่ 4-10



ภาพที่ 4-10 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสถานะปกติ

ภาพที่ 4-10 เป็นแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานะปกติประกอบด้วยขดลวดทั้งหมด 6 ชุด ภายในขดลวดนั้นจะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ของความต้านทาน, เซฟล์อินดักแตนซ์ และ มิวจวลอินดักแตนซ์ ในขั้นตอนต่อไปต้องเลือกที่ Add New Segment เพื่อใส่ข้อมูลลงใน Computation และ Transformer ดังภาพที่ 4-11



ภาพที่ 4-11 การเลือกรายการกำหนดค่าข้อมูลในแบบจำลอง

จากภาพที่ 4-11 เป็นการเลือกกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ Add Computations Segment เป็นส่วนที่สำคัญในการเตรียมข้อมูลก่อนการประมวลผลประกอบไปด้วยตัวแปร และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า และ Add Transformers Segment ในส่วนนี้จะป็นขนาดของเมตริกของค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

Add Segment Computation

```
REAL w =2*pi*f
REAL R11 =0.391724500509
REAL R22 =0.015668980020
```

Add Transformers Segment

```
#TRANSFORMERS 3
! Six coupled lines:
6 / Number of windings...
$A1 $A2 $R11 $L11 /
$B1 $B2 0.0 $L12 $R22 $L22 /
$C1 $C2 0.0 $L13 0.0 $L23 $R33 $L33 /
$D1 $D2 0.0 $L14 0.0 $L24 0.0 $L34 $R44 $L44 /
$E1 $E2 0.0 $L15 0.0 $L25 0.0 $L35 0.0 $L45 $R55 $L55 /
$F1 $F2 0.0 $L16 0.0 $L26 0.0 $L36 0.0 $L46 0.0 $L56 $R66 $L66 /
```

การเขียนโปรแกรม FORTRANS

ในโปรแกรม PSCAD/EMTDC นั้นเมื่อต้องการคำนวณหาค่าทางคณิตศาสตร์นั้นจะต้องเลือก Add Fortran Segment มาใช้ ส่วนของงานวิจัยนี้ได้ทำการเขียนโปรแกรม Fortran เพื่อหาค่าของความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำขดลวดย่อยกับขดลวดอื่นๆ เมื่อขดลวดเกิดการลัดวงจรตามหัวข้อที่ 4.4 โดยไม่พิจารณาค่าของฟลักแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Factor) บนโปรแกรมภาษา Fortrans ดังนี้

โปรแกรมย่อยภาษา Fortran ของแบบจำลองการลัดวงจรจากขดลวดลงดิน

! ***** FORTRAN *****

! PURPOSE: Model of Power transformer winding faults

! Written by: Dusit Uthitsunthorn, March 2006

! File name: turn to ground faults .f

! KMITNB

! *****

$R_a = (N_a/N_3) * R(3,3)$!.... Find Resistance R_a

$R_b = (N_b/N_3) * R(3,3)$!.... Find Resistance R_a

$L_a = L(3,3) / ((1/k^2) + (2/k) + 1)$!.... Find self inductance sub-coil L_a

$L_b = L(3,3) / (k^2 + (2*k) + 1)$!.... Find self inductance sub-coil L_b

$M_{ab} = L(3,3) / (k + (1/k) + 2)$!.... Find mutual inductance M_{ab}

!***..... Find M_{ai} sub-coil a to another coil of winding faults.....***

Do 10 i=1,6

$A(1,i) = L(3,i) * \sqrt{L_a / L(3,3)}$

10 continue

print*, 'Matrix M_{ai} is=' !**.....Check results of mutual inductance M_{ai}

Do 15 m=1,1

print *, (A(m,n), n=1,6)

15 continue

!***..... Find M_{bi} sub-coil b to another coil of winding faults.....***

Do 20 i=1,6

$B(1,i) = L(3,i) - A(1,i)$

20 continue

print*, 'Matrix M_{bi} is=' !**.....Check results of mutual inductance M_{bi}

Do 25 m=1,1

print *, (B(m,n), n=1,6)

25 continue

End

โปรแกรมย่อยภาษา Fortran ของแบบจำลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด

! ***** FORTRAN *****

! PURPOSE: Model of Power transformer winding faults

! Written by: Dusit Uthitsunthorn, March 2006

! File name: turn to turn faults .f

! KMITNB

! *****

$R_a = (N_a/N_3) * R(3,3)$!... Find Resistance R_a

$R_b = (N_b/N_3) * R(3,3)$!... Find Resistance R_b

$R_c = (N_c/N_3) * R(3,3)$!... Find Resistance R_c

$L_a = L(3,3) * (N_a/N_3)^2$!... Find self inductance sub-coil L_a

$L_b = L(3,3) * (N_b/N_3)^2$!... Find self inductance sub-coil L_b

$L_c = L(3,3) * (N_c/N_3)^2$!... Find self inductance sub-coil L_c

$M_{ab} = L(3,3) * (N_a * N_b / N_3^2)$!... Find mutual inductance M_{ab}

$M_{ac} = L(3,3) * (N_a * N_c / N_3^2)$!... Find mutual inductance M_{ac}

$M_{bc} = L(3,3) * (N_b * N_c / N_3^2)$!... Find mutual inductance M_{bc}

!***..... Find M_{ai} sub-coil a to another coil of winding faults.....***

Do 10 i=1,6

$A(1,i) = L(3,i) * \sqrt{L_a / L(3,3)}$

10 continue

print*, 'Matrix M_{ai} is=' !**....Check results of mutual M_{ai}

Do 15 m=1,1

print *, (A(m,n), n=1,6)

15 continue

!***..... Find M_{bi} sub-coil b to another coil of winding faults.....***

Do 20 i=1,6

$B(1,i) = L(3,i) * \sqrt{L_b / L(3,3)}$

20 continue

print*, 'Matrix M_{bi} is=' !**....Check results of mutual M_{bi}

Do 25 m=1,1

print *, (B(m,n), n=1,6)

25 continue

!***..... Find Mci sub-coil c to another coil of winding faults.....***

Do 30 i=1,6

$C(1,i)=L(3,i)-A(1,i)-B(1,i)$

30 continue

print*, 'Matrix Mci is='

!***....Check results of mutual Mci

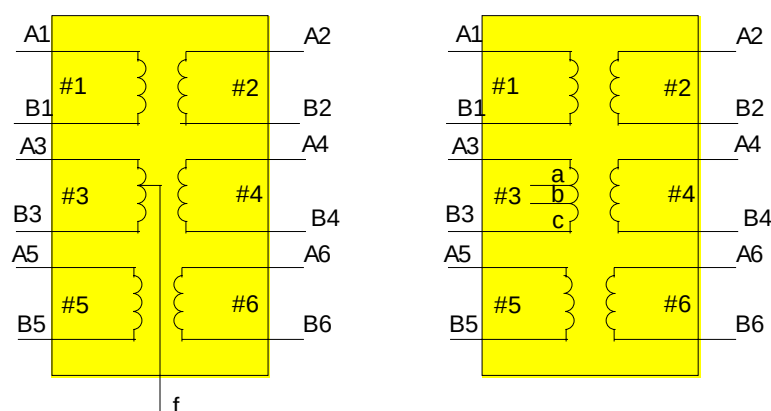
Do 35 m=1,1

print *, (C(m,n), n=1,6)

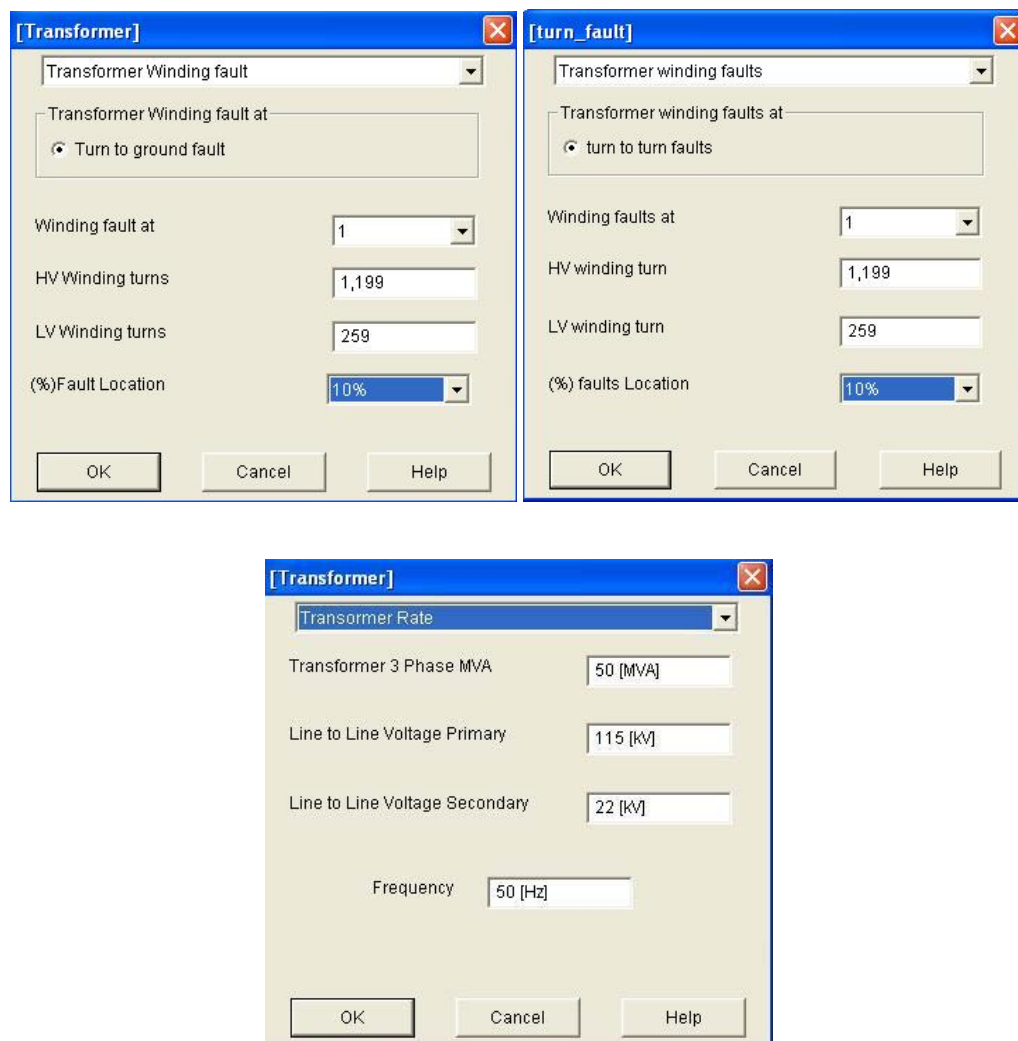
35 continue

End

แบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดที่สร้างขึ้นบนโปรแกรม PSCAD/EMTDC นั้นสามารถเลือกการลัดวงจรในแต่ละขดลวดของแต่ละเฟส ทั้งทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ แสดงดังภาพที่ 4-12 นอกจากนั้นภายในแบบจำลองได้สร้างเมนูการป้อนค่าค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจร ดังภาพที่ 4-13 ประกอบด้วย ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า พิกัดแรงดัน ความถี่ จำนวนรอบของขดลวด การเลือกขดลวดลัดวงจรและตำแหน่งในการลัดวงจรจากขดลวดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของจำนวนรอบทั้งหมด



ภาพที่ 4-12 แบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดบนโปรแกรม PSCAD/EMTDC



ภาพที่ 4-13 การป้อนค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้า

4.6 การคำนวณหาค่ากระแสของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ในงานวิจัยนี้นั้นได้ทำการสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 115/23 kV 50 Hz Yy0 จ่ายโหลดความต้านทานขนาด 10 MW เพราะฉะนั้นในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะต้องคำนวณหาค่ากระแสของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิในสภาวะต่างๆ มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณดังนี้

4.6.1 กระแสของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดความต้านทานขนาด 10 MW

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi \quad (4-36)$$

$$\text{เพราะฉะนั้นกระแสไหลด้านทุติยภูมิ } I_2 = \frac{10 \text{ MW}}{\sqrt{3} \times 23 \text{ kV}} = 251.02 \text{ A}$$

$$\text{อัตราส่วนหม้อแปลง } = a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{115 \text{ kV}}{23 \text{ kV}} = 5$$

$$\text{เพราะฉะนั้นกระแสไหลด้านปฐมภูมิ } I_1 = \frac{I_2}{a} = \frac{251.02}{5} = 50.20 \text{ A}$$

ตารางที่ 4-2 กระแสไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดปกติ 10 MW

หม้อแปลงจ่ายโหลดความต้านทานขนาด 10 MW	
กระแสด้านปฐมภูมิ	50.20 A
กระแสด้านทุติยภูมิ	251.02 A

4.6.2 การคำนวณกระแสลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย BUS 115 kV

การหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรนั้นในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ข้อมูลกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดัน 115/22 kV เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมาใส่ในโปรแกรม PSCAD/EMTDC แล้วทำการเปรียบเทียบผลของกระแสลัดวงจรจากการจำลองจากโปรแกรม โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าย่อยจอมเทียนตามตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าย่อยจอมเทียน

สถานี ไฟฟ้า	BUS kV	หม้อ แปลง MVA	TPH AMPS	SLG AMPS	R1	X1	R0	X0
					P.U. Base on 100 MVA			
จอมเทียน	115	50	11,000	5,542.60	0.01192	0.04378	0.04237	0.17426

$$\text{กำหนดกำลังไฟฟ้าเบส} = 100 \text{ MVA}$$

$$\text{แรงดันไฟฟ้าเบสทางด้านแรงสูง} = 115 \text{ kV}$$

$$\text{อิมพีแดนซ์เบส} = \frac{kV^2}{MVA}$$

$$\text{อิมพีแดนซ์เบสทางด้านแรงสูง} = \frac{115 \text{ kV}^2}{100 \text{ MVA}} = 132.25$$

$$\text{อิมพีแดนซ์จริง} = \text{เปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ X อิมพีแดนซ์เบส}$$

คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรสามเฟส (Three Phase Fault) ที่บัส 115 kV

$$\begin{aligned}\text{ความต้านทานจริง } R_1 &= \text{ค่าเปอร์ยูนิตความต้านทาน} \times \text{ความต้านทานเบส} \\ &= 0.01192 \times 132.25 \\ &= 1.57642\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{รีแอกแตนซ์จริง } X_1 &= \text{ค่าเปอร์ยูนิตรีแอกแตนซ์} \times \text{รีแอกแตนซ์เบส} \\ &= 0.04378 \times 132.25 \\ &= 5.789905\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{อิมพีแดนซ์จริง } Z_1 &= 1.57642 + j 5.789905 \\ &= 6.000 \angle 74.76\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{สามเฟสฟอลต์สมมาตร } I_f &= \frac{V_f}{Z_1} \\ &= \frac{115000}{\sqrt{3} \times 6.0000} \\ &= 11,065.880 \text{ A}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{กำลังไฟฟ้าลัดวงจรสามเฟส} &= \sqrt{3} \times 115 \text{ kV} \times 11,065.88 \\ &= 2203.99 \text{ MVA}\end{aligned}$$

คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินเส้นเดียว (Single Line to Ground Fault) ที่บัส 115 kV

$$\begin{aligned}\text{ความต้านทานจริง } R_0 &= \text{ค่าเปอร์ยูนิตความต้านทาน} \times \text{ความต้านทานเบส} \\ &= 0.04237 \times 132.25 \\ &= 5.6034325\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{รีแอกแตนซ์จริง } X_0 &= \text{ค่าเปอร์ยูนิตรีแอกแตนซ์} \times \text{รีแอกแตนซ์เบส} \\ &= 0.17426 \times 132.25 \\ &= 23.045885\end{aligned}$$

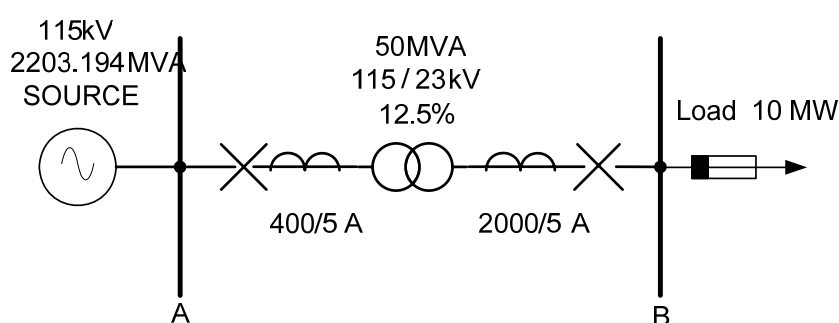
$$\begin{aligned}\text{อิมพีแดนซ์จริง } Z_0 &= 5.6034325 + j23.045885 \\ &= 23.71645 \angle 76.333\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ฟอลต์ลงดินเส้นเดียว } I_f &= \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \\ Z_1 + Z_2 &= 1.57642 + j 5.789905 + 1.57642 + j 5.789905 \\ &= 3.15284 + j 11.57081 \\ Z_1 + Z_2 + Z_0 &= 3.15284 + j 11.57081 + 5.6034325 + j23.045885 \\ &= 8.75624 + j 34.62481 \\ &= 35.71483 \angle 75.8080\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{กระแสฟอลต์ลงดินเส้นเดียว} &= \frac{3 \text{ ค } 115000}{\sqrt{3} \text{ ค } 35.71483} \\ &= 5,577.1186 \text{ A}\end{aligned}$$

ตารางที่ 4-4 การเปรียบเทียบกระแสจากการคำนวณ

กระแสไฟฟ้าลัดวงจร	จากตารางที่ 4-3	การคำนวณ
SLG	5,542.60	5,577.11
Three phase fault	11,000.00	11,065.88



ภาพที่ 4-14 ระบบไฟฟ้าของแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย

ภาพที่ 4-14 แสดงระบบไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย เพื่อทำการทดสอบแบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดความต้านทานขนาด 10 MW ซึ่งมีผลของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและกำลังไฟฟ้าลัดวงจรดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรชนิดต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละบัส

Short-circuit	BUS A	BUS B
MVA fault level	2203.194	338.376
SLG	5,666	6,889
Three phase fault	11,065	8,494

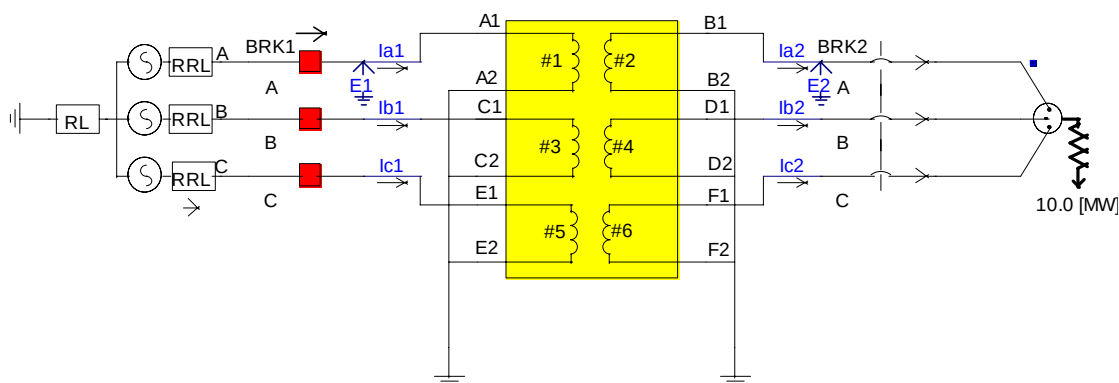
4.7 การทดสอบผลของแบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดบนโปรแกรม PSCAD

การทดสอบและการวิเคราะห์ผลของแบบจำลองในงานวิจัยนี้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส 2 ขดลวด ขนาด 50 MVA 115/23 kV 50 Hz Yy0 ที่จุดนิวทรัลต่อลงดินโดยตรง จ่ายโหลดความต้านทานขนาด 10 MW มีค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายลำดับบวก (Positive Sequence) และลำดับลบ (Zero Sequence) เท่ากับ $Z_1 = 0.01192 + j0.04378$ pu. , $Z_0 = 0.04237 + j0.17426$ pu. กำลังไฟฟ้าเบสเท่ากับ 100 MVA มีตำแหน่งของการเกิดความผิดปกติเป็นเปอร์เซ็นต์ของจำนวนรอบตลอดความยาวของขดลวดจนถึงจุดนิวทรัล โดยทำการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานะต่างๆ ดังนี้

1. หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานะปกติขณะจ่ายโหลดขนาด 10 MW
2. การเกิดความผิดปกติแบบลัดวงจรขดลวดลงดิน
3. การเกิดความผิดปกติแบบลัดวงจรระหว่างขดลวด

แบบจำลองนี้ได้ทำการทดสอบกับระบบไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC มาทำการวิเคราะห์ผลของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

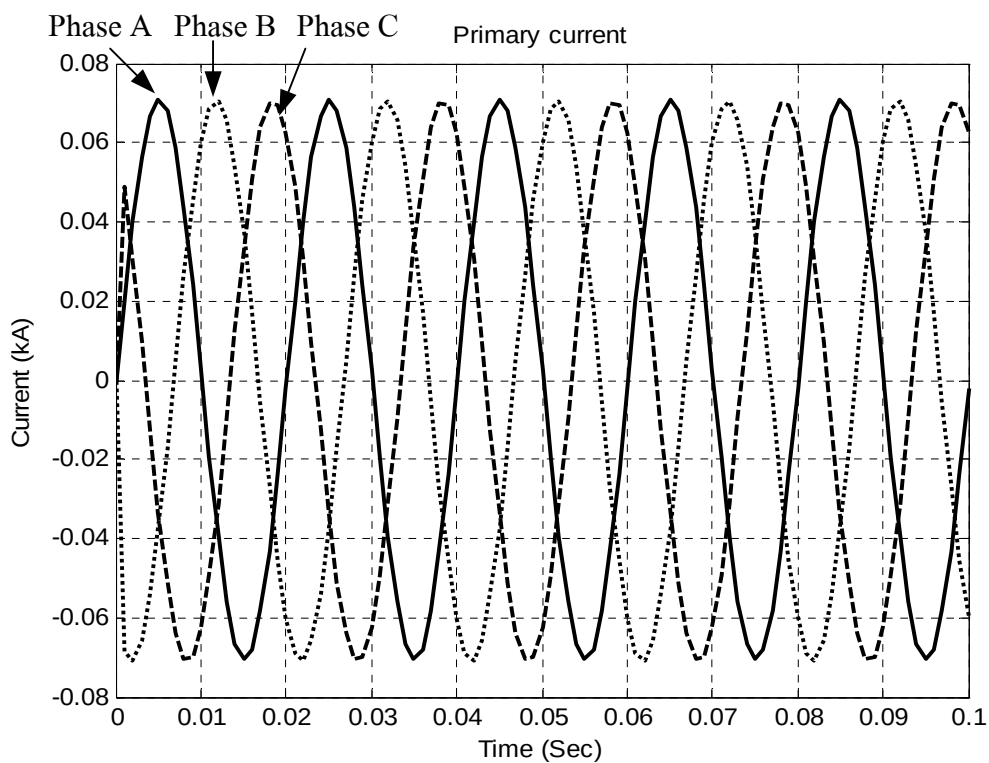
4.7.1 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสในสถานะปกติ



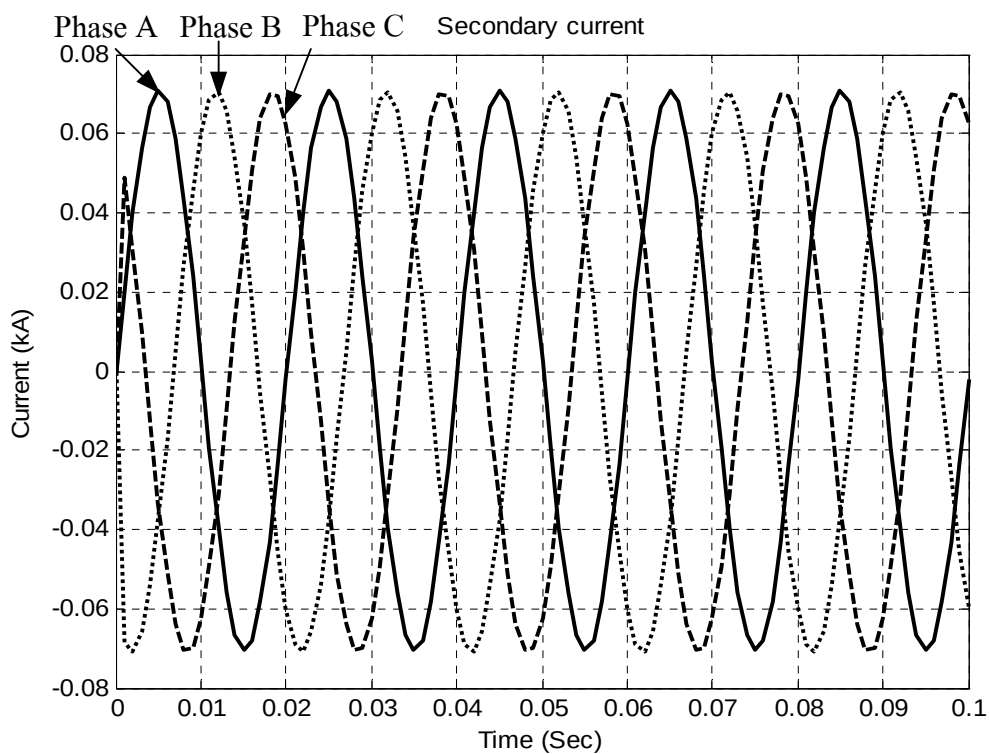
ภาพที่ 4-15 การจำลองระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานะปกติ

จากภาพที่ 4-15 เป็นการทดสอบแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นกับระบบไฟฟ้าขนาด 115/23 kV จ่ายโหลดความต้านทานขนาด 10 MW ต่อเป็นแบบสตาร์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยทำการวัดกระแสของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ แล้วเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณในตารางที่ 4-2

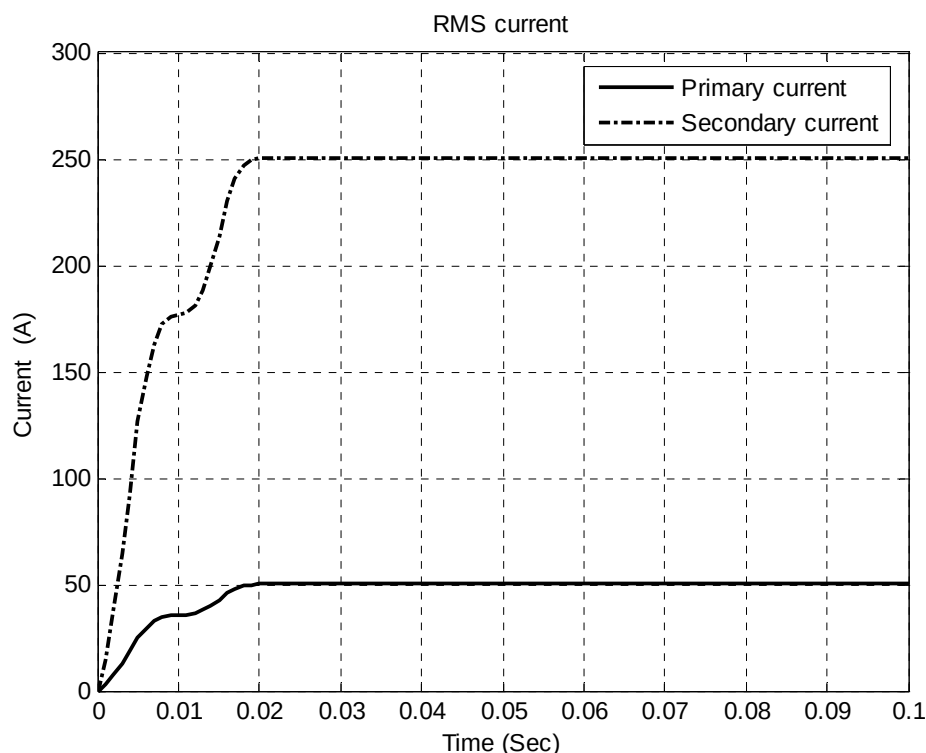
ผลของกระแสในสภาวะปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ



ภาพที่ 4-16 กระแสด้านปฐมภูมิขณะจ่ายโหลดปกติขนาด 10 MW



ภาพที่ 4-17 กระแสด้านทุติยภูมิขณะจ่ายโหลดปกติขนาด 10 MW



ภาพที่ 4-18 กระแส RMS ของหม้อแปลงทั้งสองด้านขณะจ่ายโหลด 10 MW

ในภาพที่ 4-16 และ 4-17 เป็นสัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติขณะจ่ายโหลดขนาด 10 MW ส่วนภาพที่ 4-18 นั้นเป็นกระแส RMS ของหม้อแปลงในสภาวะปกติ ในช่วงเวลาเริ่มต้นนั้นกระแสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงเวลา 0.02 วินาที กระแสจะคงที่เท่ากับกระแสโหลดของหม้อแปลงและจะรักษาระดับไว้ถ้าโหลดไม่เปลี่ยนแปลง

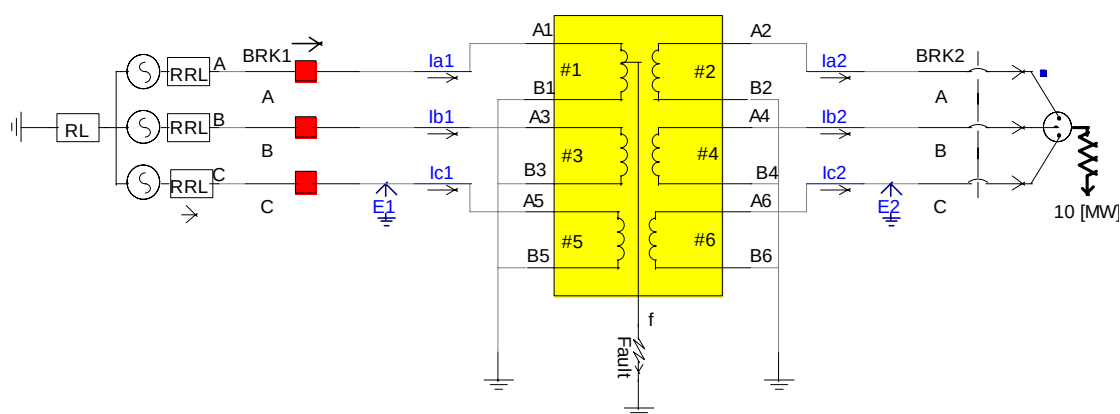
เมื่อทราบค่ากระแสโหลดของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิแล้วนั้น ก็จะสามารถหาค่ากระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงตามอัตราส่วนของหม้อแปลง (Ratio) ผลลัพธ์ของกระแสจากการคำนวณจะใช้ในการตรวจสอบ และเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองของหม้อแปลงที่สร้างขึ้นมาในสภาวะปกติ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นมีความถูกต้อง หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบแบบจำลองเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงต่อไปประกอบไปด้วย

4.7.2 การเกิดความผิดปกติแบบลัดวงจรขดลวดลงดิน

การทดสอบแบบจำลองกรณีเกิดการลัดวงจรจากขดลวดลงดินภายในหม้อแปลงนั้น แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถที่จะเลือกกรณีการลัดวงจรทั้งสองด้านของขดลวดหม้อแปลงในแต่ละเฟส แต่เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดทางด้านปฐมภูมิมิค่าเท่ากันทั้งสามเฟส เช่นเดียวกันค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดทางด้านทุติยภูมิก็จะมีค่าเท่ากันด้วยดังตารางที่ 4-1 จากการเก็บข้อมูลที่ได้จากงานวิจัย

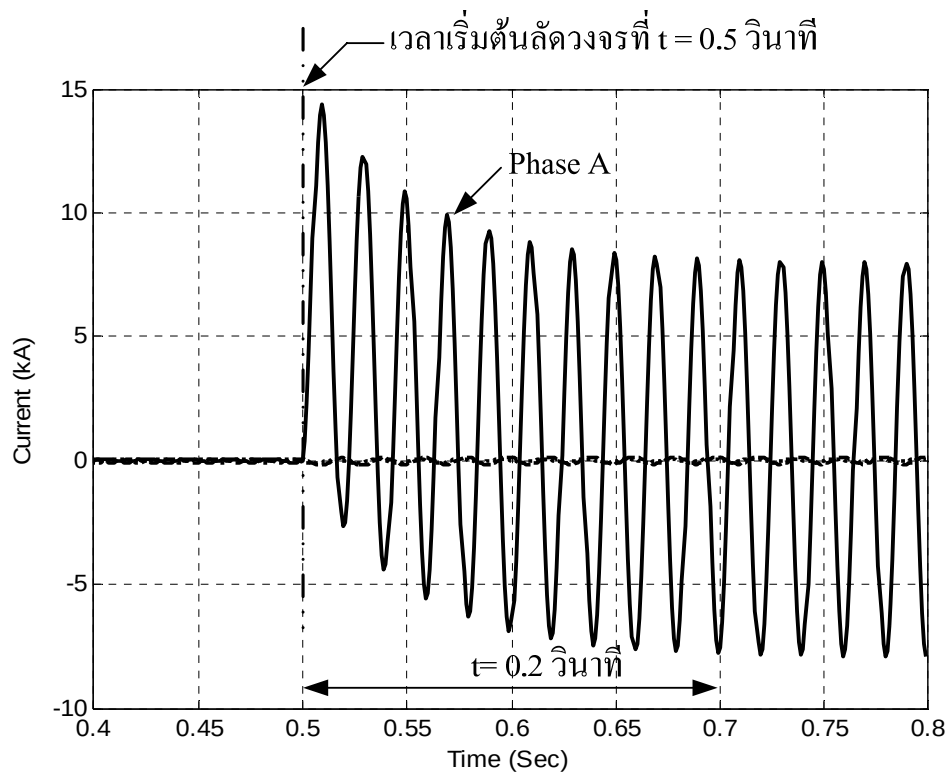
จะมีค่าเท่ากัน เพราะฉะนั้นจึงยกตัวอย่างสัญญาณกระแสการลัดวงจรภายในขดลวดลงดินเฉพาะเฟส A เท่านั้น วัตถุประสงค์ของการทดสอบแบบจำลองนี้เพื่อทำการศึกษาผลของกระแสลัดวงจรลงดินและกระแสผลต่างในแต่ละเฟสของหม้อแปลง

ผลการทดสอบขดลวดลัดวงจรลงดินของเฟส A

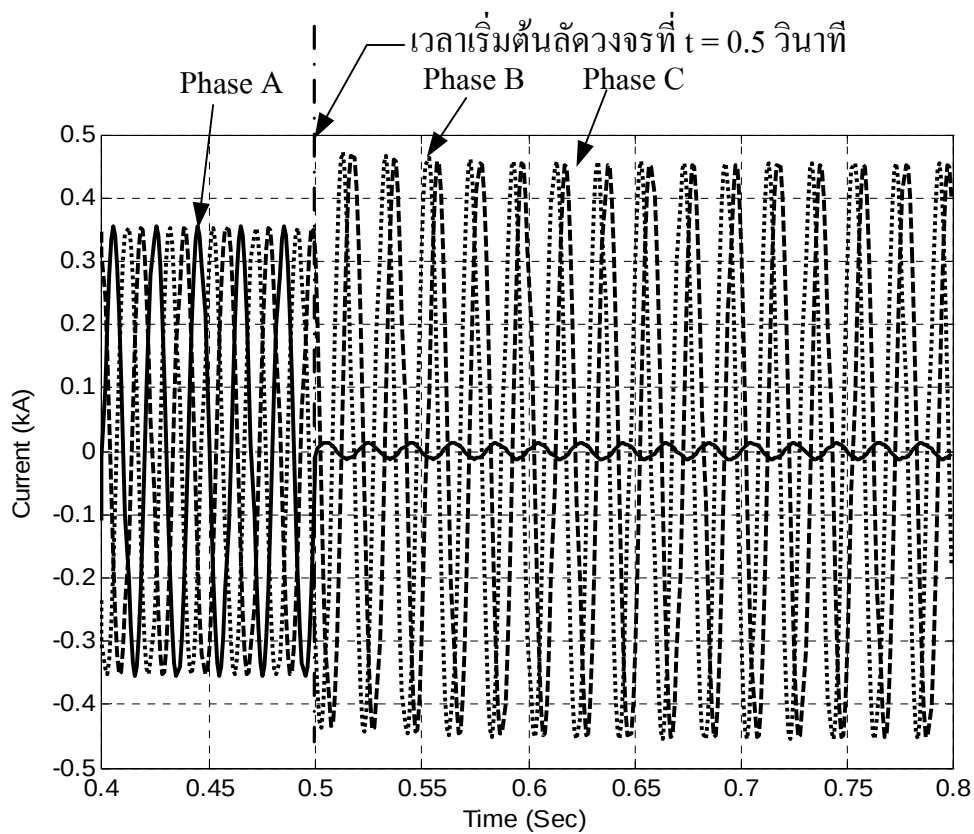


ภาพที่ 4-19 การทดสอบแบบจำลองการลัดวงจรขดลวดลงดินของขดลวดด้านปฐมภูมิ เฟส A

ภาพที่ 4-19 เป็นการทดสอบแบบจำลองการลัดวงจรลงดินของขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าในเฟส A ใช้ระบบไฟฟ้าเช่นเดียวกับการทดสอบหม้อแปลงในสภาวะปกติแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้น สามารถกำหนดตำแหน่งของการลัดวงจรลงดินตลอดความยาวของขดลวด โดยเริ่มพิจารณาตั้งแต่ 10 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนรอบขดลวดที่เกิดการลัดวงจร เพื่อหาขนาดของกระแสลัดวงจรลงดินและกระแสผลต่างด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดเวลาเริ่มต้นการลัดวงจรเท่ากับ 0.5 วินาที เวลาต่อเนื่องการลัดวงจรเท่ากับ 2 วินาที ซึ่งมีผลการทดสอบดังนี้



ภาพที่ 4-20 สัญญาณกระแสลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A



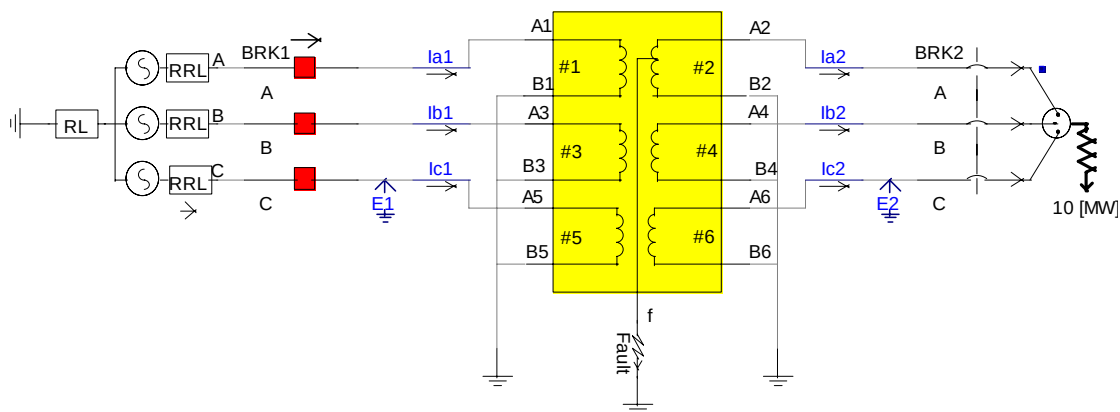
ภาพที่ 4-21 สัญญาณกระแสลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A

ภาพที่ 4-20 เป็นสัญญาณกระแสลัดวงจรลงดินทางด้านขดลวดปฐมภูมิเฟส A เมื่อเกิดการลัดวงจรจากขดลวดลงดิน 10 เปอร์เซ็นต์ ของขดลวดทั้งหมด จะสังเกตได้ว่าเมื่อเริ่มต้นเกิดการลัดวงจรที่เวลา 0.5 วินาที จะเกิดกระแสชั่วขณะสูงมากในช่วงเวลาแรกของรูปคลื่น หลังจากนั้นกระแสจะค่อยๆ ลดลงมาในลักษณะเอ็กโพเนนเชียลในช่วงเวลาต่อมาจนกระทั่งกระแสอยู่ในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state Current) ที่เวลา 0.7 วินาที ค่าของกระแสนั้นขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดซึ่งกระแสลัดวงจรในช่วงแรกนั้นมีลักษณะไม่สมมาตร (Unsymmetrical Fault Current) แล้วลดลงด้วยเวลาคงที่ L/R ซึ่งเป็นส่วนประกอบกระแสตรง ภาพที่ 4-21 เป็นกระแสทางด้านทุติยภูมิทั้งสามเฟสในสภาวะปกตินั้นจะมีกระแสไหลของหม้อแปลง จนถึงเวลาที่เกิดการลัดวงจร 0.5 วินาที กระแสในเฟส A จะลดลงใกล้เคียงศูนย์ ส่วนกระแสในเฟสอื่นๆ จะเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4-6 กระแสลัดวงจรลงดินและกระแสผลต่างของหม้อแปลงขดลวดที่ 1

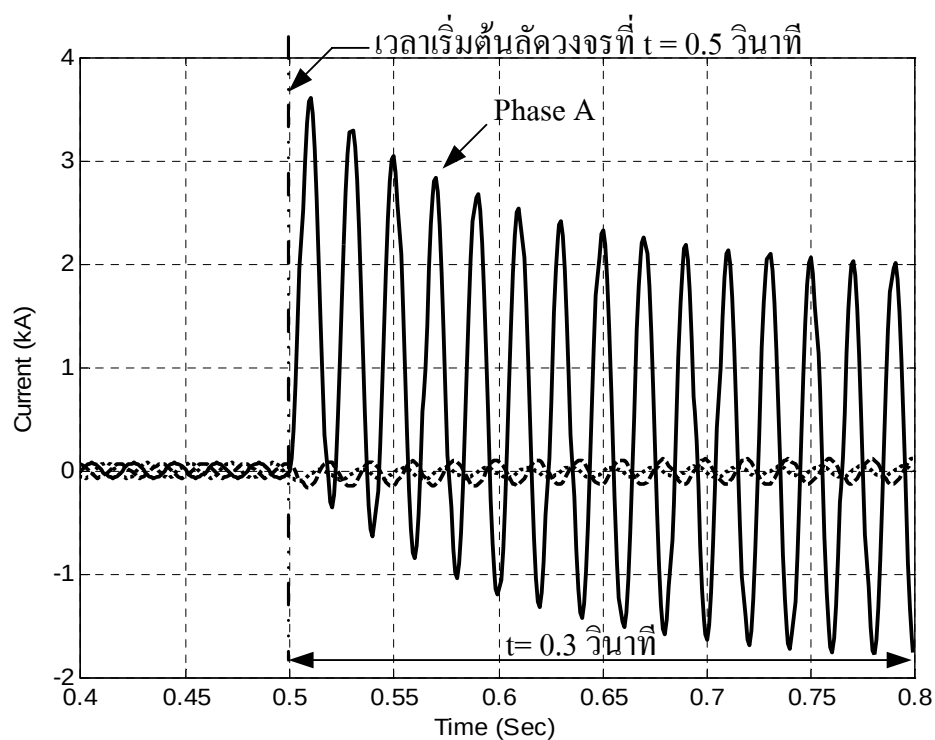
ระยะตำแหน่งเกิดความผิดปกติ จากขดลวด (เปอร์เซ็นต์)	กระแสลัดวงจรลงดิน Earth fault Current (A)	กระแสผลต่าง Differential Current (A)
10%	630	561
20%	708	561
30%	808	560
40%	940	559
50%	1,125	557
60%	1,399	554
70%	1,850	554
80%	2,724	537
90%	5,090	499

จากตารางที่ 4-6 จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนรอบของการลัดวงจรลงดินเพิ่มขึ้นค่ากระแสลัดวงจรก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและจะมีค่ากระแสสูงสุดที่ 90 % เท่ากับ 5,090 A เพราะว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรใกล้จุดนิวทรัลเนื่องจากค่ารีแอกแตนซ์ลดลง ส่วนกระแสผลต่างจะลดลงเล็กน้อยเมื่อใกล้จุดนิวทรัลที่ 90% มีค่าเท่ากับ 499 A

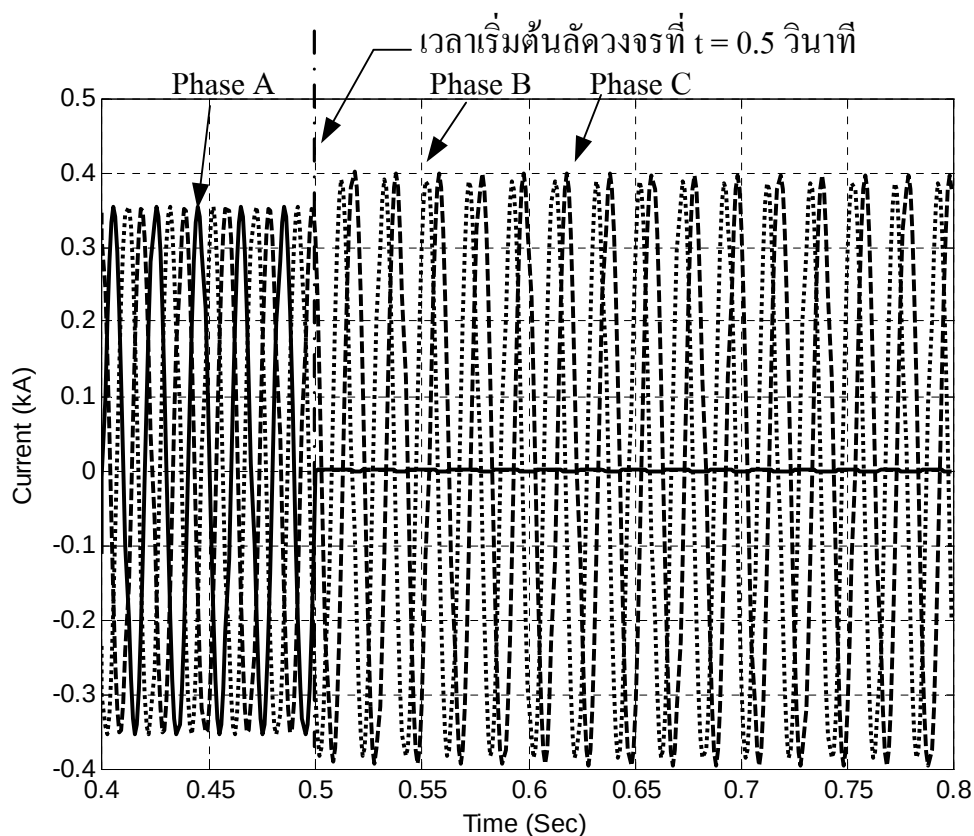


ภาพที่ 4-22 การทดสอบแบบจำลองการถ่วงจรวดลงดินของขดลวดด้านพุทัญญู เฟส A

ภาพที่ 4-22 เป็นการทดสอบแบบจำลองการลัดวงจรลงดินของขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าในเฟส A มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าของกระแสลัดวงจรลงดินระหว่างขดลวดด้านปฐมภูมิกับทุติยภูมิ โดยที่จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมินั้นเปลี่ยนแปลงเพราะฉะนั้นค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดก็จะเปลี่ยนแปลงตามด้วย กำหนดเวลาเริ่มต้นการลัดวงจรลงดินที่ 0.5 วินาที



ภาพที่ 4-23 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A



ภาพที่ 4-24 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A

ภาพที่ 4-23 เป็นสัญญาณกระแสลัดวงจรลงดินทางด้านขดลวดปฐมภูมิเฟส A เมื่อเกิดการลัดวงจรจากขดลวดลงดิน 10 เปอร์เซ็นต์ของขดลวดทั้งหมด จะสังเกตได้ว่าสัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิจะมีเฟสเดียวกันเพราะว่าหม้อแปลงต่อเป็นแบบ Y-Y กำหนดเวลาเริ่มต้นการลัดวงจรที่ 0.5 วินาที จะเกิดกระแสชั่วขณะในด้านปฐมภูมิเพราะว่าการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมินั้น ต้องอาศัยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นด้านปฐมภูมิ สัญญาณกระแสลัดวงจรมีลักษณะเช่นเดียวกับด้านปฐมภูมิ ด้วยเวลาคงที่ 0.3 วินาที ซึ่งใช้เวลานานกว่าการลัดวงจรที่ขดลวดปฐมภูมิ ภาพที่ 4-24 เป็นกระแสไหลคทางด้านทุติยภูมิทั้งสามเฟสในสภาวะปกติ จนกระทั่งถึงเวลาที่เกิดการลัดวงจร 0.5 วินาที กระแสในเฟส A จะลดลงใกล้เคียงศูนย์ ส่วนกระแสในเฟสอื่นๆ จะเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4-7 กระแสลัดวงจรลงดินและกระแสผลต่างของหม้อแปลงชนิดที่ 2

ระยะตำแหน่งเกิดความผิดปกติ จากขดลวด (เปอร์เซ็นต์)	กระแสลัดวงจรลงดิน Earth fault current (A)	กระแสผลต่าง Differential current (A)
10%	766	134
20%	862	134
30%	975	134
40%	1,150	134
50%	1,379	134
60%	1,722	134
70%	2,297	134
80%	3,435	133
90%	6,846	132

จากตารางที่ 4-7 จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนรอบของการลัดวงจรลงดินเพิ่มขึ้นค่ากระแสลัดวงจรก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและจะมีค่าสูงสุดเมื่อเกิดการลัดวงจรใกล้จุดนิวทรัล ส่วนกระแสผลต่างจะลดลงเล็กน้อยเมื่อใกล้จุดนิวทรัล

สรุปผลการทดสอบการเกิดความผิดปกติแบบลัดวงจรขดลวดลงดิน

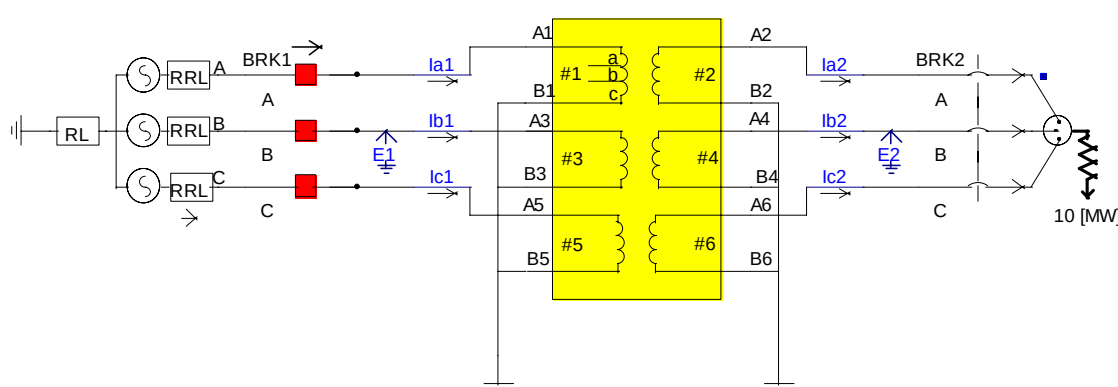
จากผลของการทดสอบแบบจำลองการลัดวงจรจากขดลวดลงดินทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น วัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดของกระแสลัดวงจรลงดินและกระแสผลต่างภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีบทสรุปดังนี้

1. เมื่อจำนวนรอบของขดลวดในการเกิดการลัดวงจรลงดินเพิ่มมากขึ้น ค่าของกระแสลัดวงจรลงดินจะเพิ่มขึ้นตามด้วย เพราะว่าค่ารีแอกแตนซ์จะลดลงเมื่อเกิดการลัดวงจรใกล้จุดนิวทรัล จึงทำให้กระแสมีค่าสูง
2. กระแสของเฟสของขดลวดที่เกิดการลัดวงจรจะมีขนาดสูงกว่ากระแสเฟสอื่นๆ ในสถานะชั่วขณะ
3. ขณะเกิดการลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิจะไม่เกิดสถานะชั่วขณะด้านทุติยภูมิ เพราะว่า การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมินั้นต้องอาศัยการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กด้านปฐมภูมิ
4. ขนาดของกระแสลัดวงจรในแต่ละด้านของแต่ละเฟสจะเท่ากัน เพราะว่ามีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันแต่ต่างกันตรงที่เวลาในการกลับสู่สถานะอยู่ตัวก็จะเปลี่ยนแปลงตามค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำของแต่ละขดลวด

4.7.3 การเกิดความผิดปกติแบบลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด

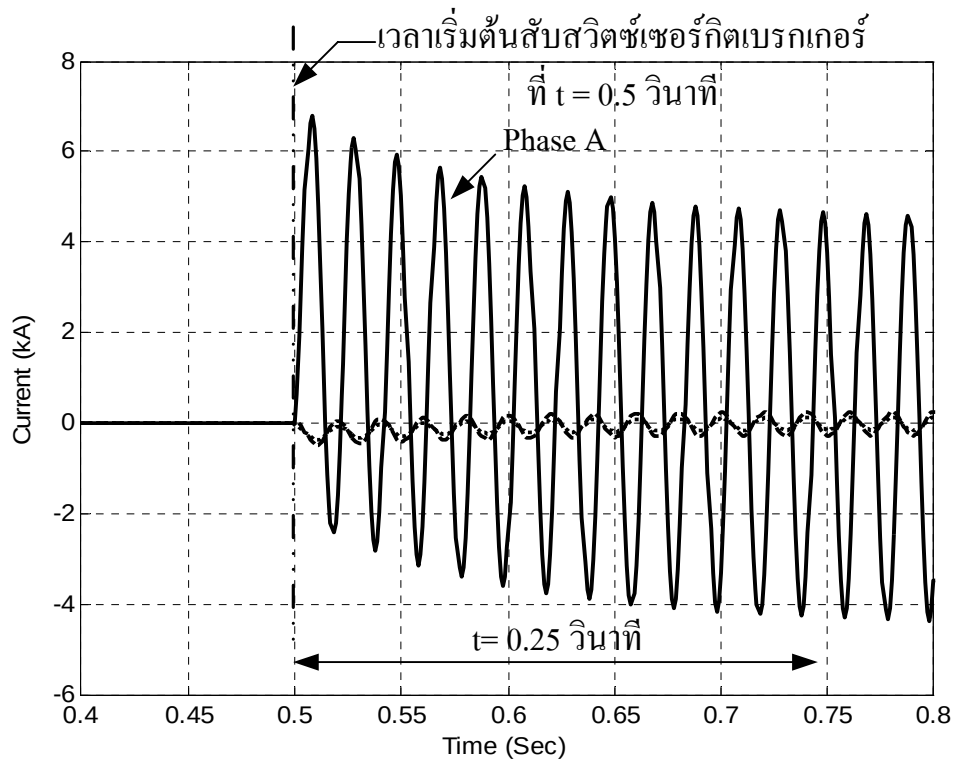
การทดสอบแบบจำลอง กรณีเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดภายในหม้อแปลงนั้น แบบจำลองที่สร้างขึ้น สามารถที่จะเลือกกรณีการลัดวงจรทั้งสองด้านของขดลวดหม้อแปลง ในแต่ละเฟสเช่นเดียวกับการลัดวงจรจากขดลวดลงดิน จากผลของค่าอิมพีแดนซ์ที่เท่ากันในงานวิจัยนี้ จึงยกตัวอย่างเฉพาะเฟส A แล้วทำการวัดกระแสของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ (I_{a1}) และทุติยภูมิ (I_{a2}) ดังภาพที่ 4-21 เพื่อหากระแสผลต่างของหม้อแปลง

ผลการทดสอบการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดเฟส A

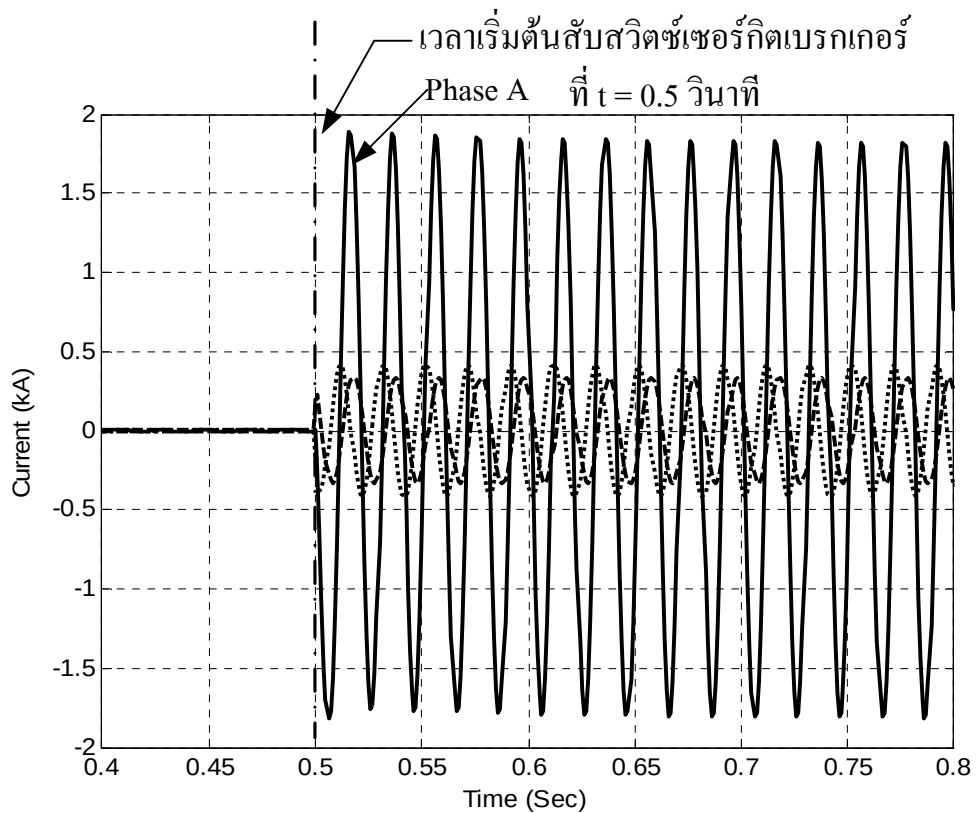


ภาพที่ 4-25 การทดสอบแบบจำลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ เฟส A

ภาพที่ 4-25 เป็นการทดสอบแบบจำลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าในเฟส A แบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นสามารถกำหนดตำแหน่งของการลัดวงจรลงดินตลอดความยาวของขดลวดที่เกิดการลัดวงจร โดยเริ่มพิจารณาการลัดวงจรที่ขดลวดย่อย b ตั้งแต่ 10 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนรอบขดลวดที่เกิดการลัดวงจร เพื่อหาขนาดของกระแสผลต่างด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดเวลาเริ่มต้นเวลาในการสับสวิตช์เซอร์กิตเบรกเกอร์ BRK1 เท่ากับ 0.5 วินาที ซึ่งมีผลการทดสอบดังนี้



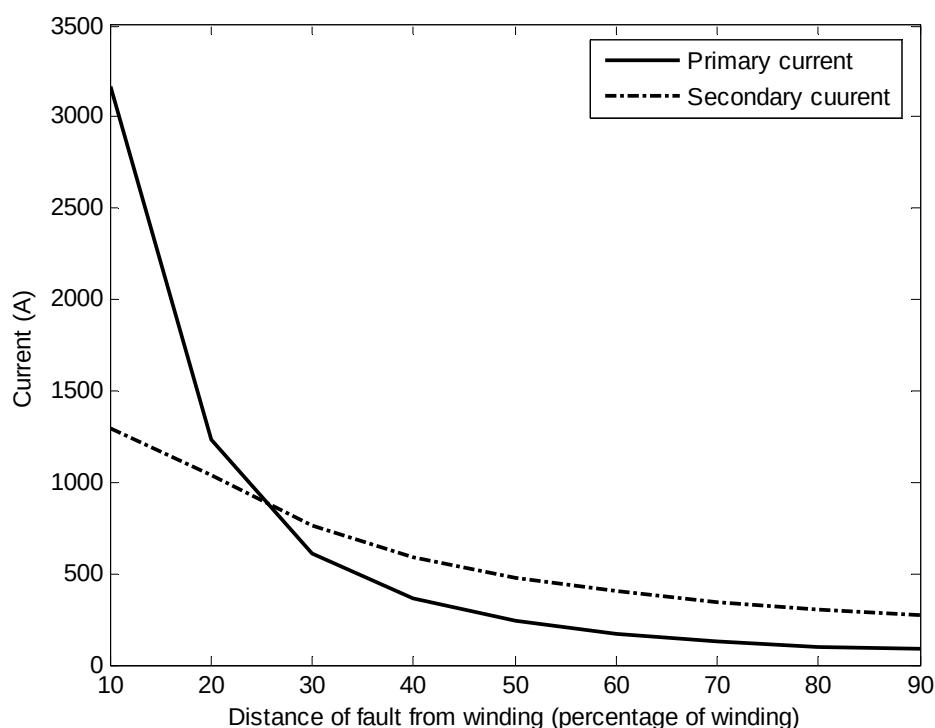
ภาพที่ 4-26 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A



ภาพที่ 4-27 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A

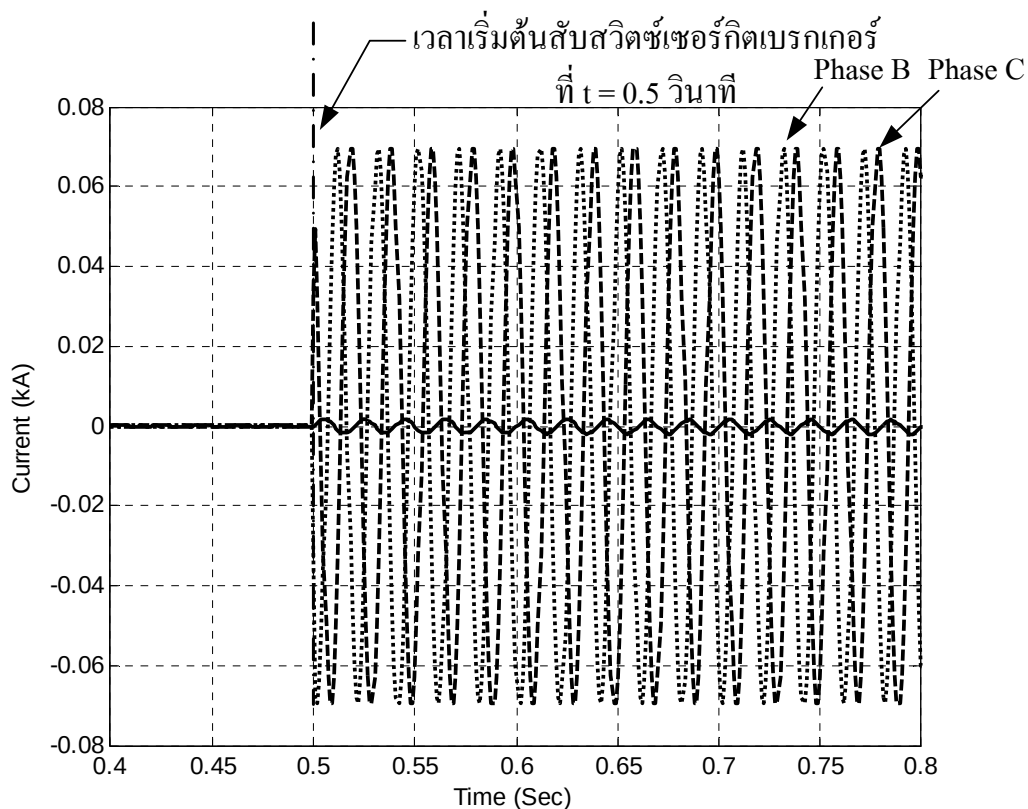
ภาพที่ 4-26 เป็นสัญญาณกระแสลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดปฐมภูมิเฟส A เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด 10 เปอร์เซ็นต์ของขดลวดทั้งหมด จะสังเกตได้ว่าเมื่อเริ่มต้นสับสวิตช์เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เวลา 0.5 วินาที จะเกิดกระแสชั่วขณะสูงในช่วงเวลาแรกของรูปคลื่น หลังจากนั้นกระแสจะค่อยๆ ลดลงมาถึงลักษณะเอ็กโพเนนเชียลในช่วงเวลาต่อมาจนกระทั่งกระแสอยู่ในสภาวะอยู่ตัว (steady-state Current) ที่เวลา 0.75 วินาที ซึ่งใช้เวลาทั้งหมด 0.25 วินาที

ภาพที่ 4-27 เป็นกระแสทางด้านทุติยภูมิทั้งสามเฟส เมื่อเริ่มต้นสับสวิตช์เซอร์กิตเบรกเกอร์นั้น กระแสในเฟส A สูงกว่าเฟสอื่นๆ มาก แต่เป็นกระแสในลักษณะสมมาตร (Symmetrical) ตลอดช่วงเวลา

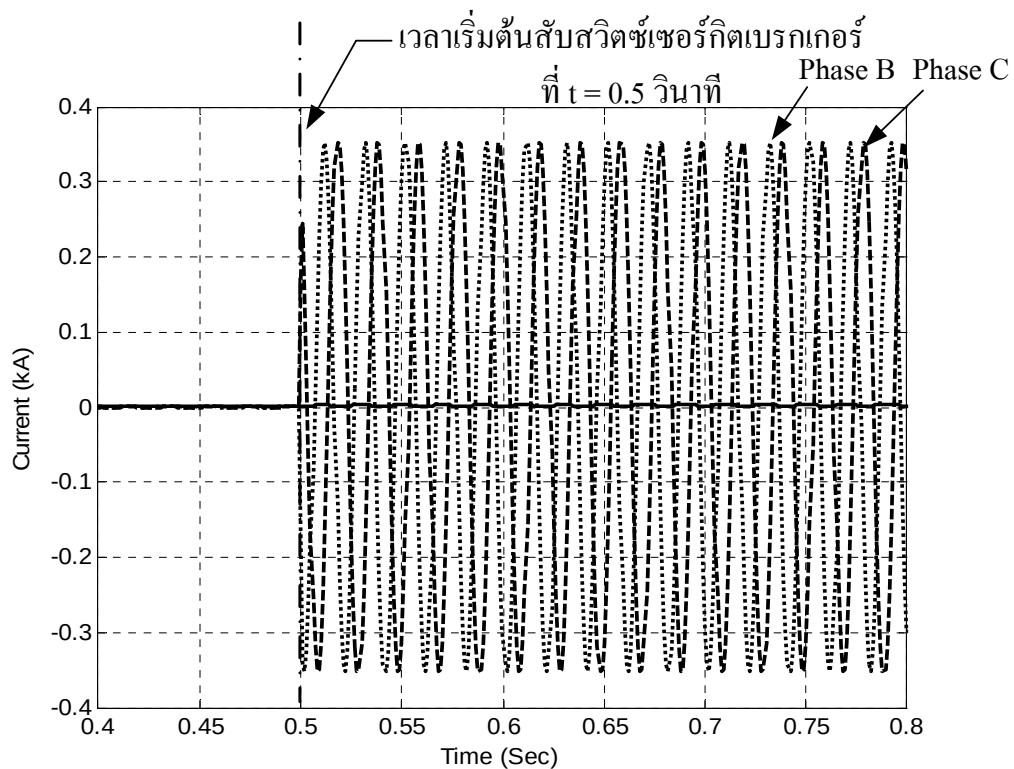


ภาพที่ 4-28 ขนาดของกระแสลัดวงจรระหว่างรอบทางด้านปฐมภูมิ

ภาพที่ 4-28 เป็นสัญญาณกระแสลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดปฐมภูมิเฟส A เมื่อจำนวนรอบของการลัดวงจรน้อยกว่าด้านปฐมภูมิจะมีค่าสูงกว่ากระแสทุติยภูมิในช่วงแรก จนกระทั่งจำนวนรอบการลัดวงจรประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนขดลวด กระแสเปลี่ยนเป็นด้านทุติยภูมิ มีขนาดมากกว่าด้านปฐมภูมิ และรักษารูปขนาดของกระแสผลต่างจะค่อยๆ ลดลงเมื่อจำนวนรอบในการลัดวงจรเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดจะน้อยในช่วงแรกและค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด

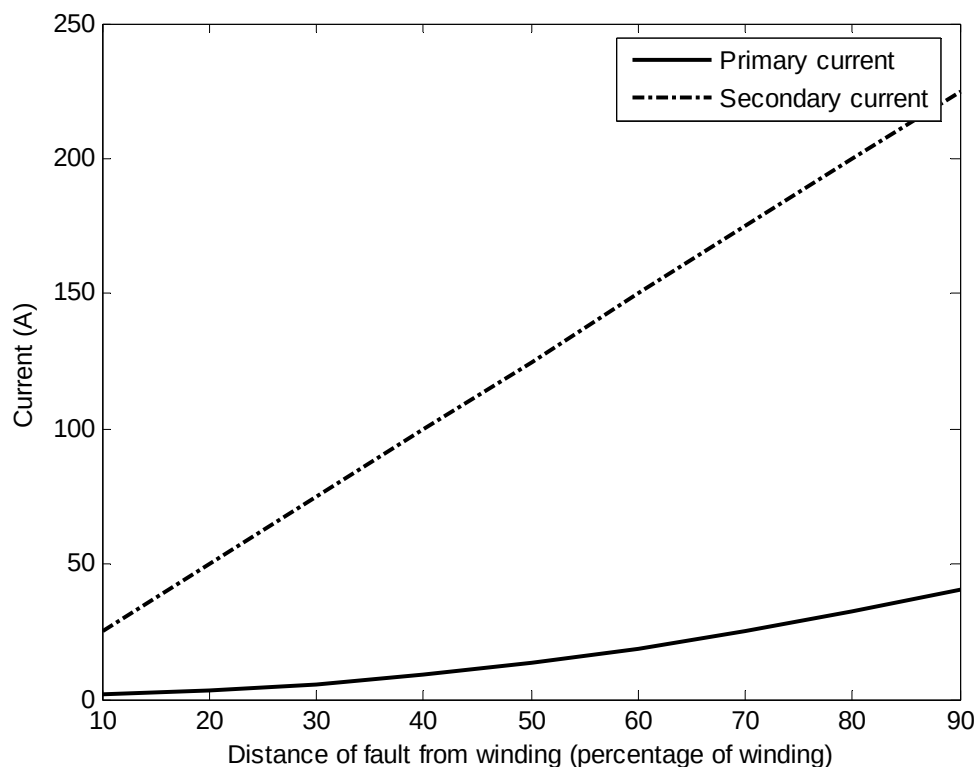


ภาพที่ 4-30 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A



ภาพที่ 4-31 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A

ภาพที่ 4-30 เป็นสัญญาณกระแสลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดทุติยภูมิเฟส A เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด 10 เปอร์เซ็นต์ของขดลวดทั้งหมด จะสังเกตได้ว่าเมื่อเริ่มต้นสับสวิทช์เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เวลา 0.5 วินาที กระแสในเฟส A จะลดลงใกล้เคียงศูนย์เมื่อเทียบกับเฟสอื่นๆ ส่วนกระแสทางด้านทุติยภูมินั้นแสดงดังภาพที่ 4-31 สัญญาณกระแสมีลักษณะเช่นเดียวแต่มีค่ามากกว่า



ภาพที่ 4-32 ขนาดของกระแสลัดวงจรระหว่างรอบทางด้านทุติยภูมิ

ภาพที่ 4-32 ขนาดของกระแสลัดวงจรระหว่างรอบด้านทุติยภูมิจะเป็นกระแสไหลไปยังโหลดของหม้อแปลงจะเป็นสัดส่วนกับจำนวนรอบการลัดวงจรกล่าวคือ เมื่อจำนวนรอบของขดลวดลัดวงจรเพิ่มมากขึ้นกระแสด้านทุติยภูมิก็จะเพิ่มขึ้นตามด้วย ส่วนกระแสด้านปฐมภูมินั้นจะค่อยเพิ่มอย่างช้าแต่มีขนาดของกระแสน้อยทุติยภูมิจึงทำให้เกิดผลต่างของกระแสมากในกรณีนี้

สรุปผลการทดสอบการเกิดความผิดปกติของแบบลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด

จากผลของการทดสอบแบบจำลองการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดลงทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้น เพื่อหาค่ากระแสผลต่างภายในหม้อแปลงมีบทสรุปดังนี้

1. เมื่อเกิดการเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิจำนวนรอบน้อย จะมีกระแสไหลวนในวงรอบของขดลวดสูง และจะลดลงเมื่อจำนวนรอบการลัดวงจรเพิ่มขึ้นเพราะอัตราส่วนจำนวนรอบทั้งหมดและรอบที่ลัดวงจรมีค่าสูง
2. เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบทางด้านทุติยภูมิจะมีกระแสไหลผ่านไปยังโหลด เป็นสัดส่วนกับจำนวนรอบที่เกิดการลัดวงจร มีกระแสผลต่างของขดลวดทั้งสองมาก

4.8 สรุปผล

การสร้างแบบจำลองเกิดการลัดวงจรภายในนั้น จะต้องใช้ค่าการทดสอบหม้อแปลงมาป้อนลงใน BCTRAN เพื่อหาค่าความต้านทาน [R] และความเหนี่ยวนำ [L] ซึ่งส่วนสำคัญในการสร้างแบบจำลอง จากการทดสอบแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานะปกติที่มีความถูกต้องเมื่อเทียบกับการคำนวณ ส่วนค่าของกระแสลัดวงจรลงดินของหม้อแปลงจะมีค่าสูงเมื่อตำแหน่งการลัดวงจรใกล้จุดนิวทรัล ซึ่งจะต้องต่ออิมพีแดนซ์ลงดินเพื่อจำกัดความรุนแรงของกระแส ส่วนการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดนั้นแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ เกิดการลัดวงจรด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงในกรณีนี้ เมื่อจำนวนรอบการลัดวงจรน้อยจะมีค่ากระแสสูงตามอัตราส่วนของขดลวดที่ลัดวงจรกับขดลวดทั้งหมด กระแสจะมีขนาดลดลงเมื่อจำนวนรอบในการลัดวงจรเพิ่มมากขึ้น ส่วนการเกิดการลัดวงจรด้านปฐมภูมินั้นจะกระแสไหลผ่านไปยังโหลดเป็นสัดส่วนกับจำนวนรอบในการลัดวงจร

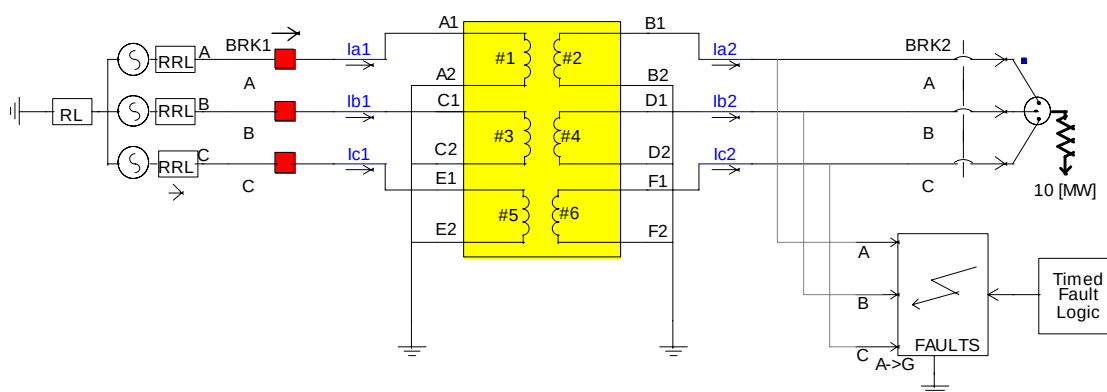
บทที่ 5

การป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

รายละเอียดของบทนี้จะกล่าวถึงการจำลองกระแสลัดวงจรภายนอกแบบต่างๆ ต่อการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน (Single Line to Ground Fault) และการลัดวงจรแบบสามเฟส (Three Phase Fault) ภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง รีเลย์การป้องกันแบบผลต่างนั้นจะทำงานเมื่อเกิดความผิดปกติของกระแสการป้องกันและจะไม่ทำงานเมื่อเกิดความผิดปกติของกระแสการป้องกันนั้นคือนิยามในการป้องกัน โดยทำการจำลองการทำงานของรีเลย์ตามเงื่อนไขที่ปรับตั้งค่าระบบป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้า

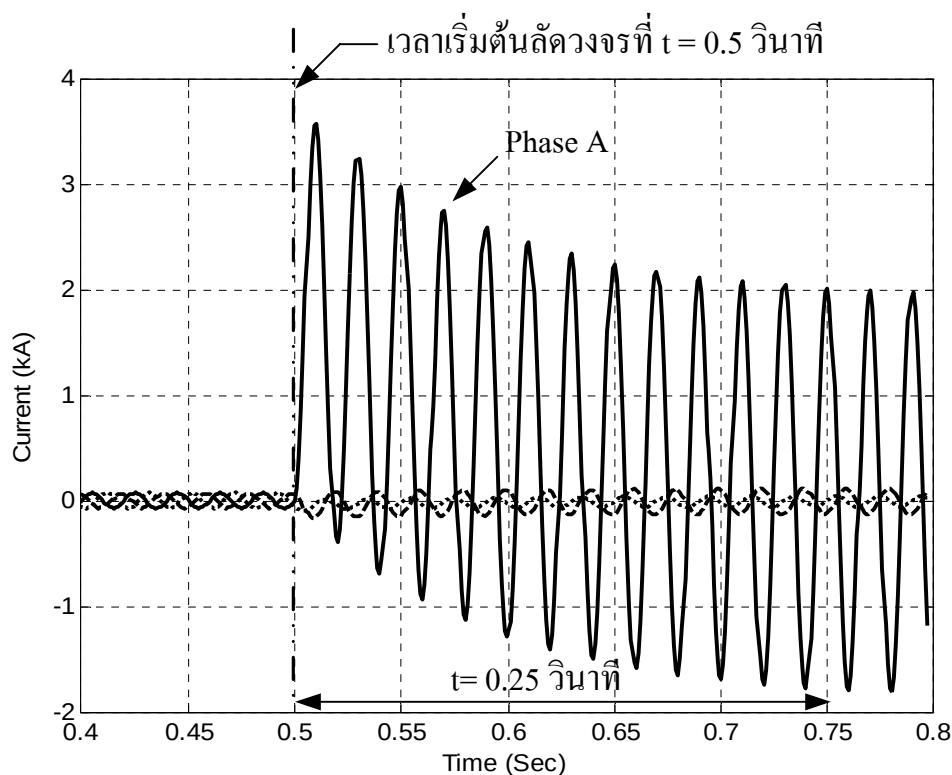
5.1 การลัดวงจรภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

การเกิดการลัดวงจรภายนอกเขตการป้องกันหม้อแปลงนั้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบและเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ ของแบบจำลองหม้อแปลงในสภาวะปกติ ประกอบด้วยการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน (Single Line to Ground Fault) และการลัดวงจรสามเฟส (Three Phase Fault) เพื่อศึกษาการทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง



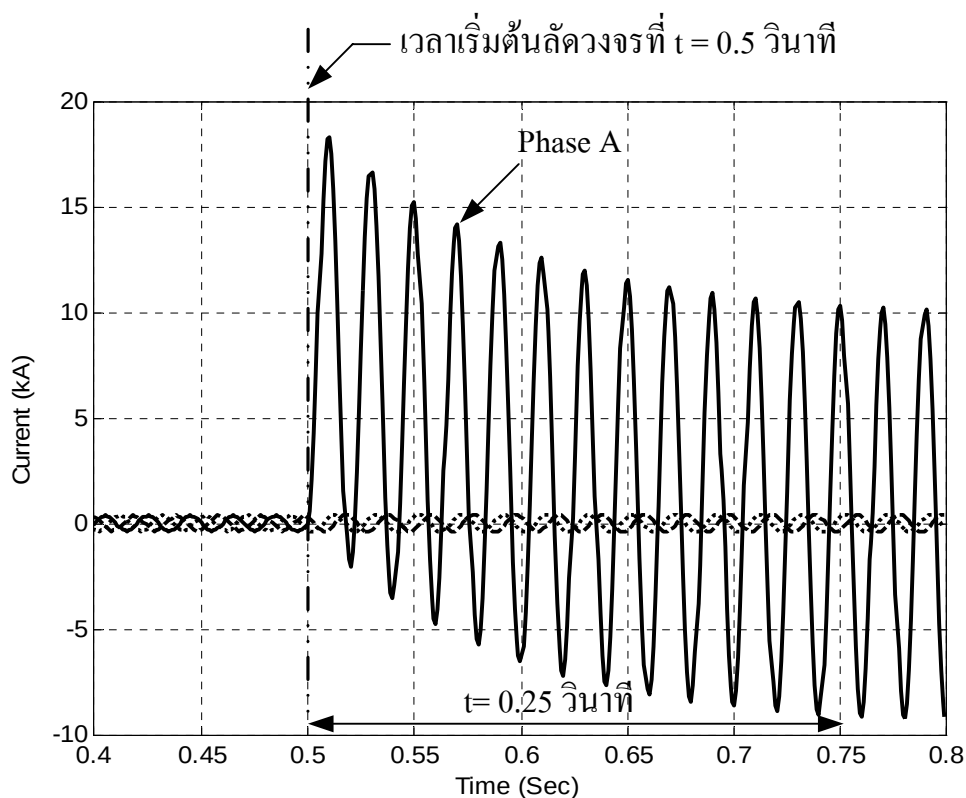
ภาพที่ 5-1 การลัดวงจรภายนอกหม้อแปลงแบบเฟสเดียวลงดิน (Single Line to Ground Fault)

ภาพที่ 5-1 เป็นการจำลองการลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดินภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ โดยกำหนดเวลาเริ่มต้นของการลัดวงจรเท่ากับ 0.5 นาที เป็นเวลานาน 2 นาที



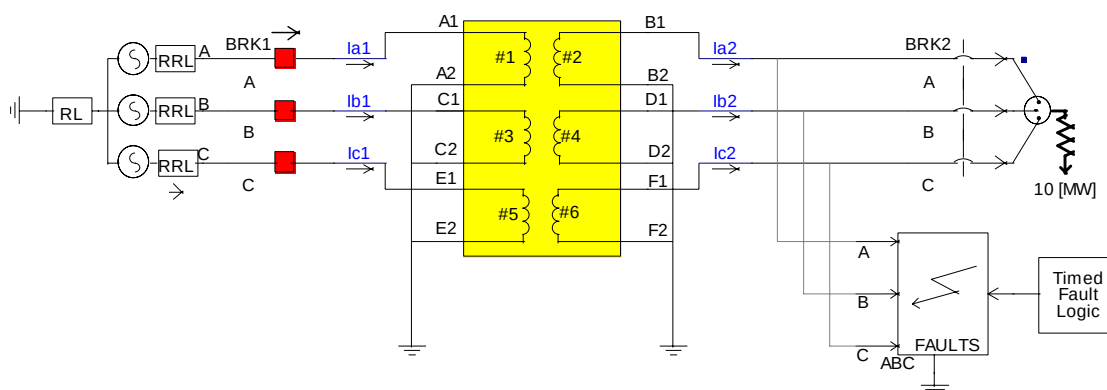
ภาพที่ 5-2 สัญญาณกระแสลัดวงจรลงดินเฟส A ภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ

ภาพที่ 5-2 เป็นสัญญาณกระแสลัดวงจรลงดินเฟส A ทางด้านปฐมภูมิเมื่อเกิดการลัดวงจรภายนอกเขตการป้องกันหม้อแปลงดังภาพที่ 5-1 จะสังเกตได้ว่าเมื่อเริ่มต้นเกิดการลัดวงจรที่เวลา 0.5 นาฬิกา จะเกิดกระแสชั่วขณะในเฟส A สูงมากในช่วงเวลาแรกของรูปคลื่น หลังจากนั้นกระแสจะลดลงมาในลักษณะเอ็กโพเนนเชียลในช่วงเวลาต่อมาจนกระทั่งกระแสอยู่ในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state Current) ที่เวลาประมาณ 0.75 นาฬิกา ใช้เวลาทั้งหมด 0.25 นาฬิกา



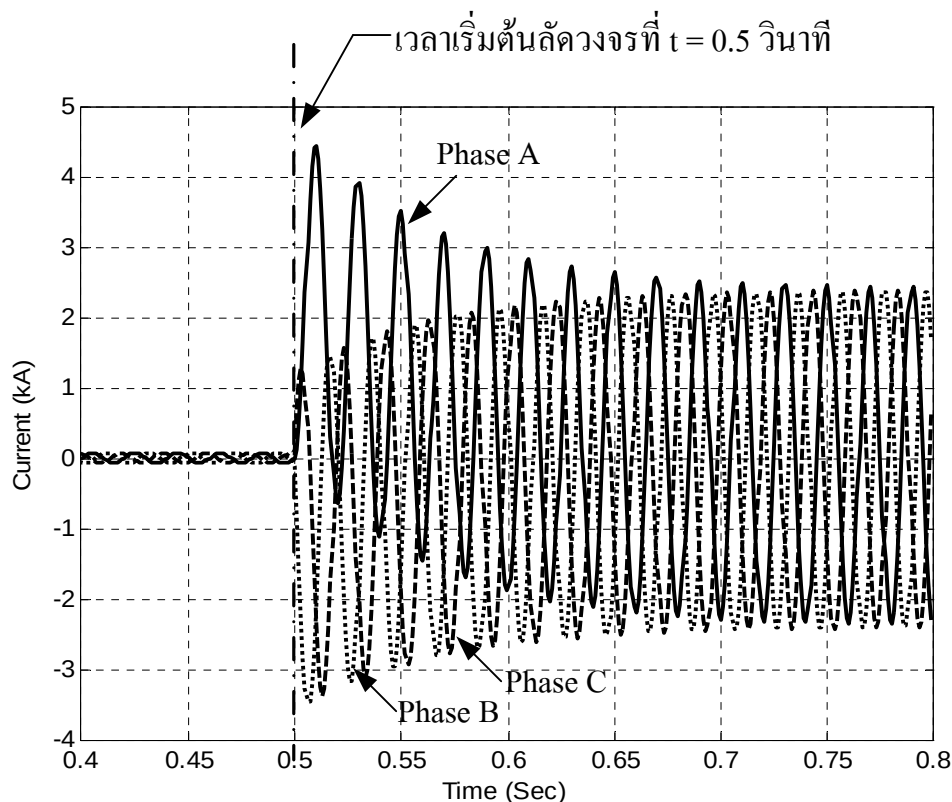
ภาพที่ 5-3 สัญญาณกระแสลัดวงจรลงดินเฟส A ภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ

ภาพที่ 5-3 เป็นกระแสลัดวงจรลงดินทางด้านทุติยภูมิ ในช่วงเวลาแรกนั้นจะมีกระแสไหลตกปกติของหม้อแปลงจนถึงเวลาที่เกิดการลัดวงจร 0.5 นาที่ กระแสในเฟส A จะเพิ่มขึ้นแบบเดียวกับทางด้านปฐมภูมิแต่มีขนาดกระแสประมาณ 20 kA ซึ่งมากกว่าด้านปฐมภูมิ ใช้เวลาทั้งหมดตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งกระแสเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว 0.25 นาที่



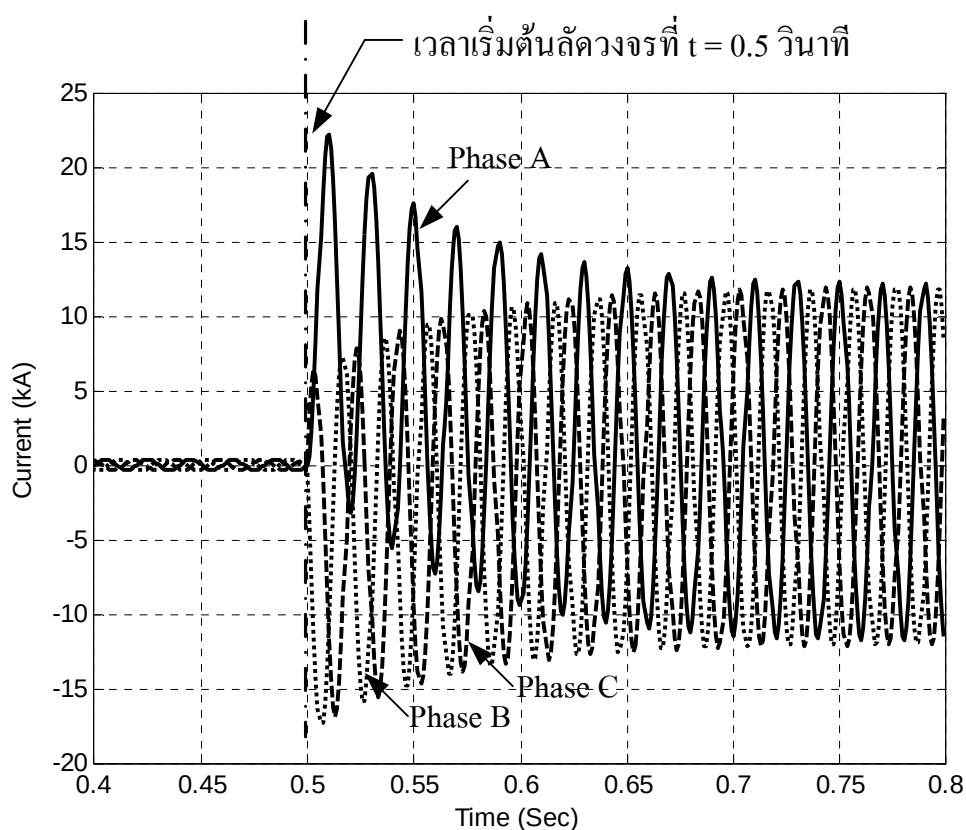
ภาพที่ 5-4 การลัดวงจรภายนอกหม้อแปลงแบบสามเฟส (Three Phase Fault)

ภาพที่ 5-4 เป็นการจำลองการลัดวงจรภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบสามเฟส ขณะจ่ายโหลดโดยกำหนดเวลาเริ่มต้นของการลัดวงจรเท่ากับ 0.5 นาฬิกา เป็นเวลานาน 2 นาฬิกา



ภาพที่ 5-5 สัญญาณกระแสลัดวงจรสามเฟสภายนอกทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

ภาพที่ 5-5 เป็นสัญญาณกระแสลัดวงจรสามเฟสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อเกิดการลัดวงจรภายนอกเขตการป้องกันหม้อแปลง จะสังเกตได้ว่าเมื่อเริ่มต้นเกิดการลัดวงจรที่เวลา 0.5 นาฬิกา จะเกิดกระแสชั่วขณะทั้งสามเฟสสูงมากแต่มีเฟสต่างกันในช่วงเวลาแรกของรูปคลื่น หลังจากนั้นกระแสทั้งสามเฟสจะลดลงมาในลักษณะเอ็กโพเนนเชียล ในช่วงเวลาต่อมาจนกระทั่งกระแสอยู่ในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state Current) ที่เวลาประมาณ 0.7 นาฬิกา ใช้เวลาทั้งหมด 0.2 นาฬิกา

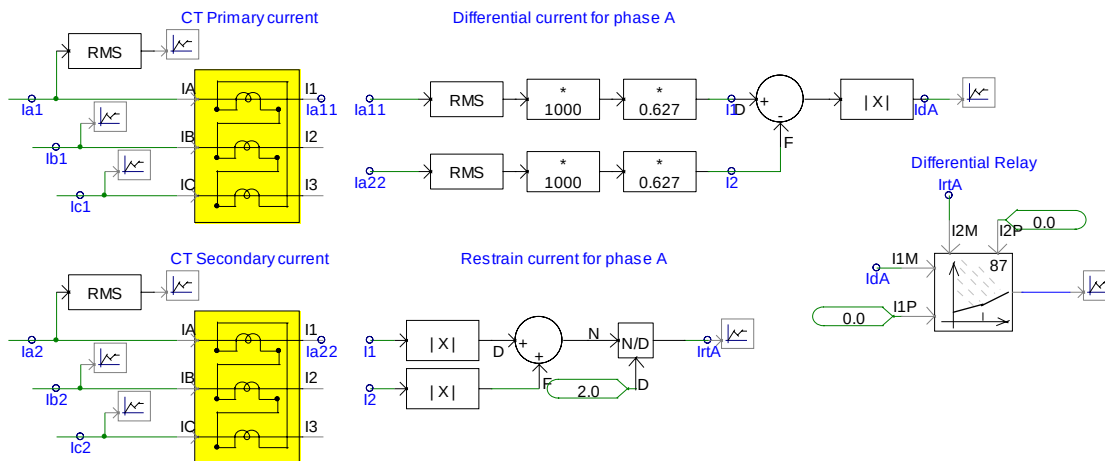


ภาพที่ 5-6 สัญญาณกระแสลัดวงจรสามเฟสภายนอกทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

ภาพที่ 5-6 เป็นกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสทางด้านทุติยภูมิในช่วงเวลาแรกนั้นจะมีกระแสไหลของหม้อแปลงจนถึงเวลาที่เกิดการลัดวงจร 0.5 นาติ กระแสของหม้อแปลงทั้งสามเฟสจะเพิ่มขึ้น

5.2 การจำลองระบบการป้องกันหม้อแปลงแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

การป้องกันแบบผลต่างนั้น ใช้หลักการเปรียบเทียบกระแสผลต่างของหม้อแปลงทั้งสองด้าน กระแสที่ใช้ในการเปรียบเทียบนั้นจะต้องมีการแก้ไขการเลื่อนเฟส และจะต้องชดเชยความผิดพลาดเนื่องจากอัตราส่วนของ CT ในงานวิจัยนี้ได้ยกตัวอย่างการทำงานของของรีเลย์ป้องกันในเฟส A มาทำการจำลอง



ภาพที่ 5-7 ระบบการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ภาพที่ 5-7 เป็นการจำลองระบบป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เริ่มต้นจากการตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงกระแส (CT) เนื่องจากขดลวดหม้อแปลงต่อแบบวาย-วาย เพราะฉะนั้นจึงต้องต่อหม้อแปลงกระแส (CT) เป็นแบบเดลต้า แล้วจึงนำกระแสมาเปรียบเทียบกระแสผลต่างและกระแสด้านการทำงานก่อนทำการประมวลผลที่รีเลย์ผลต่างตามเกณฑ์ที่ได้ปรับตั้งไว้

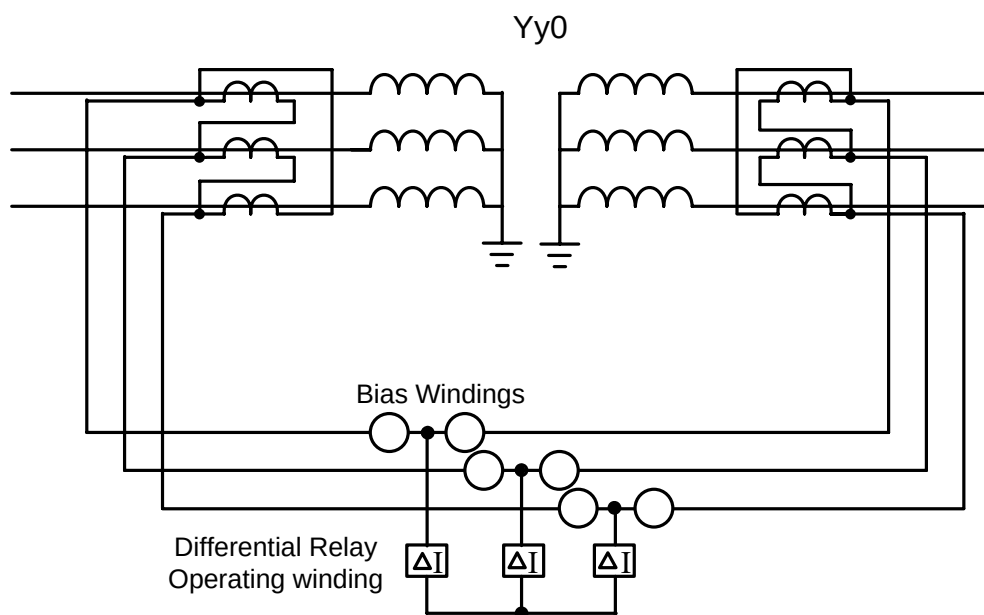
การจำลองการทำงานของระบบการป้องกันแบบผลต่างหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้นเพื่อต้องการตรวจสอบสถานะการทำงานของรีเลย์โดยการเปรียบเทียบกระแสผลต่าง (Differential Current) กับกระแสด้านการทำงาน (Restraining Current) ในงานวิจัยนี้ใช้วงจรทดสอบของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดในสภาวะปกติในบทที่ 4 ภาพที่ 4-15 มาทำการจำลองการทำงานของรีเลย์

5.3 การคำนวณค่าปรับตั้งของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง

รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างเป็นรีเลย์ที่มีการทำงานไว เพราะว่าอาศัยการเปรียบเทียบกระแสผลต่างของหม้อแปลง ซึ่งในการคำนวณปรับตั้งค่านั้นจะมีข้อพิจารณาดังนี้

5.3.1 อัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส เนื่องจากไม่สามารถหาหม้อแปลงกระแสที่กระแสที่ตรงกับการคำนวณได้เพราะฉะนั้นในการคำนวณจะมีการชดเชยความผิดพลาด (Plug Setting) ที่เกิดขึ้นเพื่อแก้ไขอัตราส่วนที่ถูกต้องก่อนเข้าสู่รีเลย์

5.3.2 การต่อขดลวดหม้อแปลงกระแส (CT) ในงานวิจัยนี้ขดลวดหม้อแปลงทั้งสองด้านต่อเป็นแบบวาย-วาย เพราะฉะนั้นจะต้องต่อหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้านเป็นแบบเดลต้าเพื่อชดเชยการเลื่อนเฟสของหม้อแปลง



ภาพที่ 5-8 ระบบการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้า

ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ขนาดแรงดัน	115/23 kV
พิกัดกำลังไฟฟ้า	50 MVA
เวกเตอร์กรุป	Yyn0
CT ด้านแรงดันสูง	400/5 10VA class 5P10
CT ด้านแรงดันต่ำ	2000/5 10VA class 5P10

การคำนวณกระแสของ CT

กระแสปกติของหม้อแปลงด้านแรงสูง

$$I_1 = \frac{50 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 115 \text{ kV}} = 251.02$$

เลือก CT HV ขนาด 400/5

เพราะฉะนั้นกระแสไหลผ่าน CT

$$I_1 = 251.02 \times \frac{5}{400} = 3.13$$

แต่ CT ด้าน 115 kV ต่อแบบเคลดต่ำ

$$I_1 = \sqrt{3} \times 3.13 = 5.43$$

คำนวณหา Plug setting ของรีเลย์

$$\begin{aligned} \text{Plug setting} &= 251.02 / 400 \\ &= 0.627 \end{aligned}$$

กระแสปกติของหม้อแปลงด้านแรงต่ำ

$$I_2 = \frac{50 MVA}{\sqrt{3} \times 23 kV} = 1,255.10$$

เลือก CT HV ขนาด 2000/5

เพราะฉะนั้นกระแสไหลผ่าน CT

$$I_2 = 1,255.10 \times \frac{5}{2000} = 3.13$$

แต่ CT ด้าน 23 kV ต่อแบบเดลต้า

$$I_2 = \sqrt{3} \times 3.13 = 5.43$$

คำนวณ Plug Setting ของรีเลย์

$$\begin{aligned} \text{Plug Setting} &= 1,255.10 / 2000 \\ &= 0.627 \end{aligned}$$

การปรับตั้งค่าคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ (Setting the Tripping Characteristic)

กระแสไฟฟ้าลัดวงจรด้านทุติยภูมิ = 8,494 A

$$\text{กระแสลัดวงจร} = \left(\frac{8,494}{1,255.10} \right) \times I_r = 6.767 \times I_r$$

ปรับตั้งค่าเริ่มต้นในการตรวจจับความผิดปกติในหม้อแปลงในการตัดวงจรมากกว่า 80 %
ของกระแสผลต่าง (Id)

$$\text{Trip Id} > = 0.8 \times 6.767 I_n$$

$$= 5.414 \times I_r$$

เพื่อกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก = 5% x Ir

ความผิดพลาดของ CT = 3 %

เพื่อเวลาความปลอดภัย = 120%

$$IS1 = 2 \times (0.05+0.03) \times 1.2 \times I_r$$

$$= 0.192 \times I_r \text{ (เลือกค่า} = 0.2 \times I_r \text{)}$$

ปรับตั้งค่า IS2 = 2 x Ir

กระแสผลต่างและกระแสด้านการทำงานของรีเลย์

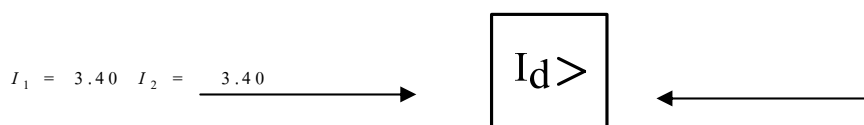
$$I_1 = 5.43 \times 0.627 = 3.40$$

$$I_2 = 5.43 \times 0.627 = 3.40$$

$$I_{diff} = |I_1 - I_2| = 3.40 - 3.40 = 0$$

$$I_{bias} = \frac{|I_1| + |I_2|}{2} = \frac{3.40 + 3.40}{2} = 3.40 \text{ A}$$

กระแสที่ไหลผ่านรีเลย์



เลือกปรับตั้งค่า IS1 = 0.2 เป็นค่าต่ำสุดสำหรับการทำงานของรีเลย์

เลือกค่าความชัน (Slop) = 30 %

$$|I_{diff}| > K_1 |I_{bias}| + I_{S1} \text{ then trip}$$

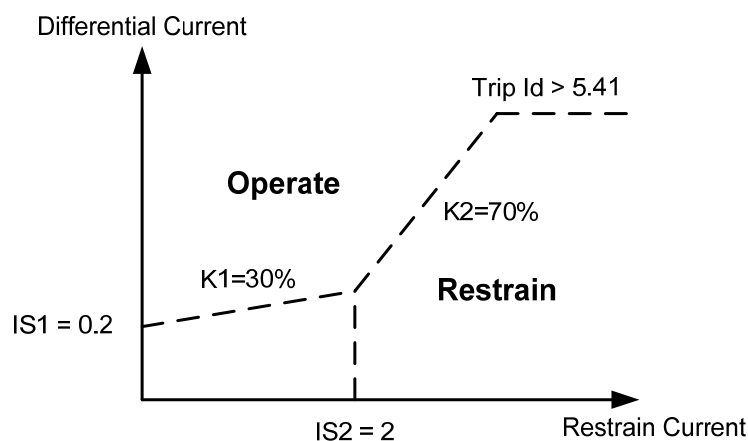
$$I_{op} = Idiff > 0.3 \times 3.40 + 0.2 = 1.22 \text{ A}$$

รีเลย์จะทำงานเมื่อมีกระแสผลต่างทำงาน ($I_{operating}$) มากกว่า $> 1.22 \text{ A}$

ตารางที่ 5-1 การปรับตั้งค่าของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง

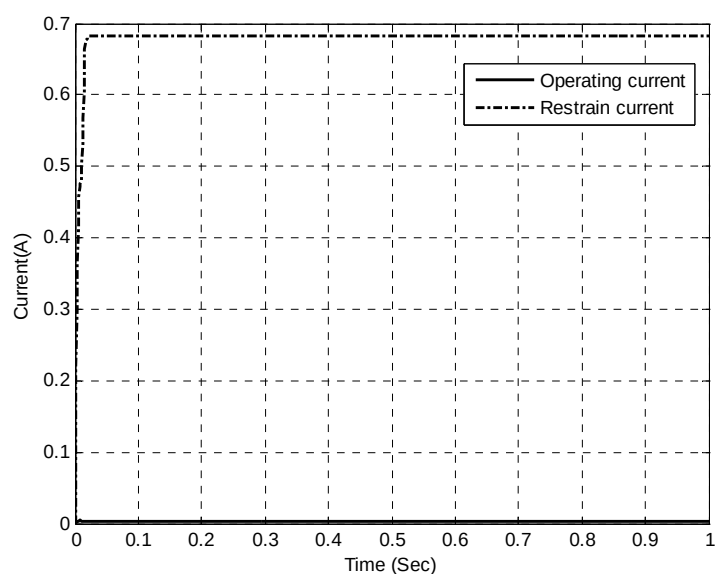
Setting	Primary	Secondary
Current	251.02	1,255.01
CT Ratio	400/5	2000/5
Plug setting	0.627	0.627
IS1	0.2	
IS2	2	
Slope K1	30%	
Slope K2	70%	
Trip Id >	5.41	

จากตารางที่ 5-1 เป็นค่าที่ใช้ในการปรับตั้งและกระแสเริ่มต้นในการทำงานของรีเลย์ จากการคำนวณนั้นเป็นการตั้งค่ารีเลย์ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง ซึ่งในงานวิจัยนี้นั้นจะทำการทดสอบการทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างขณะจ่ายโหลดในสภาวะปกติ และเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงเพื่อดูสภาวะการทำงานของรีเลย์



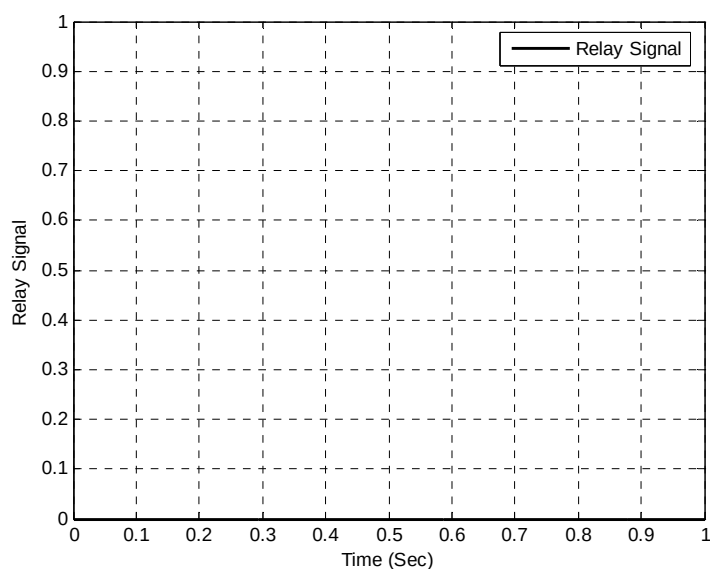
ภาพที่ 5-9 การปรับตั้งค่าคุณลักษณะของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง

ภาพที่ 5-9 เป็นคุณลักษณะของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างของโปรแกรม PSCAD/EMTDC มีลักษณะเป็น 2 ความชัน ในอุดมคติจะไม่มีผลต่างกระแสและกระแสฟอลต์ไหลผ่านรีเลย์ผลรวมของกระแสเท่ากับศูนย์รีเลย์จะไม่ทำงาน (No Trip) แต่เมื่อหม้อแปลงกระแสเกิดความผิดพลาดและคลาดเคลื่อน ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแท๊ป จะทำให้ได้กระแสผลต่างที่ไม่เป็นจริงเป็นสัดส่วนกับกระแสของหม้อแปลงมีกระแสเพิ่มขึ้น แต่ยังไม่เกิดการลัดวงจรเพียงแต่เป็นการเปลี่ยนแท๊ปเท่านั้น จึงต้องมีการปรับตั้งค่าความชันในช่วงแรก (K1) ของกราฟคุณสมบัติรีเลย์เพื่อให้รีเลย์มองเห็นว่าอยู่ในสภาวะปกติ แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีกระแสผลต่างที่สูงขึ้นโดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการเกิดฟอลต์ เช่น แหล่งจ่าย ระยะเวลาในการเกิดฟอลต์ ตำแหน่งของการเกิดฟอลต์ ค่าอิมพีแดนซ์ เพราะฉะนั้นรีเลย์จะปรับตั้งความชัน (K2) เพื่อให้รีเลย์เกิดความไวในการป้องกันอุปกรณ์



ภาพที่ 5-10 กระแสผลต่างและกระแสด้านการทำงานของรีเลย์

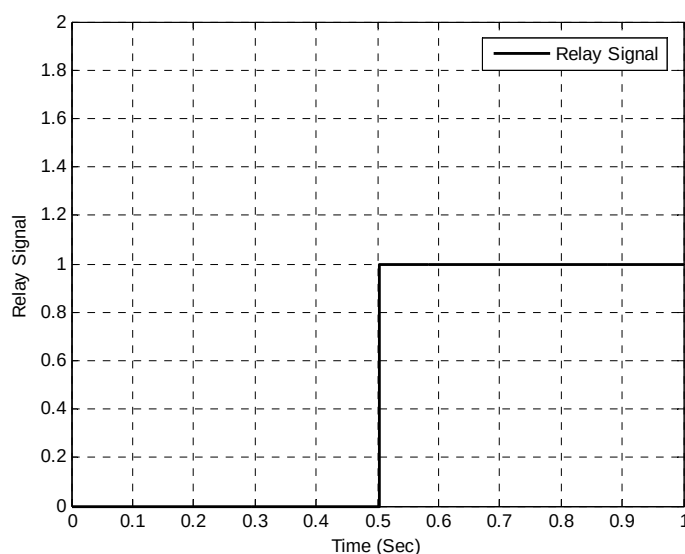
จากภาพที่ 5-10 เป็นการเปรียบเทียบขนาดของกระแสผลต่างและกระแสด้านการทำงานของรีเลย์ จะสังเกตได้ว่ากระแสผลต่างของรีเลย์จะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสด้านการทำงาน จะมีค่ามากกว่าประมาณ 0.68 A ในสภาวะนี้รีเลย์จะไม่ทำงาน



ภาพที่ 5-11 สัญญาณรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างขณะจ่ายโหลดปกติ 10 MW

จากภาพที่ 5-11 เป็นสัญญาณการทำงานของรีเลย์เพื่อไปสั่งเซอร์กิตเบรกเกอร์ จะสังเกตได้ว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์จะไม่ทำงาน เพราะขนาดของกระแสด้านการทำงานมากกว่ากระแสผลต่างของรีเลย์

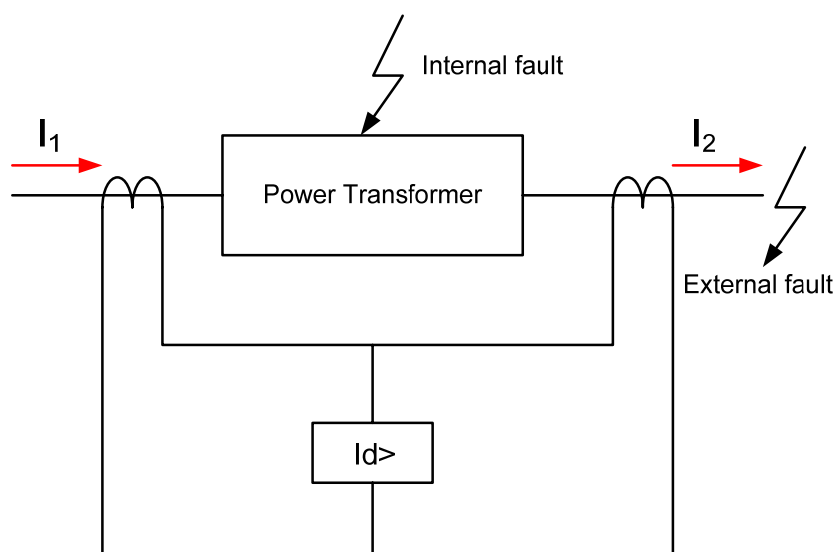
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบระบบการป้องกันผลต่างเมื่อเกิดการลัดวงจรจากขดลวดลงดินภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนรอบทั้งหมดมีผลดังนี้



ภาพที่ 5-12 สัญญาณของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างขณะลัดวงจรลงดิน

จากภาพที่ 5-12 เป็นผลของการทำงานของรีเลย์ในการสั่งเซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงาน จะเห็นได้ว่าเมื่อถึงเวลาเริ่มต้นลัดวงจรที่ 0.5 นาติ รีเลย์จะทำงานโดยส่งสัญญาณไปสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจรลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังออกจากระบบ

เนื่องจากการทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง จะทำงานตามเงื่อนไขในการปรับตั้งค่าในตารางที่ 5-1 และกำเนิดสัญญาณในการลัดวงจรออกมาเป็นสถานะลอจิกสูง (Hi) และต่ำ (Low) เพราะฉะนั้นจึงจำลองการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดความผิดปกติภายในและภายนอกตามตารางที่ 5-2



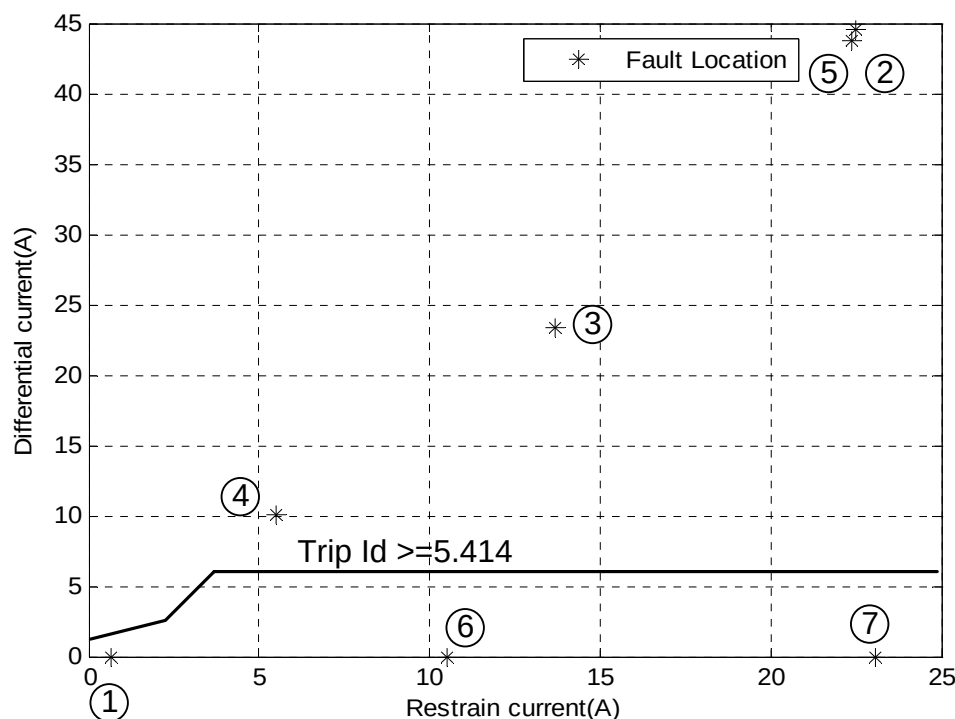
ภาพที่ 5-13 ระบบการป้องกันแบบผลต่างเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในและภายนอก

ภาพที่ 5-13 เป็นระบบการป้องกันแบบผลต่างที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อทำการจำลองผลและเก็บข้อมูลการเกิดการลัดวงจรภายนอกหม้อแปลง (External Fault) และการลัดวงจรภายในหม้อแปลง (Internal Fault) โดยพิจารณาที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของขดลวดที่เกิดการลัดวงจร แล้วทำการเปรียบเทียบค่ากระแสผลต่าง (I_{diff}) กับกระแสด้านการทำงาน ($I_{restrain}$) ของรีเลย์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบก็คือสัญญาณของรีเลย์ในการไปสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์เปิด (Trip) หรือปิดวงจร (Non-Trip) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 การเปรียบเทียบกระแสผลต่างและกระแสด้านการทำงานของรีเลย์

Short circuit	I_{diff}	$I_{restrain}$	Relay Signal
1. Normal Transformer on load 10 MW	0	0.682	Non-Trip
Internal fault at: Primary side			
2. Turn-to-ground fault	43.720	22.377	Trip
3. Turn-to-turn fault	23.367	13.705	Trip
Internal fault at: Secondary side			
4. Turn-to-ground fault	10.095	5.476	Trip
5. Turn-to-turn fault	44.512	22.473	Trip
External fault			
6. SLG	0	10.537	Non-Trip
7. Three phase fault	0	23.0703	Non-Trip

จากตารางที่ 5-2 จากผลการจำลองระบบป้องกันแบบผลต่าง จะสังเกตได้ว่าหม้อแปลงในสภาวะปกติขณะจ่ายโหลด 10 MW และขณะเกิดการลัดวงจรภายนอกจะมีกระแสผลต่างเท่ากับศูนย์เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสด้านการทำงานจะมีค่าน้อยกว่า ในสภาวะเช่นนี้รีเลย์จะไม่ส่งสัญญาณ (Non-Trip) แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงทั้งสองด้านทำให้กระแสผลต่างจะมีค่ามากกว่ากระแสด้านการทำงาน โดยมีค่ามากกว่า $I_d \geq 5.41$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขค่าสูงสุดในการตัดวงจรลักษณะเช่นนี้รีเลย์จะส่งสัญญาณ (Trip) ไปยังเซอร์กิตเบรกเกอร์



ภาพที่ 5-14 การทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างในสภาวะต่างๆ

จากภาพที่ 5-14 แสดงการทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างในสภาวะต่างๆ ตามเงื่อนไขในตารางที่ 5-2 จะเห็นได้ว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดในสภาวะปกติหรือเกิดการลัดวงจรภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสผลต่าง (Differential Current) ของรีเลย์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงจะมีกระแสผลต่างมากกว่ากระแสด้านการทำงาน และมากกว่ากระแสสูงสุดในการปรับตั้งการทำงาน

5.4 สรุปผล

จากการทดสอบระบบการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้น ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการสร้างหม้อแปลงกระแส (CT) มีการต่อแบบเคลด้าขึ้นมาเพื่อทำการแก้ไขการเลื่อนเฟสที่เกิดจากการต่อขดลวดหม้อแปลง นอกจากนั้นยังสร้างแบบจำลองของกระแสผลต่างและกระแสด้านการทำงานก่อนที่จะนำไปประมวลผลที่รีเลย์ ซึ่งผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขการเกิดการลัดวงจรภายใน และความผิดปกติภายนอกนั้นถูกต้องตามเงื่อนไข โดยจะทำงานเมื่อเกิดความผิดปกติภายในและไม่ทำงานเมื่อเกิดความผิดปกติภายนอก

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เนื้อหาในบทนี้จะสรุปผลของการทำวิจัยทั้งหมดโดยแยกส่วนสำคัญออกเป็น 3 ส่วน คือ การออกแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานะปกติ การออกแบบจำลองการเกิดการลัดวงจรภายในขดลวด และการออกแบบระบบป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย การปรับปรุงแก้ไขและข้อเสนอแนะต่างๆ ในการออกแบบเพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 การออกแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานะปกติ

ในการสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงในสถานะปกตินั้น ถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของงานวิจัย เพราะจะทำให้ทราบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นมีความถูกต้อง ในการสร้างแบบจำลองต้องใช้ผลจากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขณะเปิดวงจร (Open Circuit Test) และการทดสอบการลัดวงจร (Short Circuit) มาเตรียมข้อมูลก่อนแล้วนำค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นมาใส่ลงใน BCTRAN ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม ATP เพื่อหาค่าความต้านทาน $[R]$ และค่าความเหนี่ยวนำ $[L]$ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ในส่วนของค่าความเหนี่ยวนำนั้นจะประกอบด้วยค่าเซตฟลักซ์อินดักแตนซ์ $[L_{ij}]$ และค่ามิวจลอินดักแตนซ์ $[M_{ij}]$ ปัญหาที่พบในการออกแบบคือค่าของความเหนี่ยวนำจาก BCTRAN จะมีเข้าพุทไฟล์ (*.pch file) อยู่ในรูปแบบ $[R]-\omega[L]$ ดังตารางที่ 4-1 ซึ่งเป็นค่าความต้านทานกับค่าอินดักติฟรีแอกแตนซ์ เพราะฉะนั้นในการออกแบบจึงต้องนำค่า ω ไปหารเสมอ ก็จะได้เฉพาะค่าความเหนี่ยวนำ มาสร้างวงจรความต้านทานและความเหนี่ยวนำ (RL Couple Circuit) ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นมาใช้ในการออกแบบ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงในสถานะปกติในบทที่ 4 นั้นมีความถูกต้องเมื่อเทียบกับการคำนวณ

6.2 การออกแบบจำลองการเกิดการลัดวงจรภายในขดลวด

การสร้างแบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดนั้นแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือการลัดวงจรจากขดลวดลงดินและการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด

6.2.1 กรณีเกิดการลัดวงจรจากขดลวดลงดินนั้น แบบจำลองสามารถเลือกตำแหน่งของความผิดพลาดตลอดขดลวดจนถึงจุดนิวทรัลทั้งสองด้านของหม้อแปลงไฟฟ้าในแต่ละเฟสวัตถุประสงค์ของการจำลองเพื่อหาขนาดของกระแสลัดวงจรลงดินและกระแสผลต่างของหม้อแปลง ผลของ

กระแสลัดวงจรลงดินในช่วงแรกนั้นจะมีค่าน้อย และจะเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจรใกล้จุดนิวทรัล เพราะว่าค่ารีแอคแตนซ์ลดลง ปัญหาในการออกแบบนั้นคือค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหล (Leakage Reactance) ซึ่งจะมีค่าน้อยมากในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้เท่ากับศูนย์ ถ้านำค่าดังกล่าวมาพิจารณา จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดย่อยที่เกิดการลัดวงจรเปลี่ยนแปลงดังสมการที่ (4-11) - (4-18) กระแสก็จะเปลี่ยนแปลงตามด้วย

6.2.2 กรณีเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสามารถที่จะเลือกจำนวนรอบของขดลวดที่เกิดการลัดวงจร โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของจำนวนรอบทั้งหมดทั้งสองด้านของหม้อแปลงในแต่ละเฟส วัตถุประสงค์เพื่อหาค่าของกระแสผลต่างที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดทั้งสอง ส่วนปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นเช่นเดียวกับการลัดวงจรจากขดลวดลงดิน จากผลการทดสอบเมื่อเกิดการลัดวงจรขดลวดปฐมภูมิจะมีกระแสสูง เมื่อจำนวนรอบของการลัดวงจรน้อยและจะลดลงเมื่อจำนวนรอบการลัดวงจรมากและจะมีกระแสผลต่างน้อย ส่วนทางด้านทุติยภูมินั้นจะมีกระแสไหลผ่านไปยังโหลดโดยเป็นส่วนสำคัญกับจำนวนรอบของการลัดวงจรทำให้เกิดกระแสผลต่างมาก

6.3 การออกแบบระบบป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้า

การออกแบบระบบการป้องกันผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้น งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงกระแส CT ที่มีการต่อขดลวดแบบเดลด้ามาใช้ในการตรวจวัดกระแสของหม้อแปลงทั้งสองด้านและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแสผลต่าง (Differential Current) กับกระแสด้านการทำงาน (Restraining Current) ก่อนที่จะนำกระแสไปเปรียบเทียบกับรีเลย์ เพื่อตรวจสอบการทำงานให้ถูกต้องตามเงื่อนไขที่ปรับตั้งไว้ ผลการทดสอบรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างการทำงานได้ถูกต้องโดยจะตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติภายใน และจะไม่ทำงานเมื่อเกิดความผิดปกติภายนอก ปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบก็คือการหาขนาดของหม้อแปลงกระแส CT จะต้องเลือกขนาดให้ไม่เกินกระแสที่ฟีดของรีเลย์ นอกจากนั้นความไวในการทำงานของรีเลย์อยู่ที่การปรับความชันในแต่ละช่วงโดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการตัดวงจร

6.4 การนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้งาน

จากการทดสอบแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าในบทที่ 4 และบทที่ 5 สามารถนำแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังไปประยุกต์ใช้ในป้องกันหม้อแปลงต่างๆ เช่น การหาขนาดของความต้านทานต่อลงดิน (NGR) เพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรลงดิน การป้องกันการเกิดแรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning) โดยการติดตั้งกับดักเสริมป้องกันหม้อแปลง การทดสอบอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับแยกแยะความผิดปกติภายในกับกระแสพุ่งเข้า

6.5 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย

ในการศึกษาการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของการสร้างแบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดและส่วนของการป้องกันแบบผลต่าง ซึ่งในแต่ละส่วนนั้นยังมีสิ่งที่ต้องปรับปรุงแก้ไขดังต่อไปนี้

6.5.1 การสร้างแบบจำลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงนั้นใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC ในการจำลองสัญญาณกระแสลัดวงจร เมื่อเกิดการลัดวงจรในขดลวดแต่ละเฟสนั้นจะต้องเปลี่ยนค่าใหม่ทุกครั้งซึ่งจะทำให้เกิดความล่าช้า ดังนั้นในการแก้ไขจะต้องเขียนโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์บนโปรแกรม Fortran แล้วเชื่อมต่อกับมายังโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ของแบบจำลอง

6.5.2 การออกแบบระบบการป้องกันแบบผลต่าง ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของกระแสฟุ้งสร้างสนามแม่เหล็ก ผลกระทบจากฮาร์โมนิกส์และการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแส CT ดังนั้นเพื่อให้ได้กระแสที่ถูกต้องในการป้องกันแบบผลต่างนั้นจึงควรมีการวิเคราะห์ผลกระทบดังกล่าวด้วยจะทำให้รีเลย์ทำงานได้ถูกต้องแม่นยำ

6.6 งานวิจัยที่สามารถทำได้ในอนาคต

ในส่วนงานวิจัยที่สามารถทำได้ประกอบ 2 ส่วน มีดังต่อไปนี้

6.6.1 การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

จะสังเกตได้จากบทที่ 4 ว่าค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้น แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าความเหนี่ยวนำนั้นจะแปรผันตามเส้นโค้งสร้างสนามแม่เหล็ก (B-H Curve) ที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น จากคุณสมบัติข้อนี้สามารถที่จะวิเคราะห์การเกิดปรากฏการณ์ของเฟอร์โรเรโซแนนซ์ที่อาจจะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเพื่อป้องกันความเสียหาย

6.6.2 การออกแบบระบบป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ในการป้องกันแบบผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังต้องการพัฒนาอัลกอริทึม เพื่อลดความผิดพลาดที่จะเกิดกับกระแส เช่น ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ ผลของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก กระแสขณะเปลี่ยนเทปของขดลวดหม้อแปลง การอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแส (CT) ทั้งหมดที่ได้กล่าวมานั้นจะทำให้รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างทำงานผิดพลาด

เอกสารอ้างอิง

1. GEC ALSTHOM. Protective Relay Application Guide. GEC ALSTHOM Measurements Limited, 1987.
2. ALSTOM T&D protection and Control. Network Protection and Automation Guide. ALSTOM T&D protection and Control, 1987.
3. ชนบุญรัตน์ ศศิภาณุเดช. การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2538.
4. Gerhard Ziegler. Numerical Differential Protection. Siemens Aktiengesellschaft Berlin and Munchen, 2005.
5. Bastard, P. Bertrand, P. and Meunier, M. "A transformer model for winding fault studies." **IEEE Transactions.** 9(2), (April 1994) : 690-699.
6. Bertrand, P., Devalland, A. and Bastard, P. "A simulation model for transformer internal faults base for the study of protection and monitoring systems." **Electriccity Distribution.** 12th International Conference 17-21 May 1993 : 1.21/1-1.21/5.
7. Megahed, A.I. "A model for simulating internal earth faults in transformers." **Developments in Power System Protection, 2001, Seventh International Conference on (IEE).** (9-12 April 2001) : 359-362.
8. Mladen kezunovic, et al. "A new ATP add-on for modeling internal faults in power transformers." **APC-00.** (5 October 1999).
9. Aggarwal, R.K and Mao, P. "Digital simulation of the transient phenomena in high voltage power transformers with particular reference to accurate fault detection." **Simulation '98 International Conference.** 457 (30 Sept.-2 Oct. 1998) : 390-397.
10. Palmer-Buckle, P. Butler, K.L. Sarma, N.D.R. "Characteristics of transformer parameters during internal winding faults based on experimental measurements." **Transmission and distriction Conference, IEEE.** 2 (11-16 Apr 1999) : 882-887.
11. Ho, J.M. and Liu, C.C. "The effects of harmonics on differential relay for a transformer." **Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED 16th International Conference and Exhibition.** 482(2), (18-21 June 2001) : 5.

12. Ahmed Y. Ahmed and Salah I. Al-Mously. "Sensitivity Improvement of the digital differential Relay for Internal Ground Fault Protection in the With Tap Changer." **IEEE Proto Power Tech Conference**. (10-13 September 2001).
13. A.Guzman, H. Altuve and D. Tziouvaras. **Power Transformer Protection Improvements with Numerical Relays**. USA. : Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., np.
14. ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. การป้องกันระบบไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : เอ็มแอนคี่, 2545.
15. โตศักดิ์ ทัศนานุกริยะ. การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2540.
16. Manitoba HVDC Research Centre. **PSCAD/EMTDC User's Manual**. [online] 2007.
[cited 2007 January 5]. Available from: <http://www.pscad.com>
17. ABB Thailand "Test Report No. 56039"
18. Alternative Transient Program (ATP)-Rule Book. Canadian/American EMTP User Group, 1987-1998.
19. โตศักดิ์ ทัศนานุกริยะ. ทฤษฎีและการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2542.
20. Kezunovic, M. and Yong Guo. "Modeling and simulation of the power transformer faults and related protective relay behavior." **Power Delivery, IEEE Transactions**. 15(1), (Jan. 2000) : 44-50.
21. Palmer-Buckle, P. et al. "Simulation of incipient transformer faults." **Circuits and Systems**. (1998) : 50-53.
22. จิตรี อินทร์พยุ่ง และ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์. การวิเคราะห์ฟอลต์ที่ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP. ปรินญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
23. A. T. Johns and S. K. Salman. **Digital Protection for Power Systems**. UK. : Peter Peregrinus Ltd., 1995.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายดุสิต อุทิศสุนทร
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขณะเกิดการลัดวงจรที่ขดลวด
 สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดที่จังหวัดบุรีรัมย์ เมื่อวันที่ 26 สิงหาคม พ.ศ. 2521 เป็นบุตรแรกจากพี่น้องทั้งหมด 2 คน ปัจจุบันอยู่บ้านเลขที่ 14 หมู่ 10 ตำบลบ้านบัว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์

ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2533-2526 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนบุรีรัมย์พิทยาคม จังหวัดบุรีรัมย์ ปี พ.ศ. 2536-2539 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาช่างไฟฟ้า จากวิทยาลัยเทคนิคบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์ ปี พ.ศ. 2539-2541 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดนครราชสีมา และ ปี พ.ศ. 2541-2544 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ประวัติการทำงาน ปี พ.ศ. 2545-2546 อาจารย์พิเศษแผนกช่างไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์ และ ปี พ.ศ. 2546-2548 อาจารย์ประจำแผนกวิชาช่างไฟฟ้า โรงเรียนกองทัพบกอุปถัมภ์ ช่างกล ขส.ทบ. กรุงเทพมหานคร