ผลกระทบจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสต่อรีเลย์ป้องกัน

นายภักดี สิทธิการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPACT OF CURRENT TRANSFORMER SATURATION ON PROTECTIVE RELAYS

Mr.Pukdee Sittikan

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสต่อรีเลย์ป้องกัน
โดย	นายภักดี สิทธิการ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.อภิบาล พฤกษานุบาล)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภักดี สิทธิการ : ผลกระทบจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสต่อรีเลย์ป้องกัน (IMPACT OF CURRENT TRANSFORMER SATURATION ON PROTECTIVE RELAYS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล, 114 หน้า.

การวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสที่มีต่อรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน, รีเลย์ระยะทางและรีเลย์ผลต่าง โดยการจำลองระบบไฟฟ้าซึ่งมีหม้อแปลงกระแสและรีเลย์แบบต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อหาเวลาการทำงานของรีเลย์ เปรียบเทียบกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวกับกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว ผลการจำลองพบว่าเบอร์เดน ขนาดกระแสผิดพร่องและอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้า มีอิทธิพลต่อการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสซึ่งจะส่งผลให้รีเลย์ป้องกันทำงานช้าลง หรือทำงานผิดพลาด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2553

4970795721: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : SATURATION/ CURRENT TRANSFORMER/ OVERCURRENT RELAYS/ DISTANCE RELAYS/ DIFFERENTIAL RELAYS

PUKDEE SITTIKAN: IMPACT OF CURRENT TRANSFORMER SATURATION ON PROTECTIVE RELAYS. THESIS ADVISOR: CHANNARONG BALMONGKOL, Dr.Eng, 114 pp

This research studies the impact of current transformer saturation on overcurrent relays, distance relays and differential relays. Power systems with current transformers and protective relays are simulated using MATLAB/SIMULINK to determine and compare the operating times of relays in the cases of saturated and unsaturated current transformers. The simulation results show that burden, magnitude of fault current and X/R ratio of power system have effects on current transformer saturation, resulting in delay operation or misoperation of protective relays.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department: Electrical Engineering Student's Signature Pukdee Sittikan

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนี้ ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสารและอาจารย์ ดร.อภิบาล พฤกษานุบาล ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ที่ให้คำปรึกษาและกำลังใจตลอดมา

และสุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้วิจัย ที่ได้มอบโอกาสอันสูงสุดแห่งชีวิตแก่ผู้วิจัย คือ การศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญภาพ ..... ฏ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินการ 2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ 2
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 2
2 หม้อแปลงกระแส 4
2.1 หม้อแปลงกระแส 4
2.2 ทฤษฎีของหม้อแปลงกระแส 4
2.3 สูตรพื้นฐานของหม้อแปลงกระแส 7
2.4 เส้นโค้งสมบัติแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแส 7
2.5 วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแส 9
2.6 Burden ของหม้อแปลงกระแส 10
2.7 การแบ่งชั้นของความแม่นยำสำหรับหม้อแปลงกระแสเพื่อการป้องกัน 11
3 ทฤษฎีและหลักการของรีเลย์ป้องกัน 14
3.1 รีเลย์กระแสเกิน 14
3.1.1 หลักการและพื้นฐานของรีเลย์ป้องกัน 14
3.1.2 การทำ Discrimination 16

บทที่ หน้า

3.1.3 ชนิดของรีเลย์กระแสเกิน 17
3.1.3.1 Electromechanical Overcurrent Relay 17
3.1.3.2 Static Overcurrent Relay 19
3.1.3.3 Digital Overcurrent Relay 20
3.1.4 สมการเวลาทำงานของรีเลย์กระแสเกิน 20
3.1.5 Grading Margin 21
3.1.6 การทำ Coordination ระหว่างรีเลย์กระแสเกินทางด้านปฐมภูมิกับด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ต่อแบบ $\Delta - Y$ 22
3.2 รีเลย์ระยะทาง 24
3.2.1 หลักการทำงานของรีเลย์ระยะทาง 24
3.2.2 รีเลย์ระยะทางแบบ 3 เฟส 27
3.2.3 ลักษณะสมบัติของรีเลย์ระยะทางแบบต่างๆ 32
3.2.3.1 อิมพิแดนซ์รีเลย์ 32
3.2.3.2 รีแอกแตนซ์รีเลย์ 33
3.2.4 การแบ่งโซนป้องกันของรีเลย์ระยะทาง 34
3.3 รีเลย์ผลต่าง 36
3.3.1 ประเภทของรีเลย์ผลต่าง 36
3.3.1.1 Overcurrent Differential Relay 36
3.3.1.2 Percentage Differential Relay 36
3.3.2 การป้องกันแบบผลต่างสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า 37
4 การสร้างและการนำแบบจำลองไปใช้งาน 40
4.1 แบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน 40
4.1.1 การนำแบบจำลองรีเลย์กระแสเกินไปใช้งาน 44
4.2 แบบจำลองรีเลย์ระยะทาง 46
4.2.1 การนำแบบจำลองรีเลย์ระยะทางไปใช้งาน 51
4.3 แบบจำลองรีเลย์ผลต่าง 54
4.3.1 การนำแบบจำลองรีเลย์ผลต่างไปใช้งาน 60

บทที่ หน้า

5 ผลการทดลอง 67

5.1 ผลการจำลองของแบบจำลองกระแสเกิน 67

5.1.1 ผลกระทบของ Burden 70

5.1.2 ผลกระทบของอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้า 74

5.1.3 ผลกระทบของขนาดกระแสผิดพร่อง 77

5.2 ผลการจำลองของแบบจำลองระยะทาง 80

5.2.1 ผลกระทบของ Burden 86

5.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้า 89

5.2.3 ผลกระทบของขนาดกระแสผิดพร่อง 92

5.3 ผลการจำลองของแบบจำลองผลต่าง 96

5.3.1 ผลการจำลองการทำงานของรีเลย์ผลต่างเมื่อหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ 104

5.3.2 กรณีรีเลย์ผลต่างทำงานผิดพลาดไปจากปกติ 106

5.3.2.1 กรณีผลของ Burden 106

5.3.2.2 กรณีผลของกระแสผิดพร่อง 108

6 สรุปและข้อเสนอแนะ 111

6.1 สรุปผลการวิจัย 111

6.2 ข้อเสนอแนะ 112

รายการอ้างอิง 113

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 114

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงถึงขีดจำกัดของความผิดพลาดสำหรับ CT 12

3.1 ค่าคงที่ และ เลขยกกำลัง สำหรับเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของรีเลย์กระแสเกิน 21

4.1 ค่า Curve สำหรับแบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน 42

5.1 กรณีศึกษาที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน 70

5.2 ผลกระทบของ Burden ต่อเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน 73

5.3 ผลกระทบของ X/R ต่อเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน 77

5.4 ผลกระทบของกระแสผิดพร่องต่อเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน 80

5.5 ข้อมูลพารามิเตอร์สายส่งรีเลย์ระยะทาง 81

5.6 ข้อมูลการตั้ งค่าแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง 82

5.7 กรณีศึกษาที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของรีเลย์ระยะทาง 86

5.8 ผลกระทบของ Burden ต่อเวลาการทำงานของรีเลย์รีเลย์ระยะทาง 89

5.9 ผลกระทบของ X/R ต่อเวลาการทำงานของรีเลย์รีเลย์ระยะทาง 92

5.10 ผลกระทบของกระแสผิดพร่องต่อเวลาการทำงานของรีเลย์ระยะทาง 95

5.11 กรณีศึกษาที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง 103

5.12 เวลาการทำงานของรีเลย์รีเลย์ผลต่าง เมื่อเกิดการอิ่มตัวเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ 106

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะของหม้อแปลงกระแสที่ใช้ในทางปฏิบัติ	5
2.2	ความคลาดเคลื่อนของ CT สัมพันธ์กับกระแสปฐมภูมิ	6
2.3	B-H Curve ของหม้อแปลงกระแส	9
2.4	วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแส	10
3.1	ลักษณะสมบัติของ Definite Current Overcurrent Relay	15
3.2	ลักษณะสมบัติของ Definite Time Overcurrent Relay	15
3.3	ลักษณะสมบัติของ Inverse Time Overcurrent Relay	16
3.4	ลักษณะสมบัติของ Inverse Definite Minimum Time (IDMT) Overcurrent Relay	16
3.5	Static Overcurrent Relay Characteristic	20
3.6	การเกิดความผิดพร่องลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงที่ต่อแบบ $\Delta - Y$	23
3.7	หลักการแบบคานสมดุลในรีเลย์ระยะทาง	24
3.8	ลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางในแกนของแรงดันและกระแส	25
3.9	ลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางใน R-X Diagram	26
3.10	เวลาการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบอิมพีแดนซ์ที่กระแสค่าหนึ่ง ๆ	26
3.11	เวลาการทำงานอย่างง่ายของรีเลย์ระยะทางแบบอิมพีแดนซ์	27
3.12	วงจร Symmetrical Component สำหรับการลัดวงจร B-C	28
3.13	วงจร Symmetrical Component สำหรับการลัดวงจร B-C-G	29
3.14	วงจร Symmetrical Component สำหรับการลัดวงจร 3 เฟส	29
3.15	แสดงการต่อรีเลย์, CT และ VT สำหรับ Phase Fault	30
3.16	วงจร Symmetrical Component สำหรับการลัดวงจร A-G	31
3.17	การต่อรีเลย์ CT และ VT สำหรับ Ground Fault	32
3.18	แสดงลักษณะสมบัติแบบ Impedance โดยการเปรียบเทียบขนาด	33
3.19	ลักษณะสมบัติแบบรีแอกแตนซ์บน R-X Diagram	34
3.20	ระบบสายส่งแบบ Multi-terminal Line	38
3.21	Percentage Differential Relay	37
3.22	ลักษณะสมบัติของ Percentage Differential Relay	37

รูปที่		หน้า
3.23	การต่อหม้อแปลงเพื่อชดเชยการเลื่อนเฟส	39
4.1	แผนภาพบล็อกของแบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน	40
4.2	แผนภาพการทำงานของบล็อก Relay Characteristic	41
4.3	แผนภาพการหาค่าเวลาการทำงานของรีเลย์	43
4.4	แบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน	44
4.5	การวัดกระแสจาก CT Saturation เพื่อเป็นสัญญาณเข้าให้แบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน	44
4.6	ข้อมูลการตั้งค่าแบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน	45
4.7	แผนภาพบล็อกของแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง	46
4.8	แผนภาพบล็อก Relay Characteristic ของรีเลย์ระยะทาง	47
4.9	แผนภาพบล็อกประมวลผลหาสัญญาณ Trip สำหรับรีแอกแตนซ์รีเลย์	48
4.10	แผนภาพบล็อกประมวลผลหาสัญญาณ Trip สำหรับอิมพีแดนซ์รีเลย์	50
4.11	แบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน	51
4.12	การวัดกระแสและแรงดันเพื่อเป็นสัญญาณเข้าให้กับแบบจำลิงรีเลย์ระยะทาง	52
4.13	ข้อมูลการตั้งค่าแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง	54
4.14	แผนภาพบล็อกของแบบจำลองรีเลย์ผลต่าง	54
4.15	แผนภาพการทำงานของแบบจำลองรีเลย์ผลต่าง	56
4.16	ลักษณะสมบัติของ Percentage Differential Relay	57
4.17	แผนภาพการทำงานบล็อก Select CT 1	57
4.18	แผนภาพการทำงานบล็อก Select CT 2	58
4.19	แผนภาพบล็อก Relay Characteristic ของรีเลย์ผลต่าง	60
4.20	แบบจำลองรีเลย์ผลต่าง	61
4.21	การกำหนด CT ต่อแบบ Y ด้านหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน	61
4.22	การกำหนด CT ต่อแบบ D1 ด้านหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน	62
4.23	การกำหนด CT ต่อแบบ D11 ด้านหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน	62
4.24	การกำหนด CT ต่อแบบ Y ด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน	63
4.25	การกำหนด CT ต่อแบบ D1 ด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน	63

รูปที่ หน้า

4.26 การกำหนด CT ต่อแบบ D11 ด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน 63
4.27 ตัวอย่างการเชื่อมต่อแบบจำลองรีเลย์ผลต่างเข้าระบบ 64
4.28 ข้อมูลการตั้งค่าของแบบจำลองรีเลย์ผลต่าง 66
5.1 ระบบไฟฟ้าสำหรับการทดลองรีเลย์กระเทิน 67
5.2 ข้อมูลการตั้งค่าแบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน 67
5.3 ระบบไฟฟ้าจำลองสำหรับการทดสอบรีเลย์กระแสเกินในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK 68
5.4 กระแสทดสอบการทำงานของรีเลย์กระแสเกินในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว 68
5.5 เปอร์เซ็นต์จานหมุนรีเลย์กระแสเกินในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว 69
5.6 สัญญาณทริปของรีเลย์กระแสเกินในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว 69
5.7 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อเบอร์เดนเท่ากับ5 Ω ในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน 71
5.8 เปอร์เซ็นต์จานหมุนรีเลย์กระแสเกินในกรณีBurden = 5 Ω 71
5.9 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน 72
5.10 การทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนเมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน 73
5.11 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อ X/R= 50 ในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน 74
5.12 เปอร์เซ็นต์จานหมุนรีเลย์กระแสเกินในกรณีX/R = 50 75
5.13 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อX/R ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน 75
5.14 การทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนเมื่อX/R ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน 76

รูปที่ หน้า

5.15 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อ R_f = 0.1 Ω ในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน 77

5.16 เปอร์เซ็นต์จานหมุนรีเลย์กระแสเกินในกรณี R_f = 0.1 Ω 78

5.17 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อกระแสผิดพร่องมีการเปลี่ยนแปลง ในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน 78

5.18 การทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนเมื่อกระแสผิดพร่องมีการเปลี่ยนแปลง ในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน 79

5.19 ระบบไฟฟ้าสำหรับการทดลองรีเลย์ระยะทาง 80

5.20 ข้อมูลการตั้งค่แบบจำลองรีเลย์ระยะทาง 83

5.21 ระบบไฟฟ้าสำหรับการทดลองรีเลย์ระยะทาง เมื่อเกิดความผิดพร่องที่ 50% ของความยาวสาย 83

5.22 ระบบไฟฟ้าสำหรับการทดสอบรีเลย์ระยะทาง ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK 84

5.23 กระแสทดสอบการทำงานของรีเลย์ระยะทางในกรณีหม้อแปลงกระแส ไม่เกิดการอิ่มตัว 84

5.24 ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นในกรณีหม้อแปลงกระแส ไม่เกิดการอิ่มตัว 85

5.25 สัญญาณทริปของรีเลย์ระยะทางในกรณีหม้อแปลงกระแส ไม่เกิดการอิ่มตัว 85

5.26 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อเบอร์เดนเท่ากับ5 Ω ในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง 86

5.27 ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อ Burden = 5 Ω 87

5.28 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อเบอร์แดนของหม้อแปลงกระแส มีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง 88

5.29 ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อเบอร์แดนของหม้อแปลงกระแส มีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง 88

5.30 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกะแสเมื่อ X/R = 50 Ω ในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง 90

5.31 ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อ X/R = 50 Ω 90

รูปที่		หน้า
5.32	กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อ X/R ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง	91
5.33	ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อ X/R ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง	92
5.34	กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อ $R_f = 0.1\ \Omega$ ในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง	93
5.35	ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อ $R_f = 0.1\Omega$	93
5.36	กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อกระแสผิดพร่องมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง	94
5.37	ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อกระแสผิดพร่องมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง	95
5.38	รีเลย์ผลต่างเปอร์เซ็นต์	96
5.39	ลักษณะสมบัติของรีเลย์ผลต่างเปอร์เซ็นต์	97
5.40	การต่อหม้อแปลงกระแสเพื่อชดเชยการเลื่อนเฟสและการต่อหม้อแปลงออโต้เพื่อปรับค่ากระแส	97
5.41	ระบบไฟฟ้าสำหับการทดลองรีเลย์ผลต่าง	198
5.42	ข้อมูลการตั้ งค่าแบบจำลองรีเลย์ผลต่าง	99
5.43	กำหนด CT ต่อแบบ Y ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงแบบและ CTต่อแบบ D1ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแบบ	100
5.44	ระบบไฟฟ้าสำหรับการทดสอบรีเลย์ผลต่างเมื่อเกิดความผิดพร่อง	100
5.45	ระบบไฟฟ้าจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สำหรับการทดสอบรีเลย์ผลต่าง	101
5.46	กระแสทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง (I_2-I_1) ในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว	102
5.47	กระแสทำงานเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตกระแสผลต่างสูงสุดในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว	102
5.48	สัญญาณทริปของรีเลย์ผลต่างในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว	103
5.49	การอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ของรีเลย์ผลต่าง	104

รูปที่ หน้า

5.50 กระแสทำงานเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตกระแสผลต่างสูงสุด เมื่อหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ 105

5.51 กระแสทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง (I_2-I_1) ในสภาวะรีเลย์ผลต่างทำงานผิดพลาดเนื่องจากผลของ Burden 107

5.52 กระแสทำงานเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตกระแสผลต่างสูงสุด ในสภาวะรีเลย์ผลต่างทำงานผิดพลาดเนื่องจากผลของ Burden 108

5.53 กระแสทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง (I_2-I_1) ในสภาวะรีเลย์ผลต่างทำงานผิดพลาดเนื่องจากผลของกระแสผิดพร่อง 109

5.54 กระแสทำงานเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตกระแสผลต่างสูงสุด ในสภาวะรีเลย์ผลต่างทำงานผิดพลาดเนื่องจากผลของกระแสผิดพร่อง 110

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

ในบทนี้ จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขต และขั้นตอนของการศึกษาวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ รวมทั้งลำดับเนื้อหาในบทถัดไป เพื่อให้เห็นภาพรวมของการศึกษาภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญเป็นอย่างมากในการดำรงชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบันและมีความสำคัญในการพัฒนาประเทศในหลาย ๆ ด้าน เมื่อความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีการขยายตัวมากขึ้น ระบบไฟฟ้าต้องมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่เมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบไฟฟ้า เช่น มีฉนวนเสียหาย หรือมีสัตว์ไปพาดระหว่างสายไฟฟ้า จะก่อให้เกิดกระแสผิดพร่องที่มีค่าสูง เป็นอันตรายต่อชีวิตและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า การเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบไฟฟ้าเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เพื่อที่จะให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และลดความเสียหายต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องมีระบบป้องกันที่ดี

รีเลย์จัดเป็นอุปกรณ์ป้องกันที่สำคัญ ทำหน้าที่ตรวจสอบสภาวะของระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า ถ้าพบว่ามีสภาวะที่ผิดปกติจะสั่งการให้เซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจรเพื่อตัดส่วนที่ผิดปกติออกไปจากระบบไฟฟ้า รีเลย์ที่ใช้สำหรับการวิจัยนี้ คือรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน รีเลย์ระยะทาง และรีเลย์ผลต่าง [1] ซึ่งคอยตรวจสอบขนาดของกระแสไฟฟ้าโดยรับสัญญาณมาจากหม้อแปลงกระแส (CT) ดังนั้นหากสัญญาณที่ได้รับมาจากหม้อแปลงกระแสมีความผิดพลาดย่อมส่งผลให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดไปด้วย สาเหตุหนึ่งที่จะทำให้สัญญาณที่ส่งมาจากหม้อแปลงกระแสเกิดความผิดพลาด คือ การอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส ซึ่งเกิดขึ้นได้จากหลาย ๆ ปัจจัย[2]

การวิจัยนี้ นำเสนอผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน รีเลย์ระยะทาง และรีเลย์ผลต่าง เมื่อเกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส จากผลของ Burden ผลของอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้า และผลของขนาดกระแสลัดวงจร โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK จำลองสัญญาณทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสขณะเกิดการอิ่มตัวส่งให้รีเลย์แต่ละชนิดที่สร้างโดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เหมือนกัน แล้วตรวจสอบเวลาการทำงานของรีเลย์เปรียบเทียบกับกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว การนำโปรแกรม MATLAB/SIMULINK มาใช้เนื่องจากโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เป็นโปรแกรมที่มีมาตรฐานเป็นที่แพร่หลายในมหาวิทยาลัย, วงการอุตสาหกรรม รวมถึงงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง อีกทั้งโปรแกรมสามารถจำลองโมเดลและ Library ใหม่ได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก มี Power System Blockset ซึ่งประกอบด้วยโมเดลพื้นฐานเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าจำนวนมาก[3,4]

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยมีดังต่อไปนี้

1) เพื่อศึกษาการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส และปัจจัยที่ทำให้เกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส
2) เพื่อสร้างแบบจำลองโมเดของหม้อแปลงกระแสและรีเลย์ป้องกันใน MATLAB/SIMULINK เพื่อใช้ในการวิเคราะห์
3) เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อรีเลย์ป้องกันเมื่อเกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

สร้างแบบจำลองหม้อแปลงกระแสและรีเลย์ป้องกันเพื่อใช้ในการทดสอบผลกระทบจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสต่อรีเลย์ป้องกัน

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินการ

การศึกษาวิจัยจะดำเนินไปตามขั้นตอนหลักต่อไปนี้

1) ศึกษาแบบจำลองหม้อแปลงกระแสและแบบจำลองรีเลย์ป้องกัน
2) สร้างแบบจำลองหม้อแปลงกระแสและแบบจำลองรีเลย์ป้องกันโปรแกรม MATLAB/SIMULINK
3) ทำการทดสอบโปรแกรมถึงผลกระทบที่เกิดกับรีเลย์ป้องกัน
4) สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1) มีความรู้เรื่องปัจจัยที่ก่อให้เกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส
2) สามารถทราบผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับรีเลย์ป้องกันเมื่อเกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่จะนำเสนอในแต่ละบทเรียงลำดับดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับหม้อแปลงกระแส

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับรีเลย์ป้องกัน

บทที่ 4 การสร้างและการนำแบบจำลองรีเลย์ไปใช้งาน

บทที่ 5 ผลการทดลอง

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หม้อแปลงกระแส

2.1 **หม้อแปลงกระแส** (Current transformer; CT.) [1]

หม้อแปลงกระแสเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงกระแสค่าสูงที่แรงดันสูงเป็นกระแสค่าต่ำที่แรงดันต่ำ เพื่อจะทำให้ประสิทธิภาพในการวัดและการป้องกันของระบบเป็นไปได้ด้วยดี

หม้อแปลงกระแสมีหน้าที่ดังนี้

1. แปลงขนาดกระแสของระบบไฟฟ้าค่าสูงให้เป็นค่าต่ำเพื่อประโยชน์ในการวัดและการป้องกัน

2. แยกวงจร Secondary ออกจาก Primary เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน

3. ทำให้สามารถใช้กระแสมาตรฐานทางด้าน Secondary (1A, 5A) ได้

หม้อแปลงกระแสสามารถแบ่งตามการใช้งานเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. หม้อแปลงกระแสสำหรับการวัด (Measurement CT)

2. หม้อแปลงกระแสสำหรับการป้องกัน (Protection CT)

2.2 **ทฤษฎีของหม้อแปลงกระแส** (Current Transformer Theory)

หม้อแปลงกระแสหรือที่เรียกอย่างย่อ ๆ ว่า “CT” มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ขดลวด 2 ขด ซึ่งพันอยู่บนแกนเหล็ก ขดลวดชุดหนึ่งจะใช้ต่อกับส่วนของวงจรหลักที่ต้องการวัดค่าปริมาณกระแสที่เกิดขึ้นจริง เรียกว่า“ขดลวด Primary” (Primary Winding) ขดลวดอีกชุดหนึ่งใช้ต่อกับโหลดภาระ (Burden) เรียกว่า “ขดลวด Secondary” (Secondary Winding) ผลจากกระแสไฟสลับ (AC Current) ซึ่งไหลผ่านขดลวดทางด้าน Primary จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขึ้นในแกนเหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นนี้จะไปคล้องกับขดลวด Secondary และเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า E.M.F (Electro-Motive Force) ขึ้นที่ปลายของขดลวด Secondary ผลที่ได้นี้จะทำให้เกิดมีกระแสไหลในขดลวด Secondary เมื่อนำขดลวด Secondary ไปต่อกับวงจรหรืออุปกรณ์วัดภายนอกอื่น ๆ

สำหรับ CT ในทางอุดมคติจะได้ว่า ค่าผลคูณของปริมาณกระแสกับจำนวนรอบของขดลวด (Ampere-turns) ทางด้าน Primary จะมีค่าเท่ากับทางด้าน Secondary เสมอ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$N_p \times I_p = N_s \times I_s \tag{2.1}$$

โดยที่

N_p = Number of Primary Turns

N_s = Number of Secondary Turns

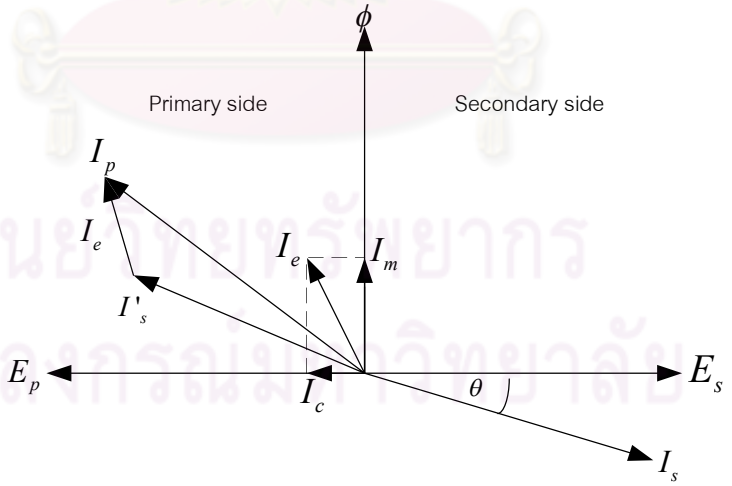
I_p, I_s = กระแสในขดลวดทางด้าน Primary และ Secondary ตามลำดับ

นั้นคือ ค่ากระแสทางด้าน Secondary จะเป็นสัดส่วนกับค่ากระแสด้านPrimary เสมอ

ในทางปฏิบัติหม้อแปลงกระแสที่ใช้งานจริงจะต่างจากหม้อแปลงกระแสในอุดมคติเล็กน้อย เนื่องจากผลของคุณลักษณะสมบัติของแกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงจริง ซึ่งแสดงดังเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.1 เวกเตอร์ E_p และ E_s คือแรงดันในขดลวด Primary และขดลวด Secondary ตามลำดับ กระแสของขดลวดทางด้าน Primary จะประกอบด้วยกระแสแยกไหล 2 ส่วนคือ

1. I_c เป็นกระแสไหลในแกนเหล็ก หรือเป็นกระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้ นในแกนเหล็ก (Iron Loss) มีเฟสเดียวกับแรงดัน โดยกระแส I_c ประกอบด้วยกระแสฮีสเตอร์รีซีส (Hysteresis) และกระแสไหลวน (Eddy Current)

2. I_m เป็นกระแสที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้ นในแกนเหล็ก มีมุมต่างเฟสตั้ งฉากกับแรงดัน หรือมีเฟสเดียวกับฟลักซ์แม่เหล็ก(F)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของหม้อแปลงกระแสที่ใช้ในทางปฏิบัติ

โดยที่

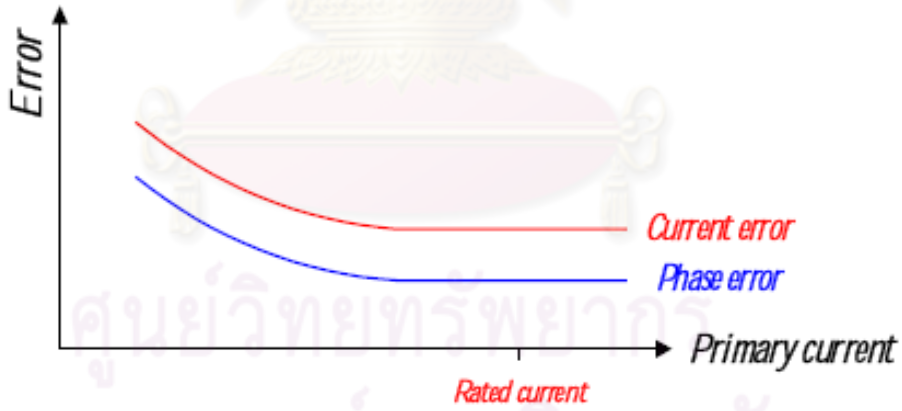
I_e = ผลรวมทางเวกเตอร์ระหว่าง I_m และ I_c $(I_e = I_m + I_c)$

I_s = กระแสที่ไหลทางด้าน Secondary (Secondary Current) มีมุมตามหลัง E_s เป็นมุม θ

I_s' = กระแสเสมือนที่ไหลในขดลวด Primary (แปลงมาจากทางด้าน Secondary)

I_p = กระแสรวมทั้งหมดที่ไหลในขดลวดทางด้าน Primary ($I_p = I_s' + I_e$)

ถ้าค่ากระแสที่ขดลวด Primary มีค่าลดลง ปริมาณกระแสที่ขดลวด Secondary ก็จะลดลงตามไปด้วยแต่ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวด Secondary มีค่าคงที่ ค่าแรงดันของขดลวด Secondary และปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็กจะลดลงไปด้วย นั้นคือ กระแสกระตุ้น I_e (Exciting Current) จะมีปริมาณลดลง แต่เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของกราฟแสดงคุณลักษณะสมบัติแม่เหล็ก (Magnetization Curve) ของแกนเหล็ก กระแสกระตุ้น I_e จะลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยเช่นกัน ทำให้เป็นผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนทางปริมาณและเฟสของกระแส (Current Error and Phase Error) ขึ้น ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้จะไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระดับปริมาณกระแสดังรูปที่ 2.2 ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) จะยิ่งมีค่ามากขึ้น เมื่อระดับกระแส Primary มีค่าต่ำ ๆ ทั้งนี้ เนื่องจากกระแสกระตุ้น I_e จะมีผลต่อการเกิดความคลาดเคลื่อนนี้



รูปที่ 2.2 แสดงความคลาดเคลื่อน (Error) ของ CT สัมพันธ์กับกระแส Primary

การแก้ไขความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสกระตุ้น I_e ในหม้อแปลงกระแสโดยทั่วไปไปทำได้ 3 วิธี คือ

1. โดยการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุแม่เหล็กที่นำมาทำเป็นแกนเหล็ก เช่นอาจใช้แกนเหล็กที่ทำจากโลหะผสมซิลิกอน (Cold Rolled Drain-Oriented Silicon Steel: C.R.O.S.S) ซึ่งมี

คุณสมบัติทางแม่เหล็กดี มีค่า Knee Point ที่ประมาณ 1.6 T หรืออาจใช้โลหะนิเกิล (Nickel Steel) ซึ่งค่า Knee Point ที่ประมาณ 0.7 T เป็นต้น

2. โดยการลดเส้นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็ก

3. โดยการลดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็ก

โดยทั่วไปแล้วข้อจำกัดบางประการในทางปฏิบัติ ส่วนมากจะเลือกใช้วิธีปรับปรุงคุณภาพวัสดุแม่เหล็กซึ่งจะทำได้ง่ายกว่า

2.3 **สูตรพื้นฐานของหม้อแปลงกระแส** (Current Transformer Basic Formula)

ในกรณีที่เกิดสภาวะชั่วครู่ (Transient) หรือเกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสขึ้นอย่างรุ่นแรงจะส่งผลให้แกนเหล็กของหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวและเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้คุณสมบัติการทำงานของหม้อแปลงกระแสในขณะเกิด Fault ผิดพลาด ซึ่งส่งผลให้รีเลย์ป้องกันทำงานผิดพลาดไปด้วย ผู้ใช้งานจึงจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติของหม้อแปลงกระแสที่สภาวะต่าง ๆ เป็นอย่างดี และพิจารณาเลือกใช้หม้อแปลงกระแสให้ถูกต้องเหมาะสมกับรีเลย์และระบบป้องกันนั้น ๆ ค่าแรงดันสูงสุดของขดลวดSecondary ที่จะทำให้แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวสามารถหาได้จากสมการที่ 2.2 ซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด $B_{\max}$ มีค่าไม่เกิน 1.6 T นั้นคือ

$$E_k = 4.44 \times B \times A \times f \times N \qquad (2.2)$$

แทนค่า $B = 1.6T$ จะได้

$$E_k = 4.44 \times 1.6 \times A \times f \times N \qquad (2.3)$$

โดยที่

E = Secondary Induced Voltage (V) (ค่า rms ของ Knee Point Voltage)

N = จำนวนรอบของขดลวดทางด้าน Secondary

F = ความถี่ของระบบ (Hz)

A = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก(csa) (m^2)

ในขณะที่กระแสไหลผ่านโหลดภาระหรือ Burden ของ CT มีค่าสูงสุดทำให้แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวและในขณะเดียวกันก็จะกระตุ้นให้เกิดแรงดันไฟฟ้าด้วย

2.4 **เส้นโค้งสมบัติแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแส** (Current Transformer Magnetizing Curve)

เส้นโค้งสมบัติแม่เหล็กของCT. นั้นมีรูปร่างคล้ายกับเส้นโค้งสมบัติแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าหรือเครื่องจักรที่ใช้แกนเหล็กเป็นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไป โดยเส้นโค้งสมบัติ

แม่เหล็กของหม้อแปลงกระแสจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H (B-H Curve) แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ ซึ่งกำหนดโดย Ankle-Point และ Knee Point ช่วงที่ใช้งานหม้อแปลงกระแสทั่วไปคือ ช่วงระหว่าง Ankle-Point และ Knee Point เป็นบริเวณที่ค่อนข้างจะเป็นเชิงเส้น (Linear Region) ปกติเส้นโค้งสมบัติแม่เหล็กของ CT. จะแสดงในเทอมของ K_v และ K_i โดยพิจารณาจากสมการที่ (2.3) จะได้ว่า

$$E_s = 4.44 \times 50 \times B \times A \times N$$

เมื่อ B มีหน่วยเป็น T (Tesla) และ A (csa) มีหน่วยเป็น m^2

หรือ $$E_s = 222 \times B \times A \times N \times 10^{-4}$$

กำหนดให้ $$K_v = \frac{E_s}{B} \tag{2.4}$$

$$K_v = \frac{AN}{45} \tag{2.5}$$

Exciting Current (I_e) สามารถหาได้จาก MMF (Magneto Motive Force) โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_e = \frac{L}{N} \times MMF \tag{2.6}$$

$$K_i = \frac{L}{N} \tag{2.7}$$

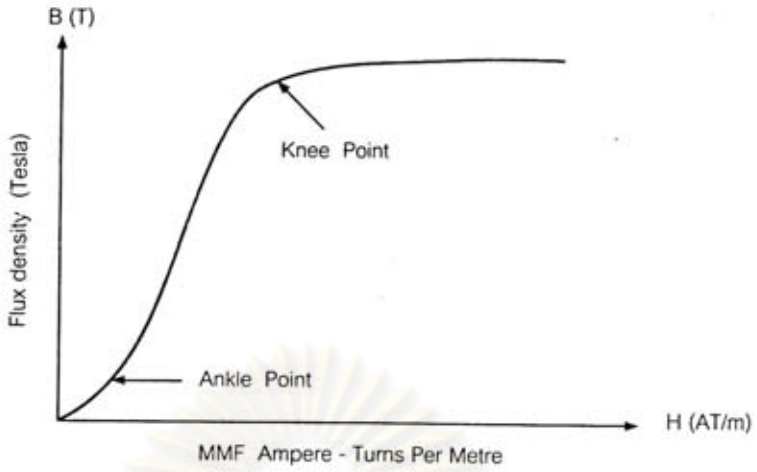
$$I_e = K_i \times MMF \tag{2.8}$$

โดยหน่วยของ K_i จะขึ้นอยู่กับหน่วยของ MMF นั้นคือ

ถ้า MMF มีหน่วยเป็น Ampere-Turns per Meter: $K_i = \frac{L}{N}$ เมื่อ L มีหน่วยเป็นเมตร

หมายเหตุ: L = Mean Magnetic Path

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 B-H Curve ของ CT

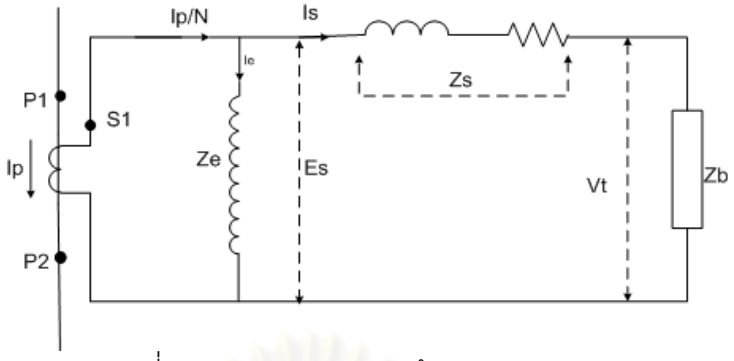
2.4.1 Knee point

Knee point เป็นจุดซึ่งถ้าค่าของ B ที่จุดนั้นเพิ่มขึ้น10% ค่าของ H จะเพิ่มขึ้น50% พอดี CT. สำหรับการป้องกันโดยทั่วไปจะออกแบบให้เมื่อเกิดกระแส Fault สูงสุด ฟลักซ์ที่สร้างขึ้นจะไม่เลย Knee point ของลักษณะสมบัติทางแม่เหล็ก

ก่อนถึงบริเวณอิ่มตัว ค่าความหนาแน่นฟลักซ์ภายในแกนเหล็กจะแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ Ampere-Turn (โดยประมาณ) ในบริเวณที่อิ่มตัวค่าความหนาเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetizing Inductance) จะมีค่าต่ำมากและกระแสที่ถ่ายทอดจากทางด้าน Primary จะสูญเสียไปในวงจรกระตุ้นมาก ทำให้แรงดันขาออกของCT. จะมีค่าลดต่ำลงมาก เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงนี้ ทำให้ทั้งกระแสกระตุ้นและกระแสที่ไหลในขดลวดSecondary มีรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์(Sine Wave)

2.5 **วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแส** (Equivalent Circuit of Current Transformer)

วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแสหรือ CT. แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยสมมติว่า CT. ทำงานได้อย่างสมบูรณ์ สามารถแปลงกระแสทางด้าน Primary ได้อย่างถูกต้อง และไม่เกิดความผิดเพี้ยนของมุมเฟส (Phase Angle Error) ขึ้นมา



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแส

โดยที่

I_p = กระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแส

N = อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงกระแส

Z_b = เบอร์แดนของรีเลย์

Z_s = อิมพีแดนซ์ของขดลวดทุติยภูมิ

Z_e = อิมพีแดนซ์กระตุ้นสนามแม่เหล็กด้านทุติยภูมิ

I_e = กระแสกระตุ้นด้านทุติยภูมิ

I_s = กระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส

E_s = แรงดันกระตุ้นสนามแม่เหล็กด้านทุติยภูมิ

V_t = แรงดันที่ขั้วต่อหม้อแปลงกระแสด้านทุติยภูมิ

2.6 Burden **ของหม้อแปลงกระแส** (Current Transformer Burden)

วงจรที่ต่ออยู่ทางด้าน Secondary ของ CT. เรียกว่า “Burden” ซึ่งมีความหมายเหมือนกับโหลด สาเหตุที่ชื่อแตกต่างกันไปก็เพื่อให้สามารถแยกแยะระหว่างโหลดที่อยู่ทางด้าน Primary และ Burden ที่อยู่ทางด้าน Secondary ไม่ให้ปะปนกัน ค่าของ Burden ปัจจุบันนิยมกำหนดในเทอมของอิมพีแดนซ์รวมค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของวงจรทั้งหมด ในสมัยก่อนค่าของ Burden กำหนดในเทอมของ Volt-Amp (VA) และตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ซึ่งหมายถึงค่า Volt-Amp (VA) ที่ถูกใช้ใน Burden เมื่อมีกระแสไหลเท่ากับพิกัดกระแส Secondary (มีค่าเท่ากับพิกัดกระแส Secondary กำลังสองคูณกับอิมพีแดนซ์ของ Burden)

รีเลย์และมาตรวัดต่าง ๆ ที่ต้องใช้งานร่วมกับ CT. จะมีข้อมูลเกี่ยวกับ Burden ซึ่งหาได้จากเอกสารของบริษัทผู้ผลิตค่าของBurden นี้ รวมกับค่าความต้านทานของสาย คือ ค่าBurden

รวมของ CT. และค่า Burden รวมของ CT. มักจะมีค่าลดลงเมื่อกระแสที่ไหลในวงจร Secondary มีค่าสูงขึ้ น ทั้ งนี้ เพราะว่าวงจรแม่เหล็กของรีเลย์หรืออุปกรณ์อื่นมักมีการอิ่มตัว บางครั้ งเอกสารของบริษัทผู้ผลิตอาจจะให้ค่าBurden ที่ค่ากระแสต่าง ๆ มาหลายค่า ในกรณีเช่นนี้ จะเห็นได้ชัดว่าการกำหนด Burden ในเทอมของอิมพีแดนซ์ดีกว่าการกำหนดในเทอมของ Volt-Amp

Burden ของ CT. มักจะเป็นแบบทำให้เกิดกระแสล้าหลังแรงดัน (Power Factor Lagging) เป็นมุมค่อนข้างสูง ดังนั้นโดยทั่วไปค่าอัตราส่วนผิดพลาดจะมีค่าสูงและมุมเฟสผิดพลาดจะมีค่าต่ำ จึงมักจะคำนวณค่าอัตราส่วนผิดพลาดเพียงอย่างเดียว แล้วตรวจดูว่าค่านี้ สูงเกินไปหรือไม่ เพื่อความสะดวกและรวดเร็วเราอาจจะนำเอาค่า Burden ที่เป็นอิมพีแดนซ์มาบวกกันทางพีชคณิตเลย แล้วใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้นี้ ไปคำนวณอัตราส่วนผิดพลาด ผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าเป็นจริง ซึ่งเท่ากับว่าCT. ที่เราเลือกจะมีความแม่นยำกว่าที่ต้องการ ซึ่งเป็นการเผื่อเอาไว้ในกรณีที่มี CT. มากกว่าหนึ่งตัวต่อกันโดยที่กระแสของ CT. แต่ละตัวอาจรวมกันหรือหักล้างกัน ในส่วนของวงจรที่ร่วมกันจะต้องคำนวณแรงดันในแต่ละส่วนของวงจรแล้วนำมารวมกันทางเวกเตอร์

ถ้าทราบค่าอิมพีแดนซ์ของรีเลย์กระแสเกินที่ค่า Plug Setting หรือ Tap หนึ่งแล้ว เราสามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์เมื่อมีการเปลี่ยนไปใช้ Tap อื่น ๆ ได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ที่ว่าขดลวดของรีแอกแตนซ์มีค่ารีแอกแตนซ์แปรผันมีสัดส่วนกับจำนวนรอบกำลังสอง และค่าความต้านทานแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบ แต่โดยปกติแล้วค่าความต้านทานจะมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ จึงอาจคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของรีเลย์โดยถือว่ามีค่าเป็นสัดส่วนกับจำนวนรอบยกกำลังสอง แต่จำนวนรอบของขดลวดแปรผันเป็นสัดส่วนกับขนาดของกระแส Pick up ดังนั้ น อิมพีแดนซ์ของรีเลย์แปรผันเป็นสัดส่วนกับกระแสPick up ยกกำลังสอง เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$Z_2 = Z_1\left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 \qquad (2.14)$$

โดยที่

Z_1 = Impedance of Coil at Pick-up Current I_1 (Ω)

Z_2 = Impedance of Coil at Pick-up Current I_2 (Ω)

2.7 การแบ่งชั้นของความแม่นยำสำหรับหม้อแปลงกระแสเพื่อการป้องกัน (Classification of Protection Current Transformer)

CT. ที่ใช้กับการป้องกันมี 2 Class คือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. CT Class “P”
2. CT Class “X”

CT Class “P”

CT Class นี้ จะระบุคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. Burden (VA)
2. Class 5P, 10P
3. Accuracy Limit Factor (ALF)

ALF คือจำนวนเท่า (10 หรือ 20) คือกระแสที่ไหลผ่านทางด้าน Primary ของ CT โดย CT ยังรักษาค่าความผิดพลาดไว้ได้

ตารางที่ 2.1 แสดงถึงขีดจำกัดของความผิดพลาดสำหรับ CT

Accuracy Class	Current Error at Rated Primary Current (Percent)	Phase Displacement Rated Current (Minutes)	Composite Error at Rated Accuracy Limit Primary Current (Percent)
5P	± 1	± 60	5
10P	± 3	-	10

Knee Point Voltage ของ CT สามารถคำนวณได้จาก Burden และ ALF คือ

$$V_k = \frac{VA}{I_n} \times ALF \tag{2.16}$$

และเมื่อมีความต้านทานของ CT. ด้วย จะได้สมการที่ละเอียดขึ้ น คือ

$$V_k = ALF\left(I_{nR_{CT}} + \frac{V_A}{I_n} \right) \tag{2.17}$$

เลือก Rate ของกระแส Transformer ทาง Primary

CT. Primary Rating ≥ Full Load Current

CT Class “X”

CT Class ใช้กับงานป้องกันที่ไม่ต้องการให้ CT เกิดการอิ่มตัว (Saturation) ซึ่งสามารถดูได้จาก Knee Point Voltage เช่น ใช้กับ Differential Relays เป็นต้น

CT Class นี้ จะระบุคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. Rate Burden
2. Turns Ration
3. Knee Point Voltage
4. Max. Current (At Specified Voltage)
5. Secondary Resistance

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีและหลักการของรีเลย์ป้องกัน

3.1 รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relays) [1]

รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relays) เป็นรีเลย์ที่ใช้แพร่หลายมากที่สุดในการป้องกันความผิดพร่องอันอาจเกิดจากกระแสโหลดเกิน (Overload) และใช้ป้องกันการลัดวงจร (Short Circuit) ของระบบไฟฟ้าได้ตามลักษณะการใช้งาน โดยทั่วไปถ้าใช้ป้องกันกระแสเกินจะใช้เป็น Primary Protection ป้องกันความผิดพร่องแบบเฟส (Phase Fault) และความผิดพร่องลงดิน (Earth Fault) ในระบบของสายป้อนแบบ Radial ซึ่งส่วนมากใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อย, โรงงานอุสาหกรรม, ระบบสายส่งย่อย นอกจากนั้นสามารถใช้งานทำหน้าที่เป็นBack up Protection ได้ทุกประเภทของการป้องกัน เช่น ระบบสายส่ง, ระบบสายส่งย่อย, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, หม้อแปลงและบัสเป็นต้น

สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับรีเลย์ป้องกันกระแสเกินเป็นดังนี้

50	Instantaneous Overcurrent Relay
51	Time Delay Overcurrent Relay
50N, 50G	Grounds Instantaneous Overcurrent Relay
51N, 51G	Grounds Time Delay Overcurrent Relay

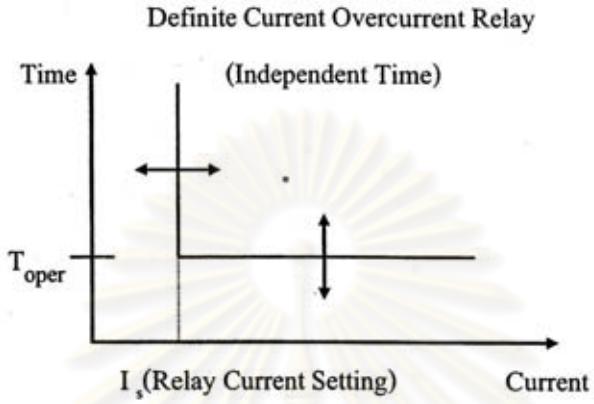
3.1.1 หลักการพื้นฐานของการป้องกันกระแสเกิน

จุดมุ่งหมายของการป้องกันกระแสเกินหรือการป้องกันในรูปแบบอื่น ๆ คือเพื่อตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังและจะนำผลที่ได้ไปทำให้Switchgear ทำงานเพื่อที่จะตัดส่วนที่เกิดความผิดพร่องออกไปจากระบบ การป้องกันต้องสามารถตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบ โดยการเลือกและตัดเฉพาะส่วนที่เกิดความผิดพร่องเท่านั้นออกจากระบบ ขณะที่ส่วนอื่น ๆ ของระบบยังทนได้ตามปกติ

ปริมาณที่ใช้ตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้น

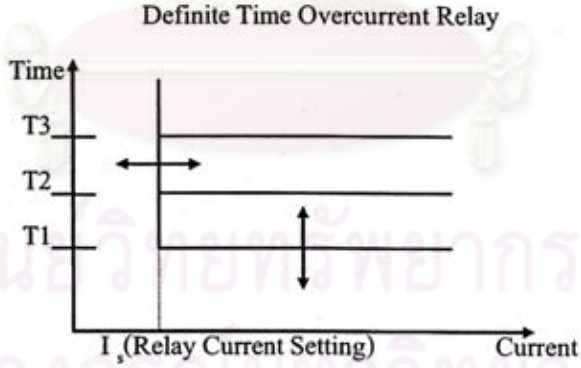
1. กระแส
2. เวลา
3. กระแสและเวลา

รีเลย์ที่ใช้กระแสเป็นปริมาณในการตรวจจับความผิดพร่องจะทำงานเมื่อกระแสผิดพร่องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสที่ปรับตั้งไว้ I_s โดยรีเลย์จะทำงานทันทีไม่ขึ้นกับเวลา เวลาที่รีเลย์ทำงานคือ I_{oper} ดังรูปที่ 3.1



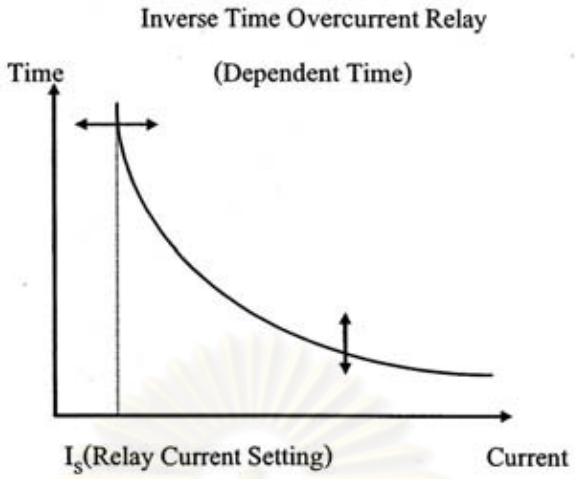
รูปที่ 3.1 ลักษณะสมบัติของ Definite Current Overcurrent Relay (Independent Time)

รีเลย์ที่ใช้เวลาเป็นปริมาณในการตรวจจับความผิดพร่องจะทำงานเมื่อกระแสผิดพร่องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสที่ปรับตั้งไว้ I_s โดยรีเลย์จะทำงานตามเวลาที่ปรับตั้งไว้ (T_1, T_2 และ T_3 เป็นต้น) ดังรูปที่ 3.2



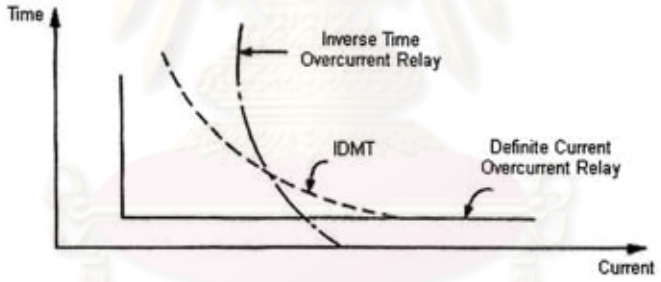
รูปที่ 3.2 ลักษณะสมบัติของ Definite Time Overcurrent Relay

รีเลย์ที่ใช้กระแสและเวลาเป็นปริมาณในการตรวจจับความผิดพร่องจะทำงานเมื่อกระแสผิดพร่องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสที่ปรับตั้งไว้ I_s โดยความเร็วในการทำงานของรีเลย์ขึ้นกับขนาดของกระแสผิดพร่องยิ่งกระแสผิดพร่องมีค่ามากรีเลย์ยิ่งทำงานเร็ว ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะสมบัติของ Inverse Time Overcurrent Relay

สำหรับรีเลย์ที่ใช้กันในปัจจุบันจะรวมลักษณะการทำงานของรีเลย์ ในรูปที่ 3.1 และ 3.3 เข้าไว้ด้วยกันนั้ น คือจะมีช่วงที่เวลาทำงานของรีเลย์แปรตามขนาดกระแสผิดพร่อง และมีช่วงที่รีเลย์ทำงานทันทีเมื่อขนาดกระแสผิดพร่องเป็นไปตามที่กำหนด ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะสมบัติของ Inverse Definite Minimum Time (IDMT) Overcurrent Relay

3.1.2 การทำ Discrimination (Co-ordination)

การทำ Discrimination เป็นการจัดลำดับการป้องกันโดยให้รีเลย์ที่อยู่ใกล้ความผิดพร่องทำงานก่อน และรีเลย์ตัวที่อยู่ห่างออกมาทำหน้าที่เป็นตัว Backup ในกรณีที่รีเลย์ที่อยู่ใกล้ความผิดพร่องไม่ทำงาน รีเลย์ที่ทำหน้าที่ Backup จะต้องทำการตัดความผิดพร่องแทน

3.1.2.1 การทำ Discrimination ความผิดพร่องโดยใช้กระแส

การทำ Discrimination โดยใช้กระแสความผิดพร่อง อาศัยหลักการที่ว่ากระแสผิดพร่องจะแปรตามตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง ซึ่งเป็นการแปรผันตามอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น สายเคเบิล และหม้อแปลง รีเลย์ของระบบทั้ งหมดถูกปรับตั้ งให้ทำงานที่ค่าที่เหมาะสมโดยรีเลย์ที่อยู่ใกล้กับจุดที่เกิดความผิดพร่องมากที่สุดจะทำงานก่อน

3.1.2.2 การทำ Discrimination ความผิดพร่องโดยใช้เวลา

ใช้หลักการที่ว่าแต่ละตัวจะถูกตั้งค่าหน่วงเวลา(Time Delay) ไว้คงที่รีเลย์ตัวที่อยู่ไกลจากแหล่งจ่ายมากที่สุดมีค่าหน่วงเวลาสั้นที่สุด เวลาในการทำงานไม่ขึ้นกับระดับของกระแสผิดพร่อง ข้อเสียของวิธีนี้ คือ รีเลย์ตัวที่อยู่ใกล้แหล่งจ่ายซึ่งแต่เป็นจุดที่มีระดับกระแสความผิดพร่องสูงจะมีค่าหน่วงเวลายาวนานเมื่อเกิดความผิดพร่องใกล้แหล่งจ่ายกระแสผิดพร่องอาจคงอยู่นานเกินไปทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ต้นทางได้

3.1.2.3 การทำ Discrimination โดยใช้ทั้งเวลาและกระแส

เนื่องจากการทำ Discrimination โดยใช้กระแสผิดพร่องอย่างเดียวหรือใช้เวลาอย่างเดียวมีข้อจำกัดดังได้กล่าวมาแล้ว จึงมีการพัฒนาลักษณะสมบัติกระแสเกินผกผันกับเวลา (Inverse Time Overcurrent Relay Characteristic) ซึ่งถูกพัฒนาต่อมาเป็น Inverse Definite Minimum Time (IDMT) Characteristic มาใช้งานแทนโดยลักษณะของเวลาทำงานเป็นสัดส่วนกลับกับกระแสที่ใช้คือ กระแสยิ่งมากเวลาในการทำงานของรีเลย์ก็ยิ่งสั้น

3.1.3 ชนิดของรีเลย์กระแสเกิน

รีเลย์กระแสเกินที่มีใช้กันอยู่ในขณะนี้ มี3 แบบ คือ

- Electromechanical Overcurrent Relay
- Static Overcurrent Relay
- Digital Overcurrent Relay

โดยการ Set Relay แต่ละแบบทำได้ 2 วิธีคือ

1. Current Tap

   โดยเลือกใช้ Plug Setting Multiplier (PSM) ซึ่งมีค่าเป็นจำนวนเท่าของค่ากระแส Setting

2. Time Setting

   ปรับโดยการหมุน (Dial) ดังนั้นบางครั้งเรียกว่าTime Dial Setting โดยสามารถปรับได้ตั้งแต่ช่วง0.1-1.0 ปกติเรียก Time Multiplier Setting (TMS)

3.1.3.1 Electromechanical Overcurrent Relay

รีเลย์แบบนี้จะเป็นชนิดInduction Disc มี Operating Coil พันให้มี Taps อยู่ 7 Taps ซึ่งแต่ละ Tap จะให้ I-t Curves รูปร่างเหมือนกัน เช่น ขดลวด 2.5-10 A จะมี Tap ดังนี้

Tap	2.5	3.0	3.75	5.0	6.0	7.5	10.0
	(50%	60%	75%	100%	120%	150%	200%)

Electromechanical Overcurrent Relay นี้ มีCurve ให้เลือกหลายแบบ ตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานดังนี้

1. Standard Inverse Time

ลักษณะสมบัตินี้ ตรงตามมาตรฐานBS (British Standard) หรือโดยทั่วไปคือ 3/10 Characteristic ซึ่งเมื่อค่ากระแสผิดพร่องเท่ากับ 10 เท่าของกระแส Plug Setting แล้วรีเลย์จะทำงานภายใน 3 วินาที ที่ค่า TMS = 10

รีเลย์ลักษณะสมบัตินี้ มีใช้งานอยู่ทุกระดับแรงดัน เช่น เป็นตัวป้องกันสำรอง (Backup) ของระบบ EHV และเป็นตัวป้องกันหลักของระบบHV และ MV โดยทั่วไป Standard Inverse Time Characteristic จะใช้เมื่อ

1) ไม่มีการทำ Discrimination กับอุปกรณ์ป้องกันชนิดอื่น ๆ เช่น ฟิวส์และมอเตอร์ เป็นต้น

2) ระดับความผิดพร่อง ณ ตำแหน่งที่ใกล้และไกลของระบบไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

3) ค่ากระแสพุ่งเข้า (Inrush) ที่ Cold Load Pick up ต่ำสุด โดยที่กระแส Cold Load คือกระแสที่เกิดขึ้นเมื่อสายจ่าย(Feeder) ได้รับพลังงานหลังจากอยู่ภายนอกระบบเป็นเวลานาน โดยทั่วไปแล้วรีเลย์จะไม่ตั้งค่าไว้เกินค่านี้ แต่กระแสจะลดต่ำลงกว่าค่าที่รีเลย์ตั้งไว้ก่อนหน้าที่หน้าสัมผัสของรีเลย์จะเปิด

2. Long Time Inverse

ลักษณะสมบัตินี้ ได้มาจากรีเลย์แบบInduction Disc ซึ่งจะมีการหน่วงมากและใช้เวลานาน เราจะใช้รีเลย์ชนิดนี้ ในการป้องกันความต้านทานที่ต่อลงดินของสายนิวทรัล ที่มีเวลาพิกัด 30 s รีเลย์ชนิดนี้ มีการตั้งค่าตายตัวได้ 2 แบบ คือ 15% และ 20% Tap Version ของรีเลย์ชนิดนี้ มีอยู่ที่ช่วงการของค่าที่ตั้ง 80-200% ที่กระแส 5 A และสามารถนำไปใช้กับการป้องกันโหลดเกินของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เวลาทำงานของรีเลย์ที่ 5 เท่าของค่ากระแสปรับตั้งเท่ากับ 30 s ที่ TMS = 1.0

3. Very Inverse Time

ลักษณะสมบัติแบบนี้ ปกติใช้เมื่อต้องการเลือกใช้ค่าเวลากว้าง ๆ ในขณะที่แฟกเตอร์เวลาทั้งหมดต่ำมาก ๆ และกระแสที่ตำแหน่งใด ๆ ในระบบมี

ค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ถ้าแสดงได้ว่ากระแสผิดพร่องลดลงตามระยะทางที่ใกล้จากแหล่งจ่าย Very Inverse Time Characteristic เหมาะสำหรับใช้ในกรณีนี้ เส้นโค้งส่วนกลับเวลาที่ชันมาก ๆ จะใช้ช่วงเวลาของการ grading ยาวขึ้น

4. Extremely Inverse Time

ลักษณะสมบัตินี้ เวลาทำงานผกผันกับค่ากระแสยกกำลังสอง เวลาทำงานของรีเลย์นานที่ค่ากระแสโหลดสูงสุดทำให้รีเลย์เหมาะสมกับการGrading กับฟิวส์ และเหมาะสมสำหรับการป้องกันสายจ่ายซึ่งได้รับกระแสค่ายอดสูงสุดตอนปิดวงจร เช่น สายป้อนสำหรับ ตู้เย็น ปั๊ม เครื่องทำน้ำร้อนและอื่น ๆ ซึ่งยังคงต่ออยู่หลังจากที่ตัดแหล่งจ่ายไฟออกไปเป็นเวลานาน

จาก Curve ที่มีความแตกต่างกัน ในการทำ Discrimination จะต้องกำหนด Curve ที่ใช้หรือ Model ของ Relay ให้ชัดเจน อย่างไรก็ตามใน Relay แต่ละ Model สามารถปรับ Curve ตามเวลาได้ตาม TMS จึงสามารถเลือก Curve แบบเดียวกันได้หลายเส้น

3.1.3.2 Static Overcurrent Relay

รีเลย์แบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้แทนElectromechanical Relay มี Curve ให้เลือกหลายแบบในตัวเดียวทำให้สะดวกในการทำ Discrimination โดยสามารถปรับเลือก Curve ได้ตามต้องการ

- Time Multiplier Setting ปรับตั้งได้ตั้งแต่0.05-1.00 TMS
- Inverse Curve จะแทนด้วยสูตรดังนี้

Standard Inverse $$t = \frac{0.14}{I^{0.02} - 1} \times TMS \quad (3.1)$$

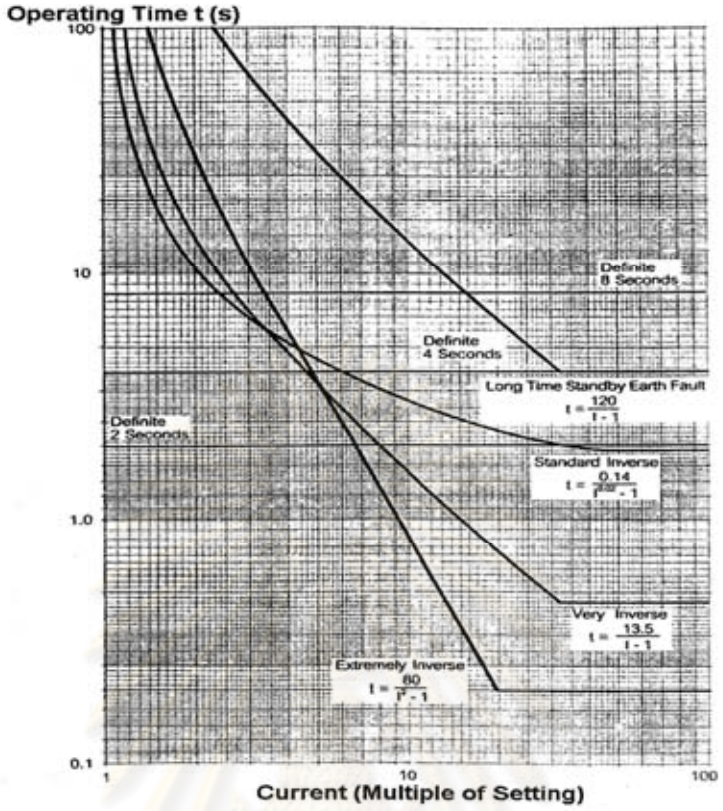
Very Inverse $$t = \frac{13.5}{I - 1} \times TMS \quad (3.2)$$

Extremely Inverse $$t = \frac{80}{I^{2} - 1} \times TMS \quad (3.3)$$

Very Inverse $$t = \frac{120}{I - 1} \times TMS \quad (3.4)$$

โดย I แทนจำนวนเท่าของกรแส Setting (PMS)

เนื่องจาก Curve แทนด้วยสมการข้างต้น ดังนั้นการทำDiscrimination จึงไม่จำเป็นต้องใช้ Graph ในการคำนวณโดย Curve เหล่านี้มีลักษณะเหมือน Curve ของ Electromechanical Relay ทุกประการ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Static Overcurrent Relay Characteristic

3.1.3.3 Digital Overcurrent Relay

รีเลย์ชนิดนี้ใช้ Digital Technology ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาทำงานแทน Electromechanical Relay และ Static Relay โดยมี Function อื่น ๆ เพิ่มอีกมาก ทำให้มีข้อดีต่าง ๆ เช่น

- ใช้ Spare น้อยลง
- การ Operate ง่ายขึ้น
- ลดพื้นที่ในการติดตั้ง (Space Requirement)
- ลดค่าติดตั้ง (Installation Cost) และค่าซ่อมบำรุง
- Burden ต่ำมาก ดังนั้นจึงลด Burden ของ CT และ VT

Digital Relay นี้มี Curve แบบใหม่เหมือน (Microprocessor Based Low Voltage CB) และมี Curve แบบเดิมให้ด้วย

3.1.4 สมการเวลาทำงานของรีเลย์กระแสเกิน

เวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินคำนวณจากสมการดังนี้

$$t(I) = \frac{A}{M^P - 1} \times TMS \qquad (3.5)$$

โดย t (I) = เวลาที่รีเลย์จะทำงาน

A, P = ค่าคงที่ขึ้ นกับเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่เลือกใช้ ดูได้จากตารางที่ 3.1

TMS = ค่าที่ใช้ในการปรับตั้ งเวลาการทำงานของรีเลย์ให้ช้าหรือเร็วตามต้องการ

ค่า M หรือ Plug Setting Multiplier คำนวณจากสมการดังนี้

$$M = \frac{I_{Input}}{I_{Pickup}} \tag{3.6}$$

โดย I_{Input} = กระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงกระแสด้านปฐมภูมิ

ค่ากระแสที่ตั้ งไว้(Pick up Current) คำนวณได้จากสมการ

$$I_{Pickup} = (\text{CTS x CT Secondary}) /100 \tag{3.7}$$

CTS = ค่าปรับตั้ งกระแสแทป(Current Tap Setting)

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ และ เลขยกกำลัง สำหรับเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของรีเลย์กระแสเกิน

Curve Characteristic	A	P
Standard Inverse	0.14	0.02
Very Inverse	13.5	1
Extremely Inverse	80	2
Long Inverse	120	1

3.1.5 Grading Margin

ในการทำ Discrimination รีเลย์ที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดความผิดพร่องที่สุด ถูกจัดเป็นรีเลย์ป้องกันหลัก ซึ่งต้องทำงานก่อนรีเลย์ทุกตัวในระบบ รีเลย์ตัวถัดไปจะทำงานเป็นรีเลย์ป้องกันสำรองและจะต้องหน่วงเวลาไว้ปริมาณหนึ่ง การหน่วงเวลาของรีเลย์ป้องกันสำรอง เรียกว่า Grading Margin จะต้องพิจารณาให้เหมาะสม เนื่องจากหากค่า Grading Margin มีค่ามากเกินไป ความเสียหายต่อระบบและอุปกรณ์ จะมากเมื่อรีเลย์ป้องกันหลักไม่ทำงาน แต่ถ้ามีค่าน้อยเกินไปรีเลย์ป้องกันสำรองอาจทำงานก่อนรีเลย์ป้องกันหลักซึ่งจะตัดวงจรออกมากเกินความจำเป็น

Grading Margin ขึ้ นกับปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. เวลาในการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อมีไฟเลี้ ยงวงจรTrip จะเกิดแรงทำให้ Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์เลื่อนที่แยกออกจาก Fixed Contact และเกิดอาร์กระหว่างหน้าสัมผัสทั้สอง เนื่องจากการเคลื่อนที่ทางกลจะต้องใช้เวลา โดยเวลาทั้ งหมดในการตัด

วงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์นับตั้งแต่Moving Contact เริ่มเคลื่อนจนอาร์กดับหมด จะขึ้นอยู่กับชนิดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยมีค่าประมาณ 5 รอบ หรือ 0.1 วินาที

2. เวลา Overshoot ของรีเลย์ หลังจากที่รีเลย์ถูกตัดไฟออกแล้ว รีเลย์ยังคงทำงานต่ออีกเล็กน้อยจนกระทั่งพลังงานที่เก็บไว้ของรีเลย์หมดไป ตัวอย่างเช่นInduction Disc Element จะเก็บไว้ในรูปพลังงานจลน์ หรือ ความเฉื่อย ส่วน Static Relay มีพลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุ โดยทั่วไปเวลา Overshoot ของรีเลย์มีค่าประมาณ 0.05 วินาที สำหรับ Digital relay ค่า Overshoot มีค่าน้อยมากจึงอาจไม่คิดเลย

3. ค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด เช่น รีเลย์ป้องกัน และ หม้อแปลงวัดกระแส เป็นต้น จะมีความผิดพลาดและค่าลักษณะทางเวลาของรีเลย์มีค่าผิดพลาดทั้งทางด้านลบและทางด้านบวก โดยที่ค่าความผิดพลาดของหม้อแปลงวัดกระแสเกิดจากลักษณะทางแม่เหล็ก (Magnetizing Characteristic)

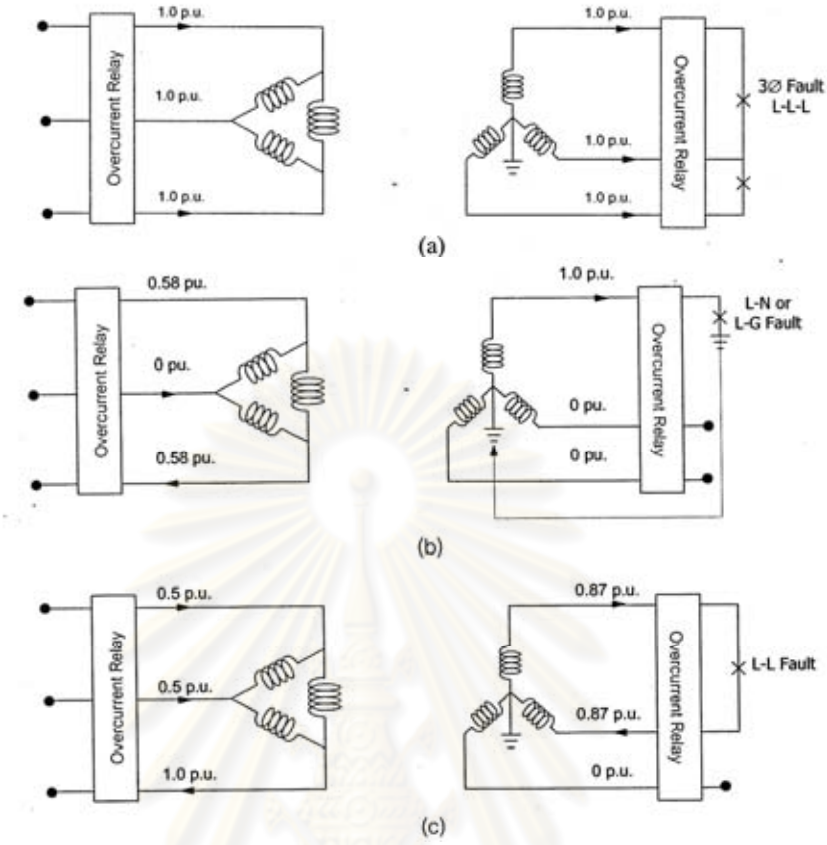
4. Safety Margin มีค่าประมาณ 0.1 วินาที จะถูกรวมไปในขั้นตอนสุดท้ายของการคำนวณเพื่อให้แน่ใจว่าทำ Discrimination ถูกต้อง

ที่ผ่านมาค่า Grading Margin ที่กำหนดไว้มีค่าเท่ากับ 0.3-0.5 วินาที แต่ปัจจุบันเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถทำงานได้เร็วกว่าเดิมและค่าความผิดพลาดลดลง จึงสามารถตัดเวลา Overshoot ของรีเลย์และลดค่า Allowance ของความผิดพลาดเป็น 0.05 วินาที ดังนั้นค่า Grading Margin ที่เหมาะสมในการนำไปใช้ คือ 0.25-0.40 วินาที

3.1.6 การทำ Coordination ระหว่างรีเลย์กระแสเกิดทางด้านปฐมภูมิ กับ ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ต่อแบบ $\Delta - Y$

การต่อหม้อแปลงแบบ $\Delta - Y$ เมื่อเกิดการลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ กระแสทางปฐมภูมิจะขึ้นกับชนิดของการลัดวงจร ดังรูปที่3.6 โดยกำหนดกระแสเป็น pu. เทียบกับการลัดวงจรแบบสามเฟส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 การเกิดความผิดพร่องลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงที่ต่อแบบ $\Delta - Y$

กรณี (a) การทำ Coordination ระหว่างรีเลย์ด้านทุติยภูมิกับด้านปฐมภูมิจะใช้ Margin เป็นค่าปกติ คือ 0.3-0.5 วินาที เนื่องจากกระแสที่รีเลย์ทั้ งง2 ด้าน มองเห็นมีค่า pu. เท่ากัน

กรณี (b) กระแสเป็น pu. ทางด้านทุติยภูมิ ที่รีเลย์มองเห็นมีค่าสูงกว่าทางด้านปฐมภูมิ ดังนั้นสามารถใช้ Margin ปกติได้ เนื่องจากรีเลย์ทางด้านปฐมภูมิจะทำงานช้ากว่าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งเป็นจุดประสงค์ของการทำ Coordination อยู่แล้ว

กรณี (c) กระแสเป็น pu. ทางด้านทุติยภูมิ ที่รีเลย์มองเห็นมีค่าต่ำกว่าทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งส่งผลให้รีเลย์ทางด้านปฐมภูมิทำงานเร็วกว่าทางด้านทุติยภูมิ ดังนั้ นจะต้องทำ Coordination ของรีเลย์เพื่อให้ครอบคลุมกรณีการเกิดลัดวงจรทั้ งหมดดังนี้

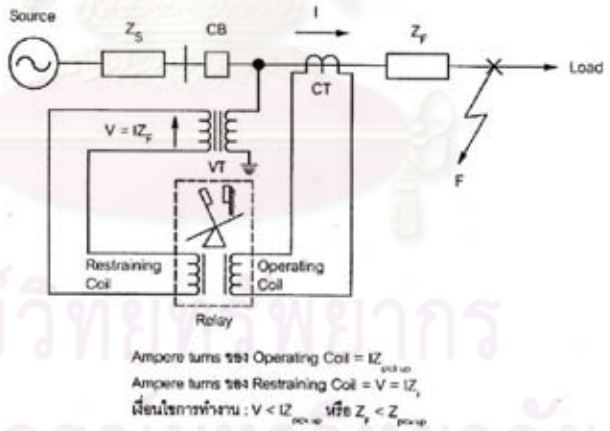
- ให้หาเวลาที่รีเลย์จะทำงานเมื่อกระแสทางทุติยภูมิเท่ากับ0.86 pu. นำมารวมกับ margin จะได้เวลาที่รีเลย์ทางด้านปฐมภูมิจะต้องทำงาน
- ในการคำนวณหาเวลาของรีเลย์ทางด้านปฐมภูมิจะใช้กระแสสูงสุดของสายใดสายหนึ่ง ในที่นี้ คือ1.00 pu.

3.2 **รีเลย์ระยะทาง** (Distance Relay) [1]

คือรีเลย์ที่สามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ของจุดที่เกิดความผิดพร่องจนถึงจุดที่ติดตั้ งหม้อแปลงกระแส (CT) และหม้อแปลงแรงดัน (VT) โดยจะต้องวัดค่ากระแสและแรงดันแล้วนำมาหาอัตราส่วนเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งต่อความยาวมีค่าสม่ำเสมอแล้วค่าอิมพีแดนซ์จะเป็นสัดส่วนกับระยะทาง ดังนั้ นรีเลย์ชนิดนี้ จึงเรียกว่ารีเลย์ระยะทาง รีเลย์ชนิดนี้ จะทำงานเมื่อการผิดพร่องเกิดขึ้ นอยู่ในระยะทางที่กำหนดซึ่งกำหนดโดยค่าอิมพีแดนซ์ การวัดค่าอิมพีแดนซ์สามารถวัดผ่านค่ารีแอกแตนซ์(Reactance) หรือ ความนำเชิงเส้น (Admittance) ก็ได้

3.2.1 **หลักการทำงานของรีเลย์ระยะทาง**

หลักการทำงานของรีเลย์ระยะทางเบื้ องต้นสามารถพิจารณาได้จากรีเลย์ระยะทางแบบอิมพีแดนซ์ซึ่งรีเลย์จะเปรียบเทียบค่ากระแสลัดวงจรที่รีเลย์มองเห็นกับค่าแรงดันที่ตำแหน่งซึ่งติดตั้ งรีเลย์ไว้ โดยการเปรียบเทียบนี้ ทำให้สามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายจนถึงตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรได้ หากค่าอิมพีแดนซ์มีค่ามากกว่าที่ตั้ งเอาไว้ นั้ นคือการลัดวงจรนอกZone การป้องกันของรีเลย์หรือระบบอาจอยู่ในสภาพปกติก็ได้ รีเลย์ก็จะไม่ทำงาน ตัวอย่างง่าย ๆ ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดัน และกระแสลัดวงจร คือ รีเลย์ไฟฟ้ากลแบบคานสมดุล (Balanced Beam Relay) ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 หลักการแบบคานสมดุลในรีเลย์ระยะทาง

จากรูป 3.7 ต่อขดลวดกระแสเป็นขดลวดทำงาน (Operating Coil) และต่อขดลวดแรงดันเป็นขดลวดต้านการทำงาน (Restraining Coil) รีเลย์จะวัดอัตราส่วนระหว่างแรงดัน และกระแส เมื่ออัตราส่วน V/I มีค่าต่ำกว่าค่าที่ตั้ งไว้ แรงฉุดทำงานจะมากกว่าแรงฉุดต้าน จะทำให้รีเลย์ทำงาน แต่ถ้าอัตราส่วนV/I มีค่ามากกว่าค่าที่ตั้ งไว้แรงฉุดต้านจะมากกว่าแรงฉุดทำงาน รีเลย์จะไม่ทำงาน สมการของแรงบิดอาจเขียนได้ดังนี้

$$T_1 = K_1 I^2 - K_2 V^2 - T_s \quad (3.8)$$

โดยที่ I คือค่า RMS ของกระแส

V คือค่า RMS ของแรงดัน

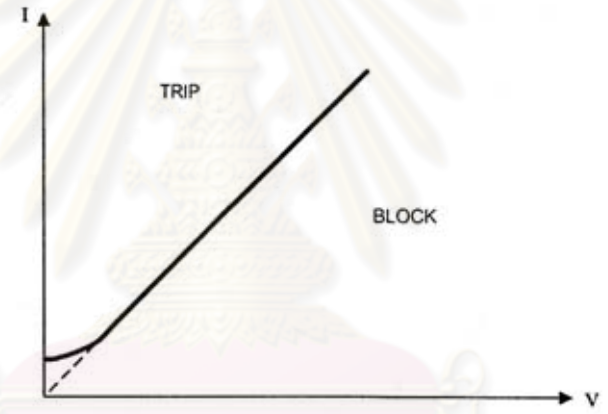
K_1, K_2 คือค่าคงที่

T_s เป็นแรงฉุดของสปริงควบคุม

หากละเลย T_s ซึ่งมีค่าน้อย รีเลย์จะทำงานเมื่อ $T \approx K_1 I^2 - K_2 V^2 > 0$ นั้นคือเมื่อ

$$\frac{V}{I} = Z_F \leq \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} = Z_{Pickup} \quad (3.9)$$

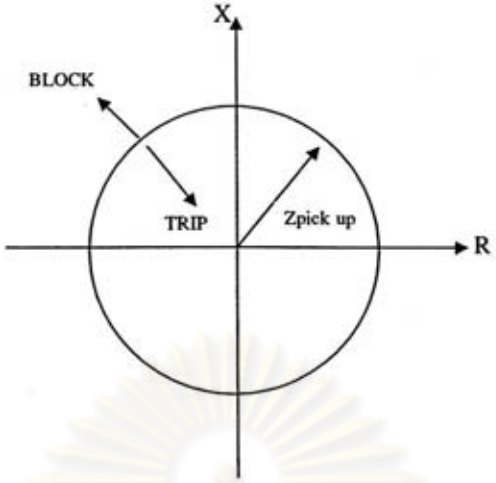
ลักษณะการทำงานของรีเลย์ในแกนของแรงดัน และกระแส แสดงได้ดังรูป 3.8 เส้นทึบคิดผลของสปริงควบคุม เส้นประละเลยผลของสปริงควบคุม



รูปที่ 3.8 ลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางในแกนของแรงดันและกระแส

เมื่อ V และ I ซึ่งเขียนแทนได้ด้วยจุดอยู่เหนือเส้นแสดงลักษณะการทำงานของรีเลย์ (Zone ที่แรงฉุดเป็นบวก หรือ Zone ที่อิมพีแดนซ์น้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้รีเลย์ก็จะทำงาน (Trip) แต่ถ้าอยู่ต่ำกว่าเส้นดังกว่า(Zone ที่แรงฉุดเป็นลบ หรือ Zone ที่อิมพีแดนซ์มากกว่าค่าที่ตั้งไว้รีเลย์ก็จะไม่ทำงาน (Block)

ถ้าเขียนลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางใน R-X Diagram จะได้ดังรูปที่ 3.9 โดยละเลยผลของสปริงควบคุมที่กระแสต่ำ ๆ ซึ่งจำทำให้รัศมีของวงกลมเล็กลง



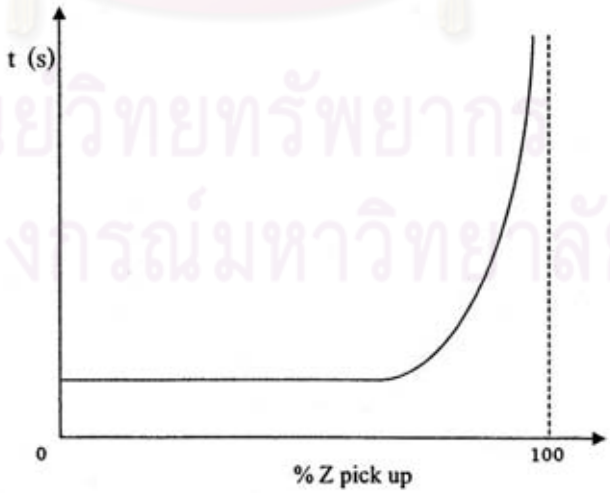
รูปที่ 3.9 ลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางใน R-X Diagram

เมื่อ $Z_F = \frac{V}{I} = R + jX$

เมื่อจุดอยู่ในวงกลม แรงฉุดเป็นบวก รีเลย์ทำงาน(Trip)

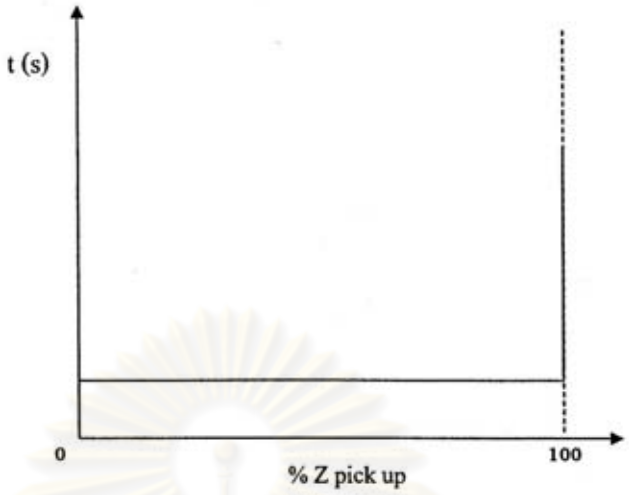
แต่ถ้าอยู่นอกวงกลม แรงฉุดเป็นลบ รีเลย์ไม่ทำงาน(Block)

รีเลย์ระยะทางแบบอิมพีแดนซ์ มักเป็นแบบที่ทำงานด้วยความเร็วสูง สำหรับการทำงานตลอดช่วงที่ตั้งไว้ให้ทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เส้นแสดงเวลาทำงานนี้ แสดงไว้สำหรับกระแสที่มีขนาดค่าต่าง ๆ ถ้ากระแสเพิ่มขึ้น เส้นจะต่ำลง แต่โดยปกติแล้วการใช้รีเลย์แบบนี้ มักใช้ให้การทำงานเร็วมาก จึงไม่ค่อยคิดผลของการเปลี่ยนแปลงนี้



รูปที่ 3.10 เวลาการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบอิมพีแดนซ์ที่กระแสค่าหนึ่ง ๆ

ในรูปที่ 3.10 เมื่ออิมพีแดนซ์มีค่าเข้าใกล้อิมพีแดนซ์ที่ตั้งไว้ รีเลย์จะทำงานช้า เพราะแรงฉุดต่ำ แต่ผลอันนี้ มักถูกละเลย จึงเขียนเส้นแสดงเวลาการทำงานอย่างง่าย ๆ ได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เวลาการทำงานอย่างง่ายของรีเลย์ระยะทางแบบอิมพีแดนซ์

3.2.2 รีเลย์ระยะทางแบบ 3 เฟส

สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่มีการต่อลงดินนั้น มีการลัดวงจรที่เป็นไปได้ทั้งหมดอยู่10 ลักษณะ คือ

1. Three Phase Fault 1 แบบ
2. Phase-to-Phase Fault 3 แบบ ได้แก่ A-B, B-C, C-A
3. Phase-to-Phase-to-Ground Fault 3 แบบ ได้แก่ A-B-G, B-C-G, C-A-G
4. Phase-to-Ground Fault 3 แบบ ได้แก่ A-G, B-G, C-G

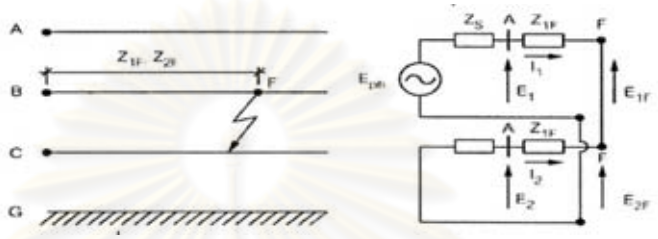
จากลักษณะของการเกิดลัดวงจรที่เป็นไปได้ทั้ง10 แบบดังกล่าวนี้ สมการของระบบที่เกี่ยวข้องกับแรงดันและกระแสที่ตำแหน่งของรีเลย์ย่อมแตกต่างกันไปในแต่ละลักษณะของการลัดวงจร จึงเป็นไปได้ว่าจะต้องใช้ Distance Relay หลายๆ ตัว แต่ละตัวถูกกระตุ้นให้ทำงานโดยแรงดันและกระแสขาเข้าที่ต่างกันเพื่อใช้ในการวัดระยะทางของตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรได้อย่างถูกต้องสำหรับการลัดวงจรแบบต่างๆ และเพื่อให้การตั้งค่าอิมพีแดนซ์สำหรับรีเลย์ทั้งหมดเป็นไปในทางเดียวกันจะใช้หลักการที่ว่า

“ไม่ว่าจะเป็นการลัดวงจรแบบใดก็ตาม แรงดันและกระแสขาเข้าที่ใช้ป้อนให้กับรีเลย์ตัวที่เหมาะสม จะต้องทำให้รีเลย์ตัวนั้นสามารถวัดPositive Sequence impedance (Z_{1F}) ได้”

ต่อไปจะวิเคราะห์การลัดวงจรแต่ละแบบว่าต้องใช้แรงดันและกระแสอะไรเป็นปริมาณขาเข้าให้กับรีเลย์

1. Phase-to-Phase Fault

พิจารณาการลัดวงจรระหว่างเฟส B กับเฟส C ที่จุด F ของระบบสายส่งแบบ 3 เฟสซึ่งสามารถแทนด้วย Symmetrical Component โดยมี Positive และ Negative Sequence Network ต่อขนานกันที่จุด F ดังที่รูป 3.12 สังเกตว่า Positive และ Negative Sequence Impedance มีค่าเท่ากัน



รูปที่ 3.12 วงจร Symmetrical Component สำหรับการลัดวงจร B-C

แรงดันที่จุด F สำหรับใน Positive และ Negative Sequence มีค่าเท่ากันดังนี้

$$E_{1F} = E_{2F} = E_1 - Z_{1F}I_1 = E_2 - Z_{1F}I_2$$

จัดรูปได้เป็น $$\frac{E_1 - E_2}{I_1 - I_2} = Z_{1F}$$

โดย

$$E_A = E_0 + E_1 + E_2$$

$$E_B = E_0 + a^2E_1 + aE_2$$

$$E_C = E_0 + aE_1 + a^2E_2$$

$$I_A = I_0 + I_1 + I_2$$

$$I_B = I_0 + a^2I_1 + aI_2$$

$$I_C = I_0 + aI_1 + a^2I_2$$

ดังนั้นจะได้ $$E_B - E_c = \left(a^2 - a\right)\left(E_1 - E_2\right)$$

$$I_B - I_c = \left(a^2 - a\right)\left(I_1 - I_2\right)$$

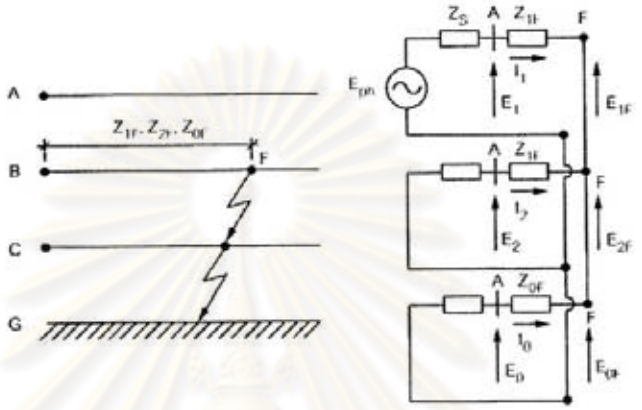
จากสมการข้างต้น

$$\frac{E_B - E_C}{I_B - I_C} = \frac{E_1 - E_2}{I_1 - I_2} = Z_{1F} \qquad (3.10)$$

จากสมการ 3.10 จะพบว่าในกรณีที่เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส เมื่อใช้แรงดันสายระหว่างเฟสที่เกิดการลัดวงจร กับผลต่างของกระแสในสองเฟสนั้น จะสามารถวัดPositive Sequence impedance ได้

2. Phase-to-Phase-to-Ground Fault

เมื่อเกิดการลัดวงจรเฟส B C และ Ground ที่จุด F จะสามารถแทนด้วย Symmetrical Component โดยมี Positive, Negative และ Zero Sequence Network ต่อขนานกันที่จุด F ดังรูปที่ 3.13

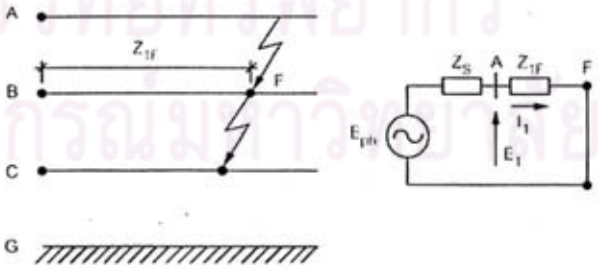


รูปที่ 3.13 วงจร Symmetrical Component สำหรับการลัดวงจร B-C-G

จะพบสมการ 3.10 ยังคงใช้ได้สำหรับรูปที่ 3.14 ดังนั้นสำหรับกรณีการลัดวงจรแบบนี้ เมื่อใช้แรงดันสายระหว่างเฟสที่เกิดการลัดวงจรกับผลต่างของกระแสในสองเฟสนั้น จะสามารถวัด Positive Sequence impedance ได้เช่นเดียวกัน

3. Three Phase Fault

เมื่อเกิดการลัดวงจรทั้ง 3 เฟสที่จุด F จะสามารถแทนด้วย Symmetrical Component โดยมีเพียง Positive Sequence Network เท่านั้นดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจร Symmetrical Component สำหรับการลัดวงจร 3 เฟส

จากรูปที่ 3.14 จะได้สมการแสดงลักษณะสำหรับการลัดวงจร3 เฟสดังนี้

$$E_1 = E_A = Z_{1F} I_1 = Z_{1F} I_A = E_{ph} - Z_s I_1$$

$$E_2 = E_0 = 0$$

และ $I_2 = I_0 = 0$

เนื่องจาก

$$E_A = E_0 + E_1 + E_2 = E_1$$

$$E_B = E_0 + a^2E_1 + aE_2 = a^2E_1$$

$$E_C = E_0 + aE_1 + a^2E_2 = aE_1$$

$$I_A = I_0 + I_1 + I_2 = I_1$$

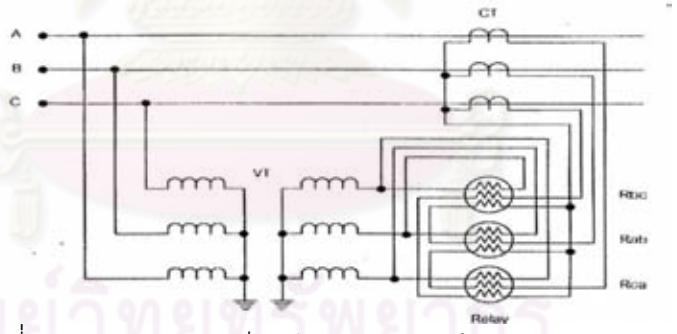
$$I_B = I_0 + a^2I_1 + aI_2 = a^2I_1$$

และ $$I_C = I_0 + aI_1 + a^2I_2 = aI_1$$

จะได้ว่า

$$\frac{E_A - E_B}{I_A - I_B} = \frac{E_B - E_C}{I_B - I_C} = \frac{E_C - E_A}{I_C - I_A} = Z_{1F} \qquad (3.11)$$

จากกรณีการลัดวงจรทั้ง3 แบบที่กล่าวไปแล้ว จะพบว่าหากใช้ผลต่างแรงดันเฟสและผลต่างกระแสเฟสที่สอดคล้องกัน จะสามารถวัดPositive Sequence impedance ได้ ซึ่งอาจทำได้โดยต่อรีเลย์ดังรูปที่ 3.15 โดยใช้ Distance Relay 1 เฟส 3 ตัว แต่ละตัวได้รับผลต่างแรงดันเฟส และกระแส 2 เฟสที่สอดคล้องกันแต่ละทิศตรงข้ามกันเป็นปริมาณขาเข้า

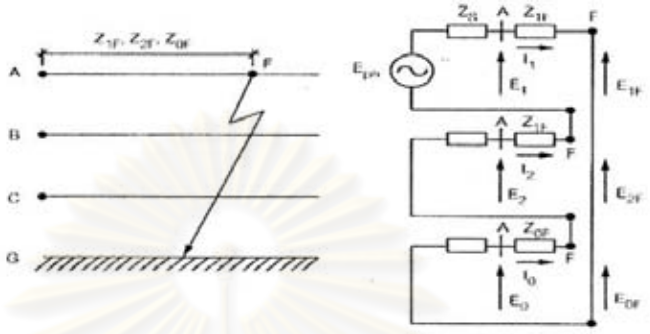


รูปที่ 3.15 แสดงการต่อรีเลย์, CT และ VT สำหรับ Phase Fault

จากรูปที่ 3.15 จะพบว่ารีเลย์ทั้ง 3 ตัว สามารถวัด Positive Sequence impedance ได้สำหรับการลัดวงจร 7 แบบ โดยที่กรณีการลัดวงจร 3 เฟส รีเลย์ทั้ง3 ตัว จะสามารถวัด Positive Sequence ได้ถูกต้อง ส่วนกรณี Phase-to-phase Fault 3 แบบละ Phase-to-phase-to-Ground Fault อีก 3 แบบ จะมีรีเลย์เพียง 1 ตัว เท่านั้นที่สามารถวัดPositive Sequence impedance ได้อย่างถูกต้อง

4. phase-to-Ground Fault

สำหรับการลัดวงจรที่เฟส A กับ Ground ที่จุด F จะสามารถแทนด้วย Symmetrical Component โดยมี Positive, Negative และ Zero Sequence Network ต่ออนุกรมที่จุด F กันดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วงจร Symmetrical Component สำหรับการลัดวงจร A-G

จากรูปที่ 3.16 จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ และกระแสดังนี้

$$E_{1F} = E_1 - Z_{1F} I_1$$

$$E_{2F} = E_2 - Z_{1F} I_2$$

$$E_{0F} = E_0 - Z_{0F} I_0$$

แรงดันที่เฟส A สามารถเขียนได้ในรูป Symmetrical Component และมีค่าเป็น 0 นั้นคือ

$$\begin{aligned} E_{AF} &= E_{0F} + E_{1F} + E_{2F} \\ &= (E_0 + E_1 + E_2) - Z_{1F}(I_1 + I_2) - Z_{0F} I_0 \\ &= E_A - Z_{1F} I_A - (Z_{0F} - Z_{1F}) I_0 \\ &= 0 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ว่า $E_A = Z_{1F}(I_A + \frac{Z_{0F} - Z_{1F}}{Z_{1F}} I_0)$ (3.12)

จากนั้นนิยาม $E_A = Z_{1F} I'_A$

จะได้ $I'_A = I_A + (\frac{Z_{0F} - Z_{1F}}{Z_{1F}}) I_0 = I_A + (\frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}) I_0$ (3.13)

เนื่องจาก $I_A = I_0 + I_1 + I_2$ โดย $I_0 = I_1 + I_2$

$$I_A = 3I_0$$

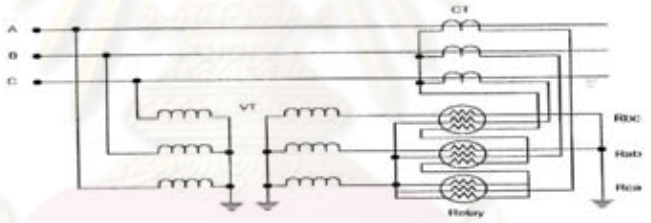
จะได้ $I'_A = I_A + \left(\frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \right) I_A$

$$I'_A = I_A + \left(1 + \frac{m}{3}\right)$$

เมื่อ Z_0 และ Z_1 เป็น Zero และ Positive Sequence impedance ของสายส่งทั้งเส้น และเรียกm ว่า Compensation Factor ซึ่งเป็นตัวชดเชยกระแสเฟสในส่วนที่เป็นผลมาจากเฟสที่ไม่เกิดการลัดวงจร ในที่สุดจะได้ว่า

$$\frac{E_A}{I'_A} = Z_{1F} \qquad (3.14)$$

ดังนั้นใช้แรงดันเฟสและกระแสที่ถูกชดเชยแล้วเป็นปริมาณขาเข้า จะทำให้ Distance Relay สามารถวัด Positive Sequence impedance ได้ โดยทั่วไปค่า m สำหรับสายส่ง Overhead จะมีค่าระหว่าง 1.5 ถึง 2.5 หรืออาจใช้ค่าเฉลี่ย คือ 2.0 ก็ได้ นั่นคือ Z_0 ของสายส่งจะเป็น 3 เท่าของ Z_1 ส่วนการสร้างวงจรรีเลย์สำหรับการลัดวงจรแบบนี้ ก็ทำได้ดังรูปที่3.17 โดยใช้ Distance Relay แบบ 1 เฟส 3 ตัว แต่ละตัวได้รับแรงดันขาเข้าเป็นแรงดันเฟส กระแสขาเข้าเป็นกระแสในเฟสเดียวกับแรงดันรวมกับกระแส I_0 ส่วนค่า m นั้นขึ้นกับการปรับตั้งรีเลย์



รูปที่ 3.17 การต่อรีเลย์ CT และ VT สำหรับ Ground Fault

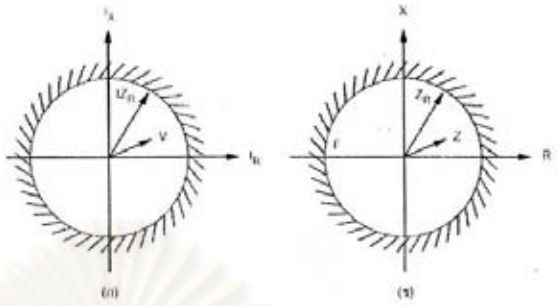
3.2.3 ลักษณะสมบัติของ Distance Relay แบบต่างๆ

Distance Relay เป็นกลุ่มของ Relay ซึ่งมีหลายชนิดด้วยกันโดยแต่ละชนิดจะถูกเรียกชื่อตามคุณสมบัติบน R-X Diagram เช่น อิมพีแดนซ์และรีแอกแตนซ์รีเลย์

3.2.3.1 อิมพีแดนซ์รีเลย์ (Impedance Relay)

ลักษณะสมบัติแบบ Impedance สร้างได้โดยใช้อุปกรณ์เปรียบเทียบโดยใช้ขนาด (Amplitude Comparator) ซึ่งจะเปรียบเทียบขนาดของแรงดัน V กับขนาดของกระแส I คูณอิมพีแดนซ์เทียม Z_R (Replica Impedance) รีเลย์จะทำงานเพื่อ V< Z_R ดังรูปที่ 3.18 (ก) หรืออาจมองได้ว่าเป็นการเปรียบเทียบขนาดของ V/I = Z_F กับ Z_R นั่นคือ รีเลย์จะทำงานเมื่อ $Z_F < Z_R$ ดังรูปที่ 3.18

(ข) Z_R ก็คือค่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้งไว้(Impedance Setting) ถ้าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่านี้ รีเลย์ก็จะส่งสัญญาณTrip



รูปที่ 3.18 แสดงลักษณะสมบัติแบบ Impedance โดยการเปรียบเทียบขนาด

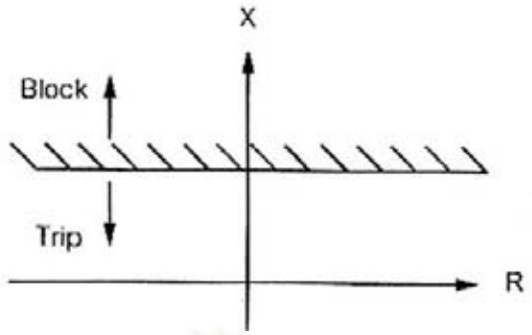
ข้อเสียของ Impedance Relay คือ

1. รีเลย์แบบนี้ ไม่มีทิศทาง จะเห็นการลัดวงจรทั้งที่อยู่ข้างหน้า และข้างหลังจุดที่ติดตั้งรีเลย์ จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกับรีเลย์มีทิศทาง ดังจะได้กล่าวถึงต่อไป
2. ถ้าการลัดวงจรมีอาร์กเกิดขึ้น ความต้านทานของอาร์ก(Arc Resistance) จะมีผลมากต่อการทำงานของรีเลย์
3. เมื่อมีการแกว่งของระบบ (Power Swing) ซึ่งไม่ใช่การลัดวงจรภายใน Zone of Protection เหตุการณ์เช่นนี้ จะมีผลต่อImpedance Relay มาก เพราะ Zone กินบริเวณกว้าง (วงกลมของลักษณะการทำงาน) รีเลย์อาจจะทำงานโดยที่ไม่ควรทำ เพราะระบบอาจจะคืนสู่สภาพปกติได้เอง (ระบบมีเสถียรภาพ)

อิมพีแดนซ์รีเลย์เหมาะสำหรับใช้ป้องกันการลัดวงจรระหว่างเฟสของสายที่มีความยาวปานกลาง มากกว่าสายระยะสั้น หรือสายที่ยาวมาก

3.2.3.2 **รีแอกแตนซ์รีเลย์** (Reactance Relay)

คือ Distance Relay ที่ใช้วัดค่ารีแอกแตนซ์อย่างเดียว ดังนั้นเส้นลักษณะสมบัติบน R-X Diagram จะเป็นเส้นตรงขนานกับแกน R ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ลักษณะสมบัติแบบรีแอกแตนซ์บน R-X Diagram

ข้อดีของ Reactance Relay คือ

1. ความต้านทานอาร์กไม่มีผลต่อรีเลย์แบบนี้ เลย จึงใช้ป้องกันสายส่งระยะสั้ น ซึ่งใช้เสาไม้ได้ดี

ข้อเสียของ Reactance Relay คือ

1. เมื่อความต้านทานของการลัดวงจรมีค่าสูงมากจนทำให้กระแสลัดวงจร และกระแสโหลดมีค่าใกล้เคียงกันตำแหน่งที่รีเลย์มองเห็น (Reach) จะถูกเปลี่ยนไป ค่ากระแสโหลด และตัวประกอบกำลัง และจะทำให้รีเลย์มองเห็นไกลไป (Overreach) หรือมองเห็นใกล้ไปได้ (Underreach) ได้
2. ในกรณีที่มีกระแสลัดวงจรไหลเข้าจากปลายสายทั้ งสองข้าง จากสายที่มีค่า X/R ต่างกัน จะทำให้รีเลย์ที่ปลายสายข้างหนึ่งมองเห็นไกลไป แต่อีกตัวหนึ่งซึ่งอยู่ปลายสายอีกข้างหนึ่งจะมองเห็นใกล้ไป เนื่องจากกระแสรวมที่ไหลลงความต้านทานของการลัดวงจรจะมีมุมนำหน้ากระแสที่ปลายข้างหนึ่ง และมีมุมตามกระแสที่ปลายอีกข้างหนึ่ง
3. Reactance Relay ที่ติดตั้ งอยู่ในบางตำแหน่งของสายส่ง จะมีแนวโน้มที่จะทำงานอย่างผิดพลาดได้ง่ายเมื่อมี Synchronizing Power Surge นอกเสียจากจะมีรีเลย์ที่ช่วยป้องกันการทำงานของรีเลย์นี้

3.2.4 การแบ่งโซนป้องกันของรีเลย์ระยะทาง

ตามปกติการป้องกันสายส่งด้วยรีเลย์ระยะทางจะแบ่งโซนป้องกันออกเป็น3 ส่วน เพื่อให้ป้องกันสายส่งได้ตลอดทั้ งสายและเป็นรีเลย์ป้องกันสำรองสำหรับส่งช่วงถัดไป

การแบ่งโซนป้องกันอาจทำได้ดังนี้

โซน 1

- กำหนดอิมพีแดนซ์ที่ระยะความยาว 85-90% ของความยาวสายส่งที่จะป้องกัน

$$Z_{\text{Pick up Zone1}} = (0.85\text{-}0.9) \times Z_{L1} \qquad (3.15)$$

โดย $Z_{\text{Pick up Zone1}}$ = ค่าอิมพีแดนซ์ Pick up สำหรับการป้องกันโซน 1

Z_{L1} = ค่าอิมพีแดนซ์สายส่งเส้นที่ทำการป้องกัน

- การที่ไม่ตั้งอิมพีแดนซ์ Pick up สำหรับการป้องกันโซน 1 เป็น 100% ก็เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์Overreach
- ทำงานทันทีที่มีการลัดวงจรเกิดขึ้นภายในโซน

โซน 2

- กำหนดอิมพีแดนซ์อยู่ในช่วง 120-150% ของความยาวสายส่งที่จะป้องกัน

$$Z_{\text{Pick up Zone2}} = (1.2\text{-}1.5) \times Z_{L1} \qquad (3.16)$$

โดย $Z_{\text{Pick up Zone2}}$ = ค่าอิมพีแดนซ์ Pick up สำหรับการป้องกันโซน 2

Z_{L1} = ค่าอิมพีแดนซ์สายส่งเส้นที่ทำการป้องกัน

- ทำงานเป็นรีเลย์ป้องกันสำรองให้กับรีเลย์โซน 1 โดยหน่วงเวลาการทำงานไว้ 0.3 วินาที

โซน 3

- กำหนดอิมพีแดนซ์ไปถึง 150% ของความยาวสายส่งเส้นที่ยาวที่สุดเส้นถัดไป

$$Z_{\text{Pick up Zone3}} = (1.2\text{-}1.5) \times Z_{L1} \qquad (3.17)$$

โดย $Z_{\text{Pick up Zone3}}$ = ค่าอิมพีแดนซ์ Pick up สำหรับการป้องกันโซน 2

Z_{L1} = ค่าอิมพีแดนซ์สายส่งเส้นที่ทำการป้องกัน

Z_{L} = ค่าอิมพีแดนซ์สายส่งเส้นที่ยาวที่สุดถัดจากสายส่งเส้นที่ทำการป้องกัน

- ทำงานเป็นรีเลย์ป้องกันสำรองให้กับรีเลย์โซน 1 และรีเลย์โซนที่ 2 โดยตั้งเวลาหน่วงการทำงานไว้ที่ 1.0 วินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 รีเลย์ผลต่าง (Differential Relay) [1]

รีเลย์ผลต่างเป็นรีเลย์ที่มีความไวมากที่สุด สามารถตรวจจับกระแสผิดพร่องได้ แม้จะมีขนาดเล็ก รีเลย์ประเภทนี้ ใช้ในการป้องกันการผิดพร่องภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า การทำงานของรีเลย์ผลต่างจะใช้หม้อแปลงกระแส (Current Transformer) ต่อที่ด้านหน้าและด้านหลังของอุปกรณ์ไฟฟ้าในสภาวะปกติจะไม่เกิดกระแสผลต่าง แต่ถ้าเกิดความผิดพร่องภายในเขตป้องกันจะเกิดกระแสผลต่างขึ้น การตั้งค่า Pick up ของกระแสผลต่างสามารถตั้งค่าต่ำ ๆ ได้ ทำให้รีเลย์ประเภทนี้ มีความไวสูง

3.3.1 ประเภทของรีเลย์ผลต่าง

รีเลย์ผลต่างแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ Overcurrent Differential Relay กับ Percentage Differential Relay

3.3.1.1 Overcurrent Differential Relay

เป็นรีเลย์ผลต่างชนิดที่ง่ายและราคาถูกที่สุด รีเลย์จะทำงานเมื่อมีผลต่างของกระแสจากหม้อแปลงกระแสด้านหน้าและด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันเกินปริมาณกระแสที่ตั้งไว้

ปัญหาของรีเลย์ชนิดนี้ คือ ค่า Pick up ที่ตั้งไว้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ค่านี้จะต้องมีค่ามากกว่าค่ากระแสผลต่างที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ เช่น ความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้านทำให้เกิดกระแสต่างขึ้นแม้ว่าจะเกิดการลัดวงจรนอกเขตป้องกัน แต่การตั้งค่า Pick up สูงก็เป็นการลดความไวของรีเลย์ลง ทางแก้ปัญหานี้ คือการใช้ Percentage Differential Relay

3.3.1.2 Percentage Differential Relay

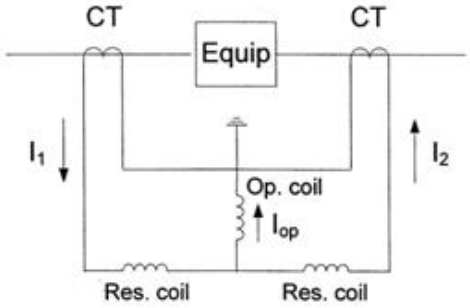
รีเลย์ชนิดนี้ ประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด คือ ขดลวดทำงาน (Operating Coil หรือ Op.Coil) และขดลวดต้านการทำงาน (Restraining Coil หรือ Res Coil) ดังรูปที่ 2.21

กระแสที่ผ่านขดลวดทำงาน (I_{op}) หาตามสมการ (3.19)

$$I_{op} = I_2 - I_1 \tag{3.19}$$

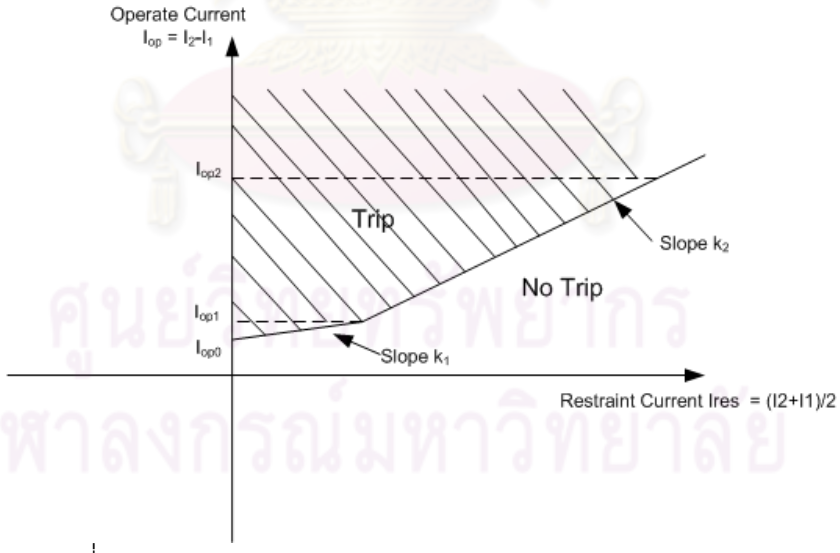
กระแสที่ผ่านขดลวดต้านการทำงาน (I_{res}) หาตามสมการ (3.20)

$$I_{res} = \frac{I_1 + I_2}{2} \tag{3.20}$$



รูปที่ 2.21 Percentage Differential Relay

ลักษณะเฉพาะของรีเลย์ผลต่างแสดงในรูปที่ 2.22 บริเวณแรเงาคือ บริเวณที่รีเลย์ทำงาน เมื่อเกิดความผิดพร่องนอกเขตป้องกัน $\frac{I_1 + I_2}{2}$ จะมีค่าสูงจากกราฟจะเห็นว่า $I_2 - I_1$ จะมีค่าสูงด้วยรีเลย์จึงมีความไวต่ำกรณีเกิดความผิดพร่องนอกเขตป้องกัน โดยความไวจะช้าหรือเร็วขึ้น นกับความชันที่เลือกใช้กรณีสามารถกำหนดได้ 2 ค่าความชัน คือ k_1 และ k_2 ค่า I_{op2} เป็นค่ากระแสผลต่างสูงสุด ถ้าผลต่างกระแสเกินค่านี้ รีเลย์ทำงานทันที I_{op1} เป็น Break Point ระหว่างความชัน k_1 และ k_2 ค่า I_{op0} เป็นค่ากระแสผลต่างที่ยอมรับได้ ถ้าผลต่างกระแสมีค่าน้อยกว่าค่านี้ รีเลย์ไม่ทำงานไม่ว่าค่าI_{res} จะมีค่าเท่าไรก็ตาม



รูปที่ 2.22 ลักษณะสมบัติของ Percentage Differential Relay [5]

3.3.2 การป้องกันแบบผลต่างสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า

ใช้กับหม้อแปลงขนาดตั้ งแต่5MVA ขึ้ นไป การป้องกันแบบวัดผลต่างที่นิยมใช้มากที่สุดคือ การป้องกันแบบทำงานโดยระบบกระแสไหลวน (Circulating Current System) การ

ป้องกันแบบวัดผลต่างที่ใช้กับหม้อแปลงมีความแตกต่างจากการป้องกันสายส่ง การป้องกันหม้อแปลงมีข้อควรพิจารณาต่าง ๆ ดังนี้

1. กระแสพุ่งเข้า

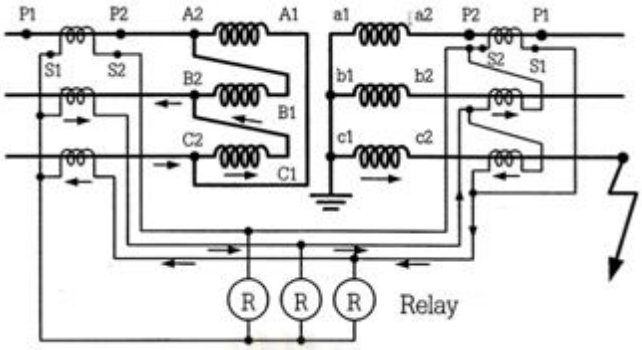
ในขณะที่สับสวิทซ์จ่ายไฟให้กับหม้อแปลงจะมีกระแสพุ่งเข้าซึ่งอาจจะมีขนาดค่ายอดสูงถึง 8 เท่าของกระแสพิกัดของหม้อแปลง กระแสพุ่งเข้าจะถูกเห็นโดย CT ที่ต่อทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเท่านั้น ดังนั้นขณะที่สับสวิทซ์จ่ายไฟให้กับหม้อแปลงระบบป้องกันแบบวัดค่าผลต่างจะเข้าใจว่าเกิดการลัดวงจรขึ้นและรีเลย์จะทำงานทั้ง ๆ ที่เป็นสภาวะปกติ วิธีการแก้ปัญหาเกี่ยวกับกระแสพุ่งเข้านี้ ทำได้โดยใช้วิธีลดขนาดของกระแสพุ่งเข้าเช่น ต่อความต้านทานอนุกรมกับวงจรหรือใช้วิธีสับสวิทซ์จ่ายไฟให้กับหม้อแปลงโดยขั้นแรกจ่ายแรงดันเพียงครึ่งเดียวก่อนแล้วค่อยจ่ายแรงดันเต็มพิกัดในขั้นที่สองหรืออาจจะต่อตัวเก็บประจุขนานกับขดลวดของหม้อแปลงทำให้เมื่อสับสวิทซ์ปลดหม้อแปลงออก วงจรนี้จะกำจัดอำนาจแม่เหล็กค้างในหม้อแปลงออกไปหรือไม่ก็ใช้วงจร Harmonic Restraint ซึ่งมีการทำงานโดยนำฮาร์มอนิกต่าง ๆ ของกระแสพุ่งเข้ามาใช้เป็นสัญญาณในการยับยั้งการทำงานของรีเลย์ให้เหลือแต่ส่วนที่เป็นความถี่มูลฐานเท่านั้นที่ผ่านไปได้ทำให้รีเลย์แบบวัดค่าผลต่างนี้ ไม่ทำงานผิดพลาดขณะเกิดกระแสพุ่งเข้า

2. อัตราส่วนการแปลง

ในการใช้งานรีเลย์แบบวัดค่าผลต่างขนาดกระแสด้านปฐมภูมิของ CT ทั้งสองมีค่าแตกต่างกัน CT ที่ใช้จึงต้องมีการเลือกอัตราส่วนการแปลงที่ถูกต้อง

3. การเลื่อนเฟส (Phase shift)

หม้อแปลงที่มีการต่อของขดลวดปฐมภูมิ กับ ทุติยภูมิ แตกต่าง เช่น $Y-\Delta$ หรือ $\Delta-Y$ จะมีเฟสของกระแสต่างกันเป็นมุม 30 องศา การป้องกันระบบกระแสไหลวนจะทำงานได้ถูกต้องก็ต่อเมื่อมีการชดเชยการเลื่อนเฟสนี้ กฎทั่วไปคือ สำหรับด้านของหม้อแปลงที่มีขดลวดต้อแบบ Y หม้อแปลงกระแสควรต่อแบบ Δ และด้านที่ขดลวดต่อแบบ Δ หม้อแปลงกระแสควรต่อแบบ Y ตามกฎนี้ ยังเป็นการชดเชยเพื่อป้องกันไม่ให้รีเลย์ทำงานเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินนอกโซนป้องกันด้วยเพราะขดลวด Δ ของหม้อแปลงเป็นแหล่งกำเนิดกระแส Zero Sequence ในขณะที่ขดลวด Y กระแส Zero Sequence จะมาจากที่จุดต่อลงดินสามารถแสดงการต่อหม้อแปลงกระแสได้ดังรูที่2.23



รูปที่ 2.23 การต่อหม้อแปลงเพื่อชดเชยการเลื่อนเฟส

4. Interposing Current Transformer

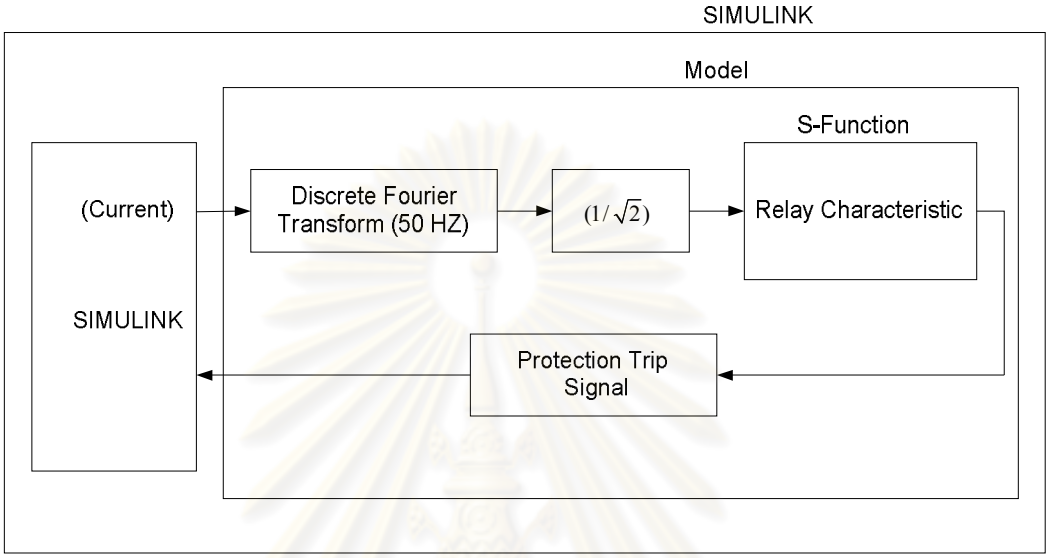
เนื่องจากรีเลย์ผลต่างทำงานโดยการเปรียบเทียบเฟสและขนาดของกระแสที่ได้จาก CT ทั้งสองด้านของหม้อแปลง แต่บ่อยครั้งที่ไม่สามารถหาอัตราส่วนของCT ที่พอดีเพื่อให้ได้กระแสด้านทุติยภูมิที่ผ่าน CT จากทั้งสองด้านของหม้อแปลงมีขนาดเท่ากันพอดีจึงมี Interposing Current Transformer เป็นตัวชดเชยทำให้กระแสทั้งสองด้านที่ออกจากหม้อแปลงมีขนาดใกล้เคียงกันมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การสร้างและการนำแบบจำลองรีเลย์ไปใช้งาน

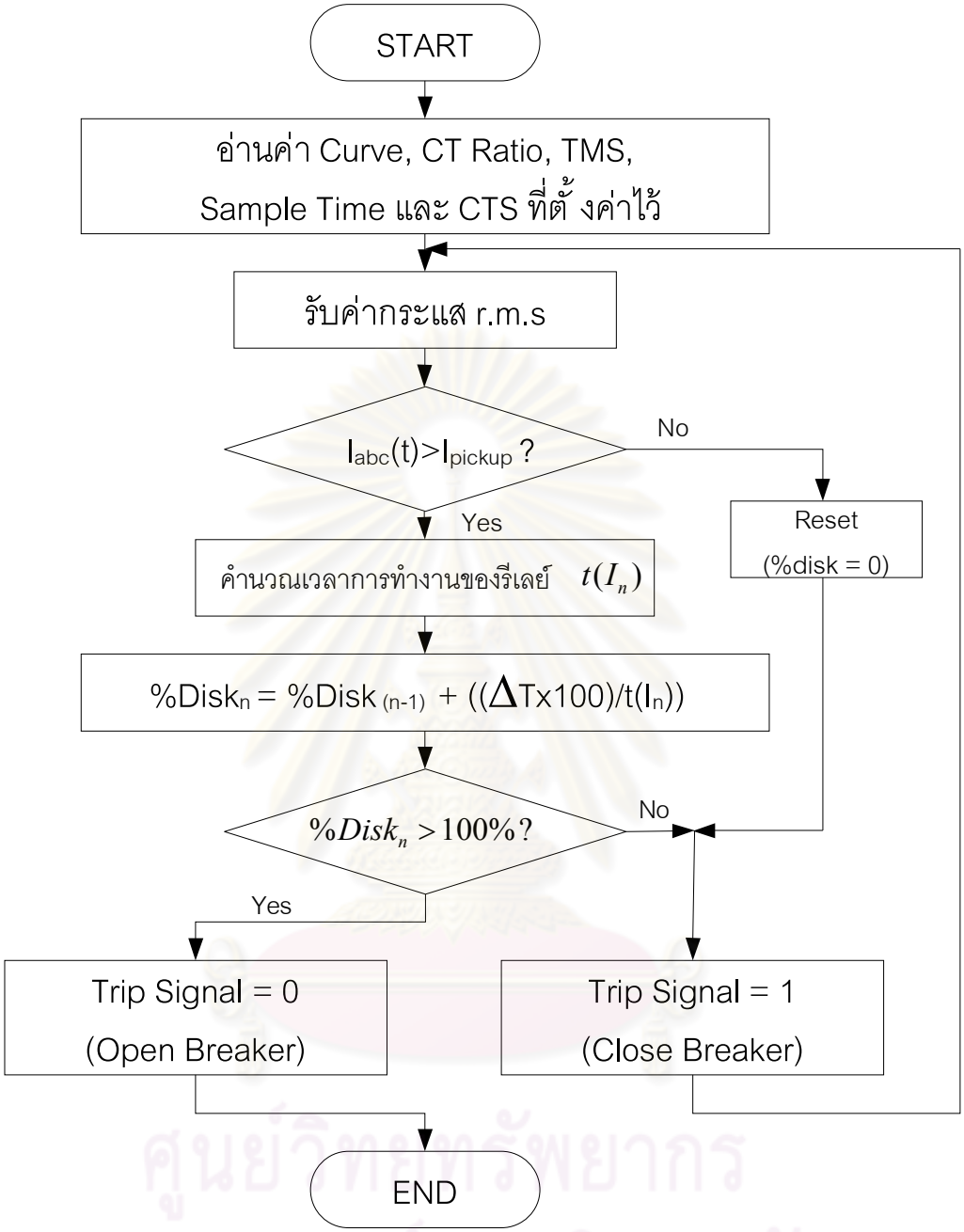
4.1 แบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay Model)



รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน

รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกแสดงหลักการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน เริ่มต้นจากวัดกระแส 3 เฟส (I_{abc}) ณ จุดที่ทำการติดตั้งแบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน จากนั้นกระแสผ่านบล็อก Discrete Fourier Transform ความถี่ 50 เฮิรตซ์ เพื่อหาค่าสัมบูรณ์ค่ายอดของกระแสเฉพาะที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ แล้วแปลงเป็นค่า r.m.s เพื่อเป็นสัญญาณเข้าบล็อก Relay Characteristic หลักการทำงานเป็นดังรูปที่ 4.2 โดยใช้บล็อก S-Function ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สำหรับเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน จากนั้นรีเลย์จะส่งสัญญาณทริป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 แผนภาพการทำงานของบล็อก Relay Characteristic

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพการทำงานของบล็อก Relay Characteristic เริ่มต้นทำการอ่านค่า Curve, TMS, เวลาการสุ่มตัวอย่าง, CTS และ CT Ratio โดยค่า Curve สามารถกำหนดได้ 4 ค่า ดังข้อมูลในตารางที่4.1

ตารางที่ 4.1 ค่า Curve สำหรับแบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน

Curve	1	2	3	4
Characteristic	Standard Inverse	Very Inverse	Extremely Inverse	Long Inverse

หลังจากการอ่าน Curve, TMS, เวลาการสุ่มตัวอย่าง, CTS และ CT Ratio แล้วทำการรับค่ากระแส r.m.s แล้วทำการเปรียบเทียบค่ากระแส r.m.s ว่ามีค่ากระแสมากกว่ากระแส Pick up หรือไม่ ถ้าค่ากระแส r.m.s มีค่าน้อยกว่าค่ากระแส Pick up แสดงว่าระบบทำงานปกติ ทำการรีเซ็ทค่าเปอร์เซ็นต์จานหมุนแล้วส่งสัญญาณ Trip เท่ากับ 1 แล้วกลับไปรับค่ากระแส r.m.s ใหม่ ถ้าค่า r.m.s ของกระแสมีค่ามากกว่าค่า Pick up แสดงว่าระบบเกิดความผิดพร่องขึ้ น หาค่าเวลาการทำงานของรีเลย์จากค่ากระแส r.m.s โดยหลักการหาค่าเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินเป็นดังรูปที่ 4.3 เริ่มต้นโดยทำการเปรียบเทียบว่าค่า Curve เท่ากับ 1 หรือไม่ ถ้า Curve เท่ากับ 1 หมายถึงเลือก ลักษณะเฉพาะแบบ Standard Inverse หาค่าเวลาการทำงานของรีเลย์ t (I) จากสมการ

$$t(I) = \left(\frac{0.14}{M^{0.02} - 1} \right) \times TMS \tag{4.1}$$

ถ้า Curve เท่ากับ 2 หมายถึงเลือก ลักษณะเฉพาะแบบ Very Inverse หาค่าเวลาการทำงานของรีเลย์ t (I) จากสมการ

$$t(I) = \left(\frac{13.5}{M - 1} \right) \times TMS \tag{4.2}$$

ถ้า Curve เท่ากับ 3 หมายถึงเลือก ลักษณะเฉพาะแบบ Extremely Inverse หาค่าเวลาการทำงานของรีเลย์ t (I) จากสมการ

$$t(I) = \left(\frac{80}{M^2 - 1} \right) \times TMS \tag{4.3}$$

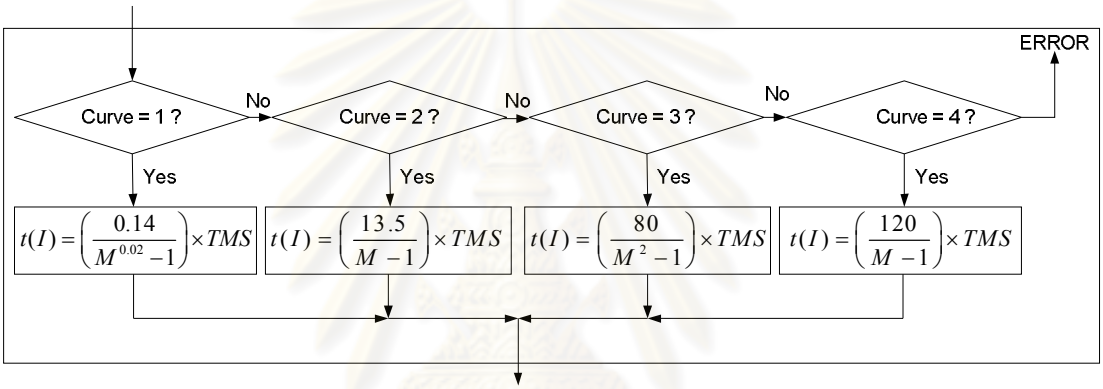
ถ้า Curve เท่ากับ 4 หมายถึงเลือก ลักษณะเฉพาะแบบ Long Inverse หาค่าเวลาการทำงานของรีเลย์ t (I) จากสมการ

$$t(I) = \left(\frac{120}{M-1}\right) \times TMS \tag{4.4}$$

ถ้า Curve ไม่เท่ากับ 1, 2, 3 หรือ 4 โปรแกรมจะแสดงผล Error

โดยที่ M คือ จำนวนเท่าของกระแส Setting (PMS)

TMS คือ Time Multiplier Setting ปรับตั้งได้ตั้งแต่ 0.05-1.00 TMS



รูปที่ 4.3 แผนภาพการหาค่าเวลาการทำงานของรีเลย์

หลังจากคำนวณเวลาการทำงานของรีเลย์แล้ว ทำการคำนวณเปอร์เซ็นต์ของจานหมุน (%Disk) [6] จาก

$$\%Disk_{(n+1)} = \%Disk_n + \left(\frac{\Delta T \times 100}{t(I_n)}\right) \tag{4.5}$$

ΔT = ค่าเวลาในการสุ่มตัวอย่าง

$\%Disk_n$ = ค่าเปอร์เซ็นต์ของจานหมุนณเวลาก่อนหน้าเป็นเวลา ΔT

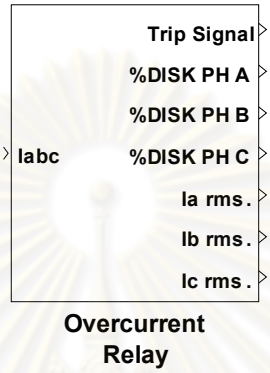
$\%Disk_{(n+1)}$ = ค่าเปอร์เซ็นต์ของจานหมุนใหม่

$t(I_n)$ = เวลาที่รีเลย์จะทำงาน หาจากสมการ (4.1-4.4) ขึ้นกับลักษณะเฉพาะที่เลือก

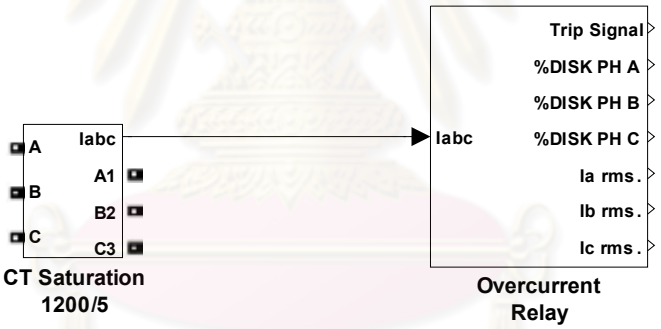
ค่าเปอร์เซ็นต์ของจานหมุนเริ่มจาก 0% ถ้าเปอร์เซ็นต์ของจานหมุนมีค่าน้อยกว่า 100% สัญญาณทริปเท่ากับ 1 (ปิดวงจร) ถ้าเปอร์เซ็นต์จานหมุนมีค่ามากกว่า 100% สัญญาณทริปเท่ากับ 0 เพื่อเปิดวงจรตัดส่วนที่ผิดพร่องออกจากระบบ

4.1.1 การนำแบบจำลองรีเลย์กระแสเกินไปใช้งาน

รูปที่ 4.4 แสดงแบบจำลองรีเลย์กระแสเกินในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สัญญาณเข้าของแบบจำลองคือ กระแสไฟฟ้า 3 เฟสที่ได้จากการจำลองการเกิดการอิ่มตัวจากหม้อแปลงกระแส ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 แบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน



รูปที่ 4.5 การวัดกระแสจาก CT Saturation เพื่อเป็นสัญญาณเข้าให้แบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน

สัญญาณออกขาที่ 1 คือ Trip Signal ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมเซอร์กิตเบรก-เกอร์ถ้าสัญญาณออกเป็น 1 หมายถึงรีเลย์ไม่ทำงานคือเซอร์กิตเบรกเกอร์ปิดวงจร ถ้าสัญญาณออกเป็น 0 หมายถึงรีเลย์ทำงานคือเซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจร

สัญญาณออกขาที่ 2 คือ %Disk PH A เป็นค่ารีเลย์จานหมุนเฟส a หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

สัญญาณออกขาที่ 3 คือ %Disk PH B เป็นค่ารีเลย์จานหมุนเฟส b หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

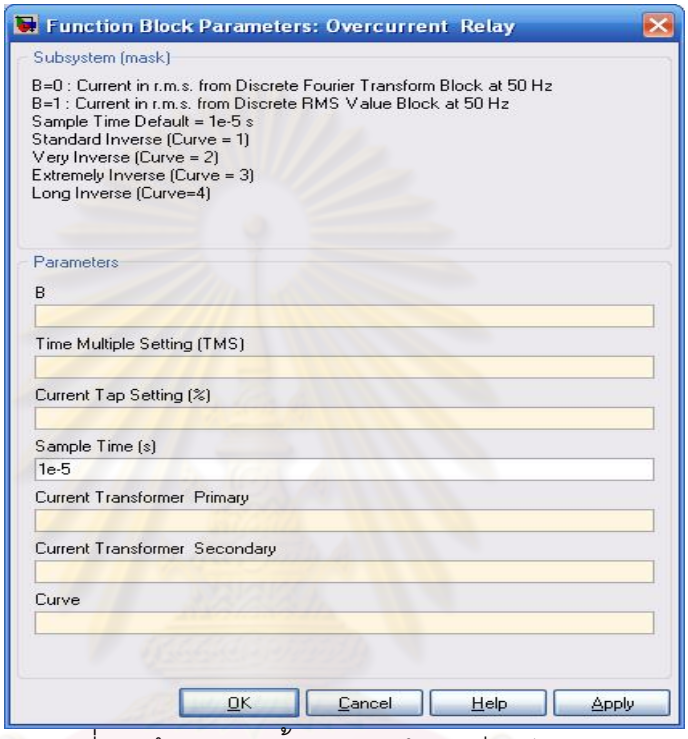
สัญญาณออกขาที่ 4 คือ %Disk PH C เป็นค่ารีเลย์จานหมุนเฟส c หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

สัญญาณออกขาที่ 5 คือ Ia rms เป็นค่า rms ของกระแสเฟส a หน่วยเป็นแอมแปร์

สัญญาณออกขาที่ 6 คือ Ib rms เป็นค่า rms ของกระแสเฟส b หน่วยเป็นแอมแปร์

สัญญาณออกขาที่ 7 คือ Ic rms เป็นค่า rms ของกระแสเฟส c หน่วยเป็นแอมแปร์

เมื่อทำการดับเบิลคลิกแบบจำลองรีเลย์กระแสเกินพื้ นฐานจะเป็นดังรูปที่4.6 ค่าที่ต้องทำการตั้ งให้กับแบบจำลองรีเลย์กระแสเกินมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 ข้อมูลการตั้ งค่าแบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน

1. ค่า Time Multiple Setting หรือค่า TMS

2. ค่า Current Tap Setting หน่วยเป็น %

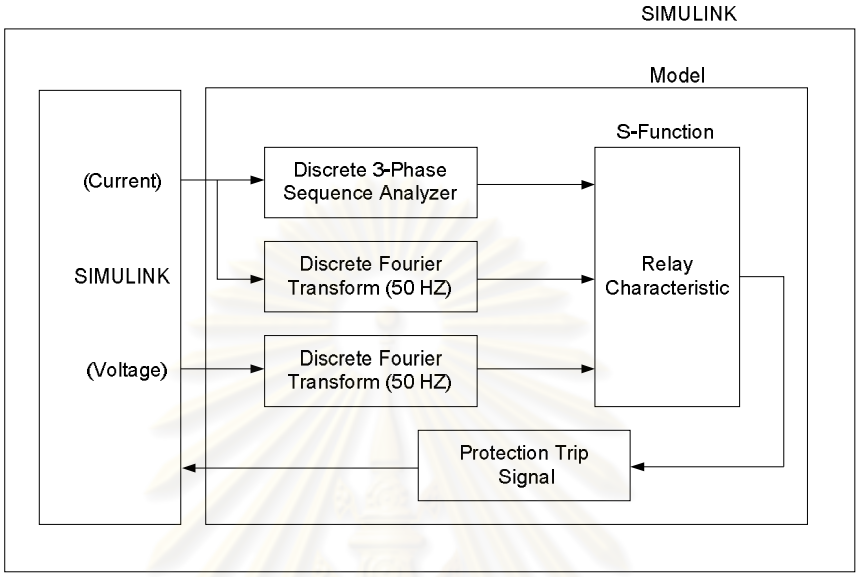
3. ค่า Sample Time ของโปรแกรม หน่วยเป็นวินาที ค่า Default เท่ากับ $1e^{-5}$ วินาที ถ้าต้องการเปลี่ยนต้องทำการแก้ไขค่า Sample Time (TS) ใน M-file ชื่อ Ovcmodel ด้วย

4. ค่า Current Transformer Primary

5. ค่า Current Transformer Secondary

6. ค่า Curve (กรณี Curve เท่ากับ 1 หมายถึง Standard Inverse, กรณี Curve เท่ากับ 2 หมายถึง Very Inverse, กรณี Curve เท่ากับ 3 หมายถึง Extremely Inverse, กรณี Curve เท่ากับ 4 หมายถึง Long Inverse)

4.2 แบบจำลองรีเลย์ระยะทาง (Distance Relay Model)



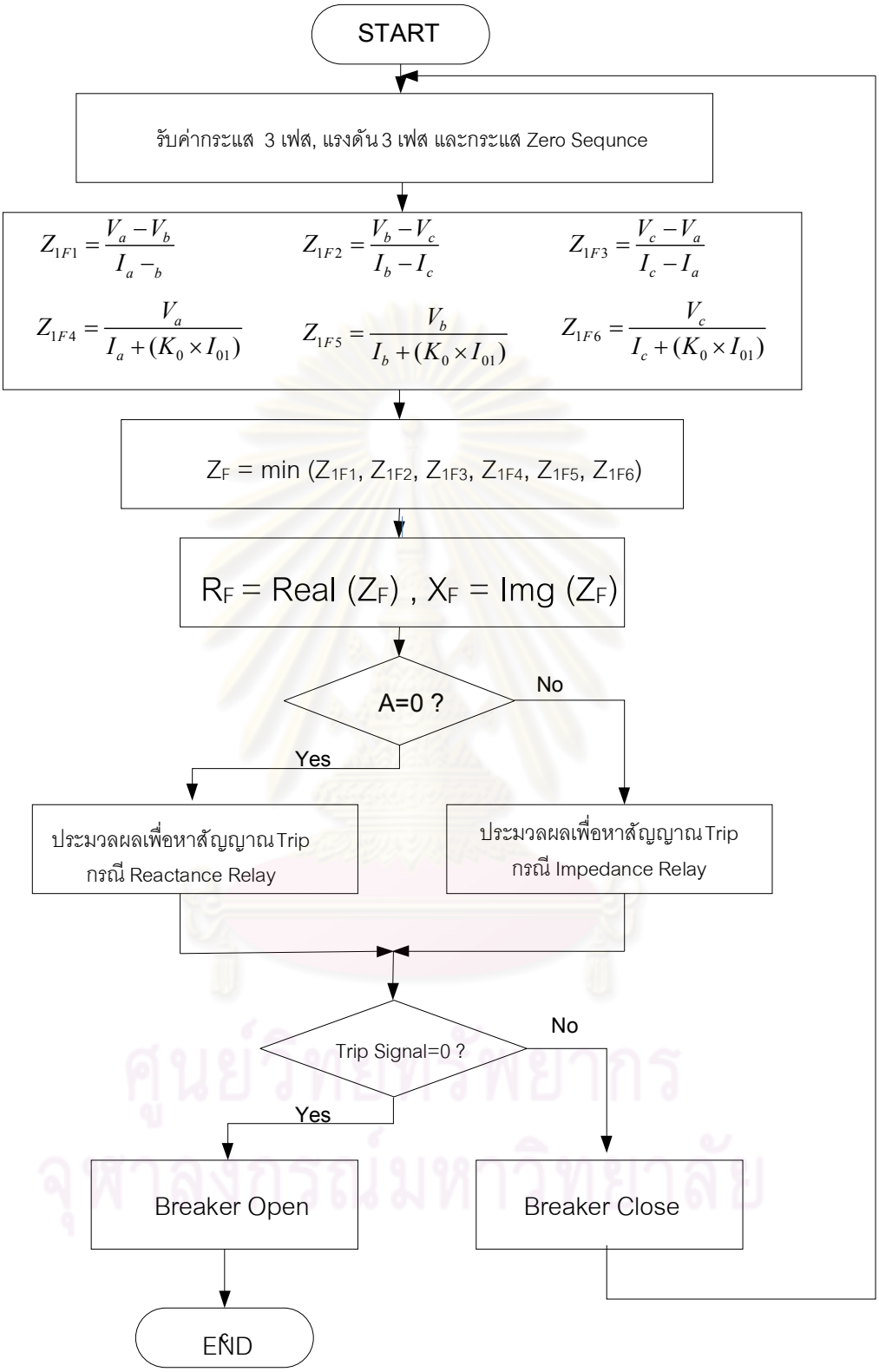
รูปที่ 4.7 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง

รูปที่ 4.7 แสดงแผนภาพบล็อกการทำงานของแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง สัญญาณเข้าแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง คือ แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส และ กระแส 3 เฟส ณ จุดที่ติดตั้งแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง

เริ่มต้นแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส เข้าสู่บล็อก Discrete Fourier Transform (DFT) [7] เพื่อหาขนาดกับมุมของแรงดันทั้ง 3 เฟส แล้วแปลงจากรูปแบบเชิงขั้วเป็นรูปแบบเชิงตั้งฉาก

กระแสไฟฟ้า 3 เฟสเข้าสู่บล็อก DFT เพื่อหาขนาดและมุมของกระแส 3 เฟส แล้วแปลงจากรูปแบบเชิงขั้วเป็นรูปแบบเชิงตั้งฉาก และเข้าสู่บล็อกDiscrete 3-Phase Sequence Analyzer ด้วยเพื่อหาขนาดและมุมของ Zero Sequence Current แล้วแปลงจากรูปแบบเชิงขั้วเป็นรูปแบบเชิงตั้งฉาก

สัญญาณออกจากทั้ง3 บล็อก เข้าสู่ Relay Characteristic ต่อไป โดยบล็อกนี้ ใช้บล็อก S-function ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สำหรับเขียนโปรแกรมการควบคุมการทำงาน หน้าที่ของบล็อก Relay Characteristic คือ ประมวลผลแล้วส่งสัญญาณ Trip ไปควบคุมการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ หลักการทำงานของบล็อก Relay Characteristic เป็นดังรูปที่ 4.8

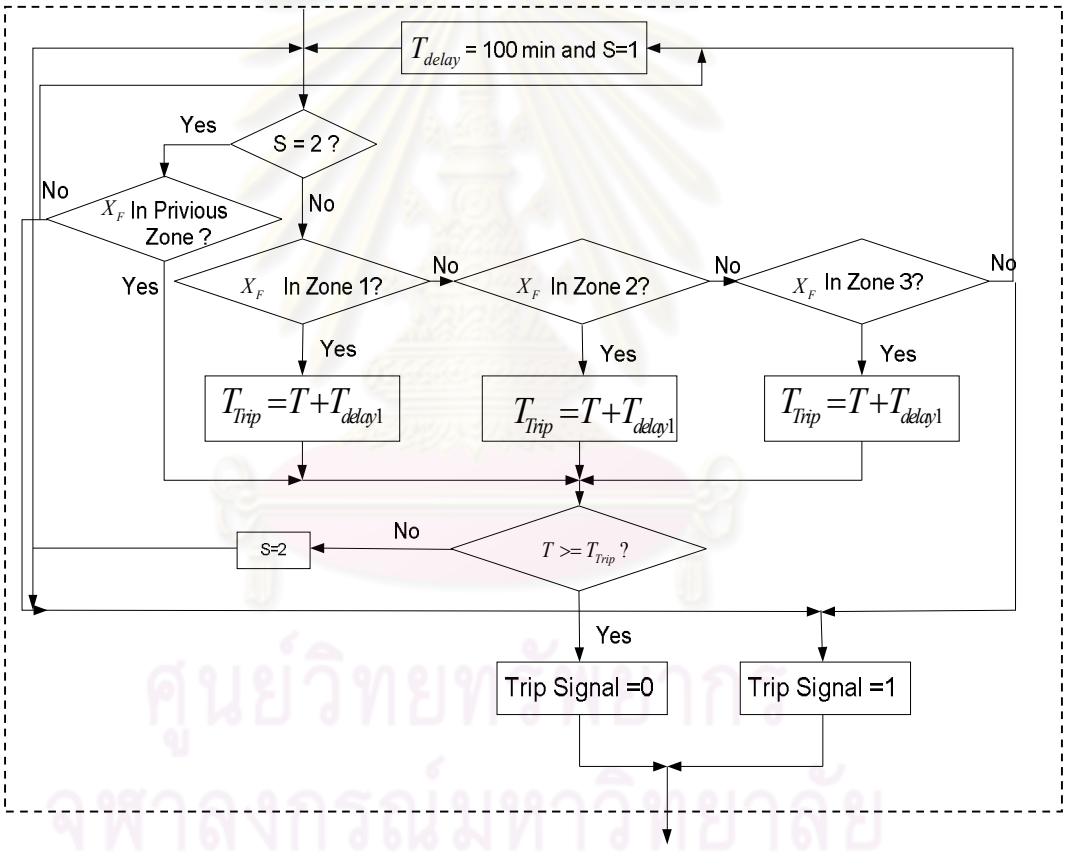


รูปที่ 4.8 แผนภาพบล็อก Relay Characteristic ของรีเลย์ระยะทาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.8 แสดงแผนภาพบล็อก Relay Characteristic เริ่มต้นทำการรับค่ากระแส 3 เฟส, แรงดัน 3 เฟส และค่ากระแส Zero Sequence ในรูปพิกัดเชิงตั้ งฉาก จากนั้ นคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ตามสูตรกรณีเกิดความผิดพร่องทุกแบบ คือ ค่า $Z_{1F1}, Z_{1F2}, Z_{1F3}, Z_{1F4}, Z_{1F5}$ และ Z_{1F6} ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำที่สุดใน 6 ค่า คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ถูกต้อง (Z_F) โดยส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์ คือ ค่าความต้านทาน (R_F) ส่วนจินตภาพของค่าอิมพีแดนซ์ คือ ค่ารีแอกแตนซ์ (X_F)

จากนั้ นพิจารณาว่าค่าa เท่ากับ 0 หรือไม่ ถ้าค่า a เท่ากับ 0 แสดงว่าเลือกลักษณะเฉพาะแบบรีแอกแตนซ์ รีเลย์ทำการประมวลผลหาค่าสัญญาณทริปหลักการทำงานของบล็อกประมวลผลนี้ เป็นไปดังรูปที่4.9



รูปที่ 4.9 แผนภาพบล็อกประมวลผลหาสัญญาณ Trip สำหรับรีแอกแตนซ์รีเลย์

เริ่มต้นทำการเปรียบเทียบค่า S เท่ากับ 2 หรือไม่ โดยค่า S เริ่มต้นโปรแกรมกำหนดเท่ากับ 1 จากนั้ นทำการเปรียบเทียบค่ารีแอกแตนซ์ที่วัดมากับค่าPick up รีแอกแตนซ์ของโซนป้องกันที่ 1 ถ้าค่ารีแอกแตนซ์ที่วัดมาอยู่ในโซนป้องกันที่1 หาค่าเวลาทริป คำนวณจาก

$T_{Trip}=T+T_{Delay1}$

โดย T_{Trip} คือ เวลาที่รีเลย์ทำงาน

T คือ เวลา ณ ขณะนั้ น

T_{Delay1} คือ ค่าหน่วงเวลาที่กำหนดสำหรับกรณีเกิดความผิดพร่องภายในโซน 1

กรณีค่ารีแอกแตนซ์ที่วัดมาอยู่ในโซนป้องกันที่2 คำนวณค่าเวลาที่รีเลย์ทำงาน จาก

$T_{Trip}=T+T_{Delay2}$

โดย T_{Trip} คือ เวลาที่รีเลย์ทำงาน

T คือ เวลา ณ ขณะนั้ น

T_{Delay2} คือ ค่าหน่วงเวลาที่กำหนดสำหรับกรณีเกิดความผิดพร่องภายในโซน 2

กรณีค่ารีแอกแตนซ์ที่วัดมาอยู่ในโซนป้องกันที่3 คำนวณค่าเวลาที่รีเลย์ทำงาน จาก

$T_{Trip}=T+T_{Delay3}$

โดย T_{Trip} คือ เวลาที่รีเลย์ทำงาน

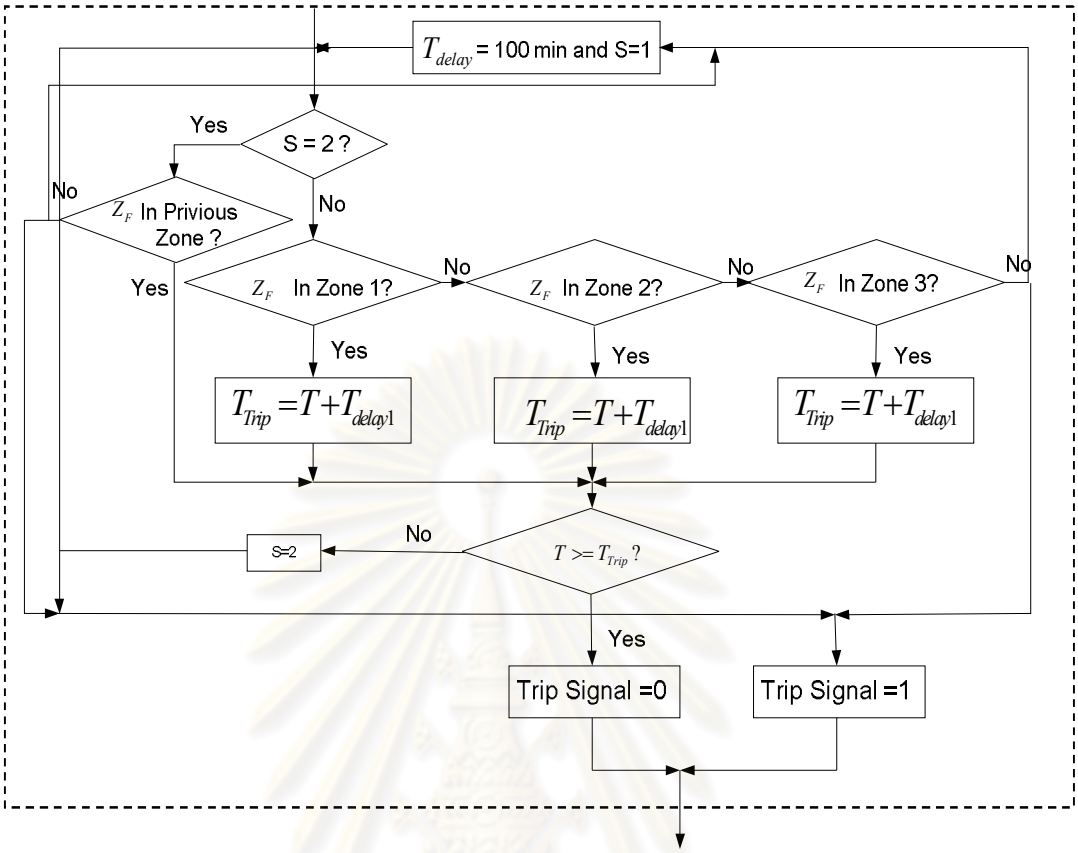
T คือ เวลา ณ ขณะนั้ น

T_{Delay3} คือ ค่าหน่วงเวลาที่กำหนดสำหรับกรณีเกิดความผิดพร่องภายในโซน 3

กรณีค่ารีแอกแตนซ์ที่คำนวณมามีค่ามากกว่าค่า Pick up รีแอกแตนซ์โซนป้องกันที่ 3 กำหนดสัญญาณทริปเท่ากับ 1 (ปิดวงจร) ตั้ งค่าS เท่ากับ 1 และ T_{Delay} เท่ากับ 100 นาทีค่านี้กำหนดไว้ให้มีค่ามาก ๆ เพื่อไม่ให้รีเลย์ทำงาน ในที่นี้ กำหนดไว้ที่100 นาที เนื่องจากการทำงานของรีเลย์เพื่อดูการทำงานของรีเลย์ใช้เวลาไม่นานซึ่งไม่ถึง100 นาทีอยู่แล้ว

กรณีค่ารีแอกแตยซ์ที่วัดมาอยู่ในโซนป้องกันจะทำการเปรียบเทียบเวลา ณ ขณะนั้ น(T) ว่ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ T_{Trip} หรือไม่ ถ้ามีค่ามากกว่าสัญญาณทริปเท่ากับ 0 ถ้าเวลา ณ ขณะนั้ น(T) มีค่าน้อยกว่า T_{Trip} สัญญาณทริปจะมีค่าเท่ากับ 1 และ S เท่ากับ 2

กรณีค่า a เท่ากับ 1 แสดงว่าเลือกลักษณะเฉพาะแบบอิมพีแดนซ์ รีเลย์ทำการประมวลผลหาค่าสัญญาณทริปหลักการทำงานของบล็อกประมวลผลนี้ เป็นไปดังรูปที่4.10



รูปที่ 4.10 แผนภาพบล็อกประมวลผลหาสัญญาณ Trip สำหรับอิมพีแดนซ์รีเลย์

เริ่มต้นทำการเปรียบเทียบค่า S เท่ากับ 2 หรือไม่ โดยค่า S เริ่มต้นโปรแกรมกำหนดเท่ากับ 1 จากนั้ นทำการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ ที่วัดมากับค่าPick up อิมพีแดนซ์ ของโซนป้องกันที่ 1 ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ ที่วัดมาอยู่ในโซนป้องกันที่ 1 หาค่าเวลาทริป คำนวณจาก

$$T_{Trip}=T+T_{Delay1}$$

โดย T_{Trip} คือ เวลาที่รีเลย์ทำงาน

T คือ เวลา ณ ขณะนั้ น

T_{Delay1} คือ ค่าหน่วงเวลาที่กำหนดสำหรับกรณีเกิดความผิดพร่องภายในโซน 1

กรณีค่าอิมพีแดนซ์ ที่วัดมาอยู่ในโซนป้องกันที่ 2 คำนวณค่าเวลาที่รีเลย์ทำงาน จาก

$$T_{Trip}=T+T_{Delay2}$$

โดย T_{Trip} คือ เวลาที่รีเลย์ทำงาน

T คือ เวลา ณ ขณะนั้ น

T_{Delay2} คือ ค่าหน่วงเวลาที่กำหนดสำหรับกรณีเกิดความผิดพร่องภายในโซน 2

กรณีค่าอิมพีแดนซ์ ที่วัดมาอยู่ในโซนป้องกันที่ 3 คำนวณค่าเวลาที่รีเลย์ทำงาน จาก

$$T_{Trip}=T+T_{Delay3}$$

โดย T_{Trip} คือ เวลาที่รีเลย์ทำงาน

T คือ เวลา ณ ขณะนั้ น

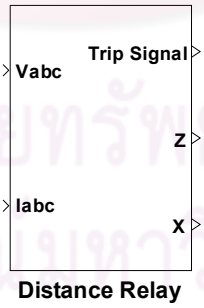
T_{Delay3} คือ ค่าหน่วงเวลาที่กำหนดสำหรับกรณีเกิดความผิดพร่องภายในโซน 3

กรณีค่าอิมพีแดนซ์ ที่คำนวณมามีค่ามากกว่าค่า Pick up อิมพีแดนซ์ โซนป้องกันที่ 3 กำหนดสัญญาณทริปเท่ากับ 1 (ปิดวงจร) ตั้ งค่าS เท่ากับ 1 และ T_{Delay} เท่ากับ 100 นาทีค่านี้ กำหนดไว้ให้มีค่ามาก ๆ เพื่อไม่ให้รีเลย์ทำงาน ในที่นี้ กำหนดไว้ที่100 นาที เนื่องจากการทำงานของรีเลย์เพื่อดูการทำงานของรีเลย์ใช้เวลาไม่นานซึ่งไม่ถึง 100 นาทีอยู่แล้ว

กรณีค่าอิมพีแดนซ์ ที่วัดมาอยู่ในโซนป้องกันจะทำการเปรียบเทียบเวลา ณ ขณะนั้ น(T) ว่ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ T_{Trip} หรือไม่ ถ้ามีค่ามากกว่าสัญญาณทริปเท่ากับ 0 ถ้าเวลา ณ ขณะนั้ น(T) มีค่าน้อยกว่า T_{Trip} สัญญาณทริปจะมีค่าเท่ากับ 1 และ S เท่ากับ 2

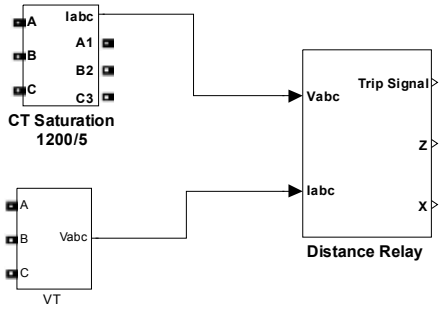
4.2.1 การนำแบบจำลองรีเลย์ระยะทางไปใช้งาน

รูปที่ 4.11 แสดงแบบจำลองรีเลย์ระยะทางในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สัญญาณเข้าคือ กระแส 3 เฟส (I_{abc}) และแรงดัน 3 เฟส (V_{abc}) ณ ตำแหน่งที่ติดตั้ งแบบจำลองรีเลย์ระยะทางโดยวัดจากการจำลองการเกิดการอิ่มตัวจากหม้อแปลงกระแสและจากหม้อแปลงแรงดัน ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 แบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 การวัดกระแสและแรงดันเพื่อเป็นสัญญาณข้าให้กับแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง

สัญญาณออกขาที่ 1 คือ Trip Signal ซึ่งเป็นสัญญาณที่ส่งไปควบคุมเซอร์กิตเบรกเกอร์ ถ้าสัญญาณออกเป็น 1 หมายถึงรีเลย์ไม่ทำงานหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ปิดวงจร ถ้าสัญญาณออกเป็น 0 หมายถึงรีเลย์ทำงานหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจร

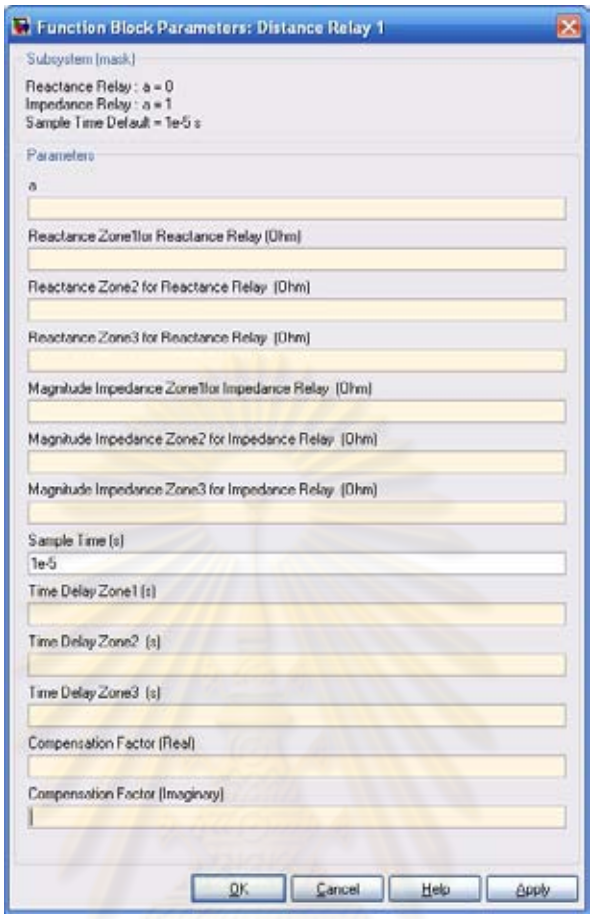
สัญญาณออกขาที่ 2 คือ Z เป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่แบบจำลองรีเลย์ระยะทางอ่านค่าได้หน่วยเป็นโอห์ม

เมื่อทำการดับเบิลคลิกแบบจำลองรีเลย์จะเป็นดังรูปที่ 4.13 ค่าที่ต้องทำการตั้งให้กับแบบจำลองรีเลย์ระยะทางมี 13 ค่า คือ

1. ค่า a ถ้าค่า a เท่ากับ 0 หมายถึงเลือกลักษณะเฉพาะแบบรีแอกแตนซ์รีเลย์ ถ้าค่า a เท่ากับ 1 หมายถึงเลือกลักษณะเฉพาะแบบอิมพีแดนซ์รีเลย์
2. ค่า Pick up Reactance Relay Zone 1 for Reactance Relay เป็นค่า Pick up ของรีแอกแตนซ์โซนป้องกันที่ 1 ถ้าค่ารีแอกแตนซ์ที่อ่านได้มีค่าต่ำกว่าค่าPick up นี้ แสดงว่าเกิดความผิดพร่องภายในโซนป้องกันที่ 1
3. ค่า Pick up Reactance Relay Zone 2 for Reactance Relay เป็นค่า Pick up ของรีแอกแตนซ์โซนป้องกันที่ 2 ถ้าค่ารีแอกแตนซ์ที่อ่านได้มีค่าต่ำกว่าค่า Pick up นี้ และมีค่ามากกว่าค่า Pick up ของรีแอกแตนซ์โซนป้องกันที่ 1 แสดงว่าเกิดความผิดพร่องภายในโซนป้องกันที่ 2
4. ค่า Pick up Reactance Relay Zone 3 for Reactance Relay เป็นค่า Pick up ของรีแอกแตนซ์โซนป้องกันที่ 3 ถ้าค่ารีแอกแตนซ์ที่อ่านได้มีค่าต่ำกว่าค่า Pick up นี้ และมีค่ามากกว่าค่า Pick up ของรีแอกแตนซ์โซนป้องกันที่ 2 แสดงว่าเกิดความผิดพร่องภายในโซนป้องกันที่ 3
5. ค่า Pick up Impedance Relay Zone 1 for Impedance Relay เป็นค่า Pick up ของอิมพีแดนซ์โซนป้องกันที่ 1 ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ที่อ่านได้มีค่าต่ำกว่าค่า Pick up นี้ แสดงว่าเกิดความผิดพร่องภายในโซนป้องกันที่ 1

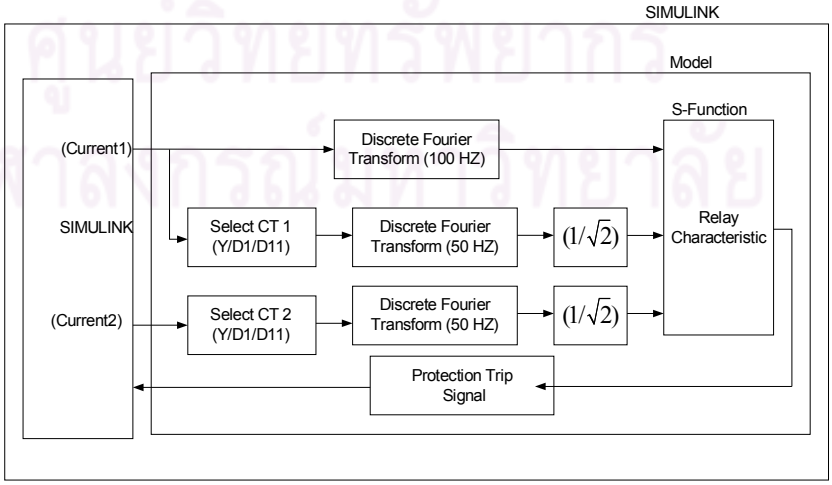
6. ค่า Pick up Impedance Relay Zone 2 for Impedance Relay เป็นค่า Pick up ของอิมพีแดนซ์โซนป้องกันที่ 2 ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ที่อ่านได้มีค่าต่ำกว่าค่า Pick up นี้ และมีค่ามากกว่าค่า Pick up ของอิมพีแดนซ์โซนป้องกันที่ 1 แสดงว่าเกิดความผิดพร่องภายในโซนป้องกันที่ 2
7. ค่า Pick up Impedance Relay Zone 3 for Impedance Relay เป็นค่า Pick up ของอิมพีแดนซ์โซนป้องกันที่ 3 ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ที่อ่านได้มีค่าต่ำกว่าค่า Pick up นี้ และมีค่ามากกว่าค่า Pick up ของอิมพีแดนซ์โซนป้องกันที่ 2 แสดงว่าเกิดความผิดพร่องภายในโซนป้องกันที่ 3
8. ค่า Sample Time ค่า Default เท่ากับ 1e-5 วินาที ถ้าต้องการเปลี่ยนต้องทำการแก้ไขค่า Sample Time (TS) ใน M-file ชื่อ Distance model ด้วย
9. ค่าTime Delay Zone 1 เป็นค่าเวลาที่รีเลย์จะทำงานหลังตรวจพบความผิดปกติภายในโซนป้องกันที่ 1
10. ค่าTime Delay Zone 2 เป็นค่าเวลาที่รีเลย์จะทำงานหลังตรวจพบความผิดปกติภายในโซนป้องกันที่ 2
11. ค่าTime Delay Zone 3 เป็นค่าเวลาที่รีเลย์จะทำงานหลังตรวจพบความผิดปกติภายในโซนป้องกันที่ 3
12. ค่า Compensate Factor (Real) เป็นส่วนจริงของค่าแฟกเตอร์ชดเชยในกรณีเกิดความผิดพร่องแบบเฟสลงดิน
13. ค่า Compensate Factor (Imaginary) เป็นส่วนจินตภาพของค่าแฟกเตอร์ชดเชยในกรณีเกิดความผิดพร่องแบบเฟสลงดิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 ข้อมูลการตั้ งค่าแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง

4.3 แบบจำลองรีเลย์ผลต่าง (Differential Relay Model)



รูปที่ 4.14 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองรีเลย์ผลต่าง

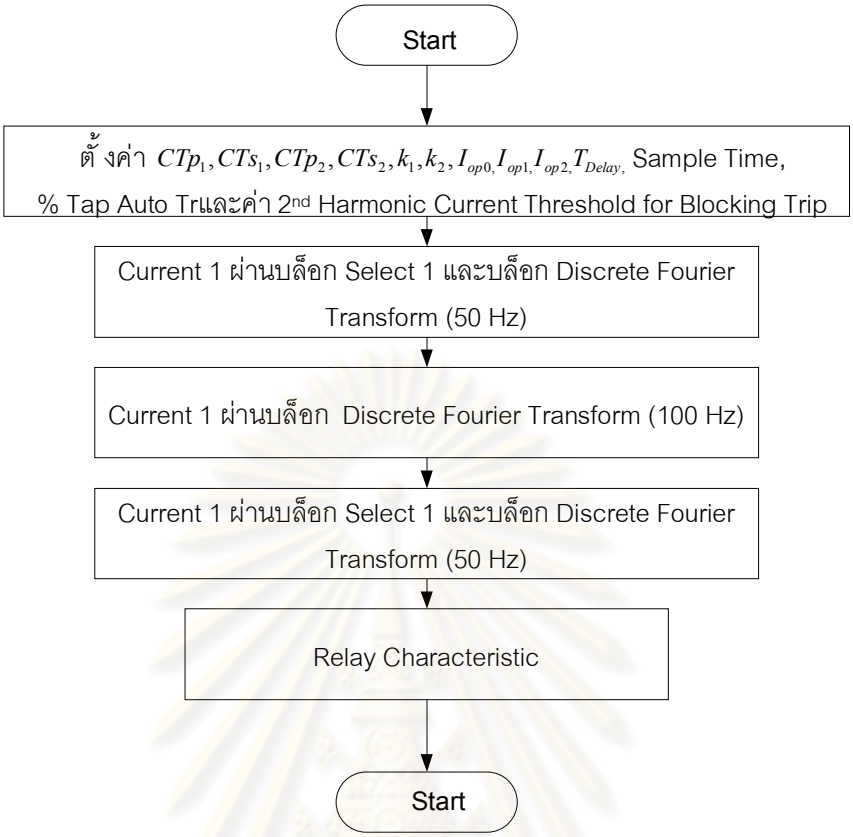
รูปที่ 4.14 แสดงแผนภาพบล็อกการทำงานของรีเลย์ผลต่าง เริ่มต้นจากการวัดกระแสหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน (Current 1) และกระแสหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน(Current 2)

จากนั้ นกระแสหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันผ่านบล็อก Select CT 1 (Y / D1 / D11) เพื่อกำหนดการต่อหม้อแปลงกระแส (CT) ด้านหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันและหาค่าสัมบูรณ์ค่ายอดของกระแสแล้วแปลงเป็นค่า r.m.s. โดยกระแสด้านหน้าอุปกรณ์ที่ทำการจะผ่านบล็อก Discrete Fourier Transform ความถี่ 100 เฮิรตซ์ ด้วยเพื่อหาขนาดกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 จากนั้ นขนาดกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 และค่า r.m.s. ของกระแสด้านหน้าอุปกรณ์ทีทำการป้องกันเข้าสู่บล็อก Relay Characteristic

ส่วนค่ากระแสด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันผ่านบล็อก Select CT (Y / D1 / D11) เพื่อกำหนดการต่อหม้อแปลงกระแส (CT) ด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันและหาค่าสัมบูรณ์ค่ายอดของกระแสแล้วแปลงเป็นค่า r.m.s. ของกระแสด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันเข้าสู่บล็อก Relay Characteristic ต่อไป

บล็อก Relay Characteristic นี้ ใช้บล็อกS-function ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สำหรับเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน หน้าที่ของบล็อก Relay Characteristic คือ ประมวลผลแล้วส่งสัญญาณรีเลย์ผลต่างแสดงในรูปที่4.15

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 แผนภาพการทำงานของแบบจำลองรีเลย์ผลต่าง

โดย CTp_1 คือ กระแสปฐมภูมิหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน

CTs_2 คือ กระแสทุติยภูมิหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน

CTp_2 คือ กระแสปฐมภูมิด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน

CTs_1 คือ กระแสทุติยภูมิด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน

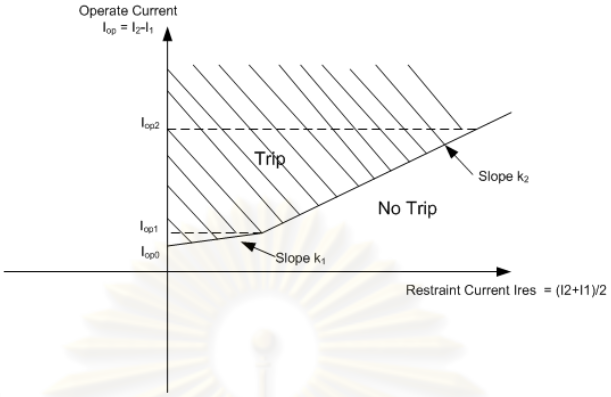
T_{Delay} คือ ค่าหน่วงเวลาการทำงานของรีเลย์หลังตรวจพบความผิดพร่อง

Sample Time คือ เวลาในการสุ่มตัวอย่าง

% Tap Auto Transformer คือ ค่าที่ใช้ในการปรับกระแสทางด้านหน้าและหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันหลังผ่านหม้อแปลงกระแส ให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ส่วนค่า 2nd Harmonic Current Threshold for Blocking Trip นั้นเป็นค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ตั้งไว้ หากค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 มีค่ามากกว่าค่าที่ตั้งไว้รีเลย์จะไม่ทำงาน

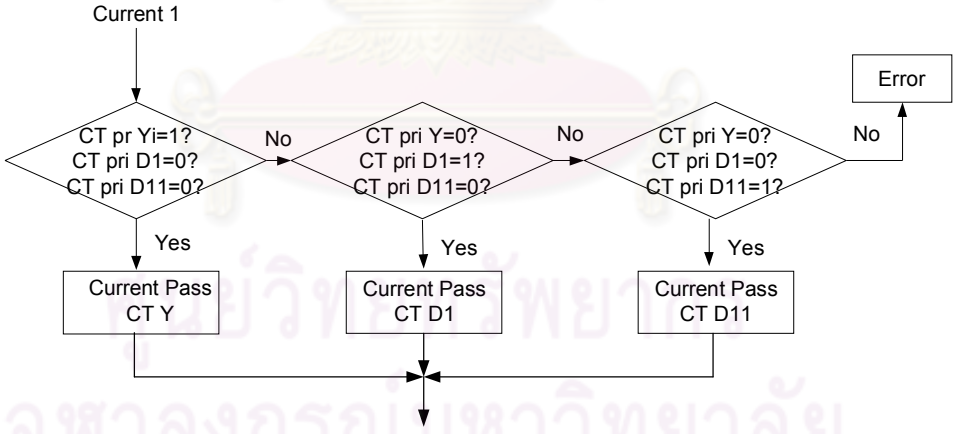
ค่า I_{op0}, I_{op1}, I_{op2}, k_1 และ k_2 สามารถดูได้จากรูปที่ 4.16 ซึ่งแสดงถึงลักษณะสมบัติของ Percentage Differential Relay สำหรับแบบจำลองรีเลย์ผลต่างที่ทำการจำลองขึ้นมาโดยค่า I_{op2} เป็นค่าผลต่างกระแสสูงสุดที่ยอมรับได้ ถ้าผลต่างกระแสเกินค่านี้รีเลย์ทำงานทันที ค่า I_{op1} เป็น

Break point ระหว่างความชัน k_1 และ k_2 ค่า I_{op1} เป็นค่ากระแสผลต่างที่ยอมรับได้ ถ้าผลต่างกระแสมีค่าน้อยกว่านี้ รีเลย์ไม่ทำงาน



รูปที่ 4.16 ลักษณะสมบัติของ Percentage Differential Relay

หลังจากตั้งค่า $CTp_1, CTs_1, CTp_2, CTs_2, T_{Delay}$, Sample Time, % Tap Auto Transformer, $I_{op0}, I_{op1}, I_{op2}, k_1, k_2$ และค่า 2nd Harmonic Current Threshold for Blocking Trip แล้วกระแสด้านหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน เข้าสู่บล็อกSelect CT 1 ซึ่งหลักการทำงานของบล็อกนี้ เป็นดังรูปที่4.17



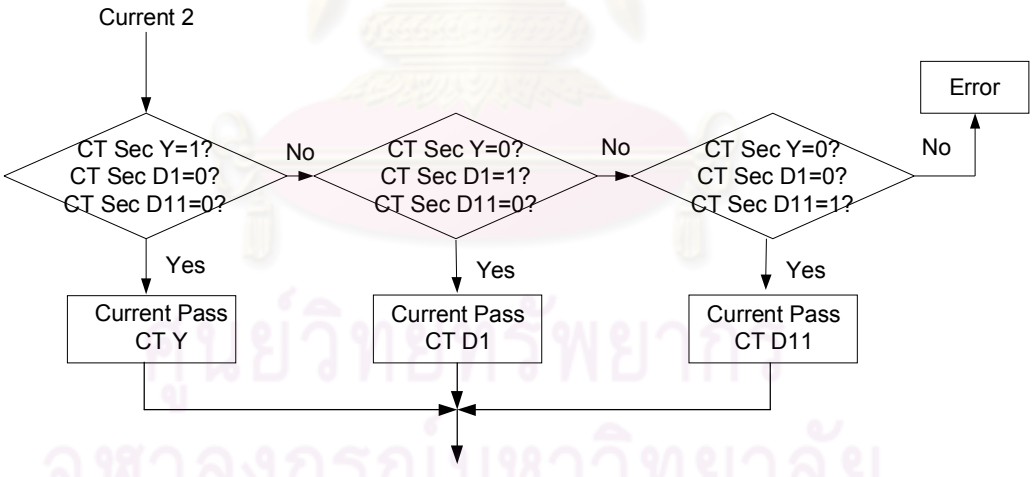
รูปที่ 4.17แผนภาพการทำงานบล็อก Select CT 1

จากรูปที่ 4.17 ค่า CT Pri Y, CT Pri D1 และ CT Pri D11 คือสัญญาณเข้าขา 1,2 และ 3 ของแบบจำลองรีเลย์ผลต่าง การต่อหม้อแปลงกระแสแบบ D1 หมายถึง แรงดันไฟฟ้าด้าน Δ นำหน้าแรงดันไฟฟ้าด้าน Y อยู่ 30 องศา การต่อหม้อแปลงกระแสแบบ D11 หมายถึง แรงดันไฟฟ้าด้าน Δ ตามหลังแรงดันไฟฟ้าด้านY อยู่ 30 องศา

หลักการทำงานของบล็อก Select CT 1 เริ่มต้นทำการเปรียบเทียบค่า CT Pri Y เท่ากับ 1, ค่า CT Pri D1เท่ากับ 0 และค่า CT Pri D11 เท่ากับ 0 หรือไม่ ถ้าค่าทั้งสามเป็นไปตามเงื่อนไข กระแสจะไหลผ่านหม้อแปลงที่ต่อแบบ Y กรณีไม่ตรงตามเงื่อนไขทำการเปรียบเทียบว่าค่า CT Pri Y เท่ากับ 0, ค่า CT Pri D1 เท่ากับ 1 และค่า CT Pri D11 เท่ากับ 0 หรือไม่ ถ้าค่าทั้งสามเป็นไปตามเงื่อนไข กระแสจะไหลผ่านหม้อแปลงที่ต่อแบบ D1 กรณีไม่ตรงตามเงื่อนไขทำการเปรียบเทียบว่าค่า CT Pri Y เท่ากับ 0, ค่า CT Pri D1เท่ากับ 0 และค่า CT Pri D11 เท่ากับ 1 หรือไม่ ถ้าค่าทั้งสามเป็นไปตามเงื่อนไข กระแสจะไหลผ่านหม้อแปลงที่ต่อแบบD11 กรณีไม่ตรงตามเงื่อนไข จะแสดงผล Error

กระแส Current 1 หลังผ่านบล็อก Select CT 1 ก็เข้าสู่บล็อก Discrete Fourier Transform 50 Hz เพื่อหาค่าสัมบูรณ์ค่ายอดของกระแสด้านหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน จากนั้นแปลงเป็นค่า r.m.s เพื่อเป็นสัญญาณเข้าสู่บล็อกRelay Characteristic ต่อไป

จากรูปที่ 4.15 กระแสด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน (Current 2) เข้าสู่บล็อก Select CT 2 (Y/D1/D11) เพื่อกำหนดการต่อหม้อแปลงกระแส (CT) ด้านหลังอุปกรณ์ป้องกันโดยหลักการทำงานของบล็อกนี้ เป็นดังรูปที่4.18



รูปที่ 4.18 แผนภาพการทำงานบล็อก Select CT 2

หลักการทำงานของบล็อก Select CT 2 เริ่มต้นทำการเปรียบเทียบค่า CT Sec Y เท่ากับ 1, ค่า CT Sec D1 เท่ากับ 0 และค่า CT Sec D11 เท่ากับ 0 หรือไม่ ถ้าค่าทั้งสามเป็นไปตามเงื่อนไขกระแสจะไหลผ่านหม้อแปลงที่ต่อแบบ Y กรณีไม่ตรงตามเงื่อนไขทำการเปรียบเทียบว่าค่า CT Sec Y เท่ากับ 0, ค่า CT Sec D1 เท่ากับ 1 และค่า CT Sec D11 เท่ากับ 0 หรือไม่ ถ้าค่าทั้งสามเป็นไปตามเงื่อนไข กระแสจะไหลผ่านหม้อแปลงที่ต่อแบบ D1 กรณีไม่ตรงตามเงื่อนไขทำการ

เปรียบเทียบว่าค่า CT Sec Y เท่ากับ 0, ค่า CT Sec D1 เท่ากับ 0 และค่า CT Sec D11 เท่ากับ 1 หรือไม่ ถ้าค่าทั้งสามเป็นไปตามเงื่อนไข กระแสจะไหลผ่านหม้อแปลงที่ต่อแบบ D11 กรณีไม่ตรงตามเงื่อนไขจะแสดงผล Error

จากนั้นกระแสCurrent 2 เข้าสู่บล็อก Discrete Fourier Transform 50 Hz เพื่อหาค่าสัมบูรณ์ค่ายอดของกระแสด้านหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน จากนั้นแปลงเป็นค่าr.m.s เพื่อเป็นสัญญาณเข้าสู่บล็อกRelay Characteristic ต่อไป

หลักการบล็อก Relay Characteristic เป็นไปตามรูปที่ 4.19 เริ่มต้นจาก

1. รับค่า r.m.s ของกระแสไฟฟ้า 3 เฟสหน้าและหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน

2. รับค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 จากบล็อก DFT 100 Hz

3. คำนวณค่า Operating และ Restraint Current จากสมการที่ (3.19) และ (3.20) ตามลำดับ

4. นำค่า Operating Current ที่คำนวณมา (I_{op}) เปรียบเทียบกับค่า I_{op0} กรณี I_{op} มีค่าน้อยกว่า I_{op0} ไปข้อ 9 ถ้า I_{op} มากกว่า I_{op0} ไปข้อ 5

5. ทำการเปรียบเทียบค่า I_{op} กับค่า I_{op2} กรณี I_{op} มีค่ามากกว่า I_{op2} ไปข้อ 8 ถ้า I_{op} น้อยกว่า I_{op2} ไปข้อ 6

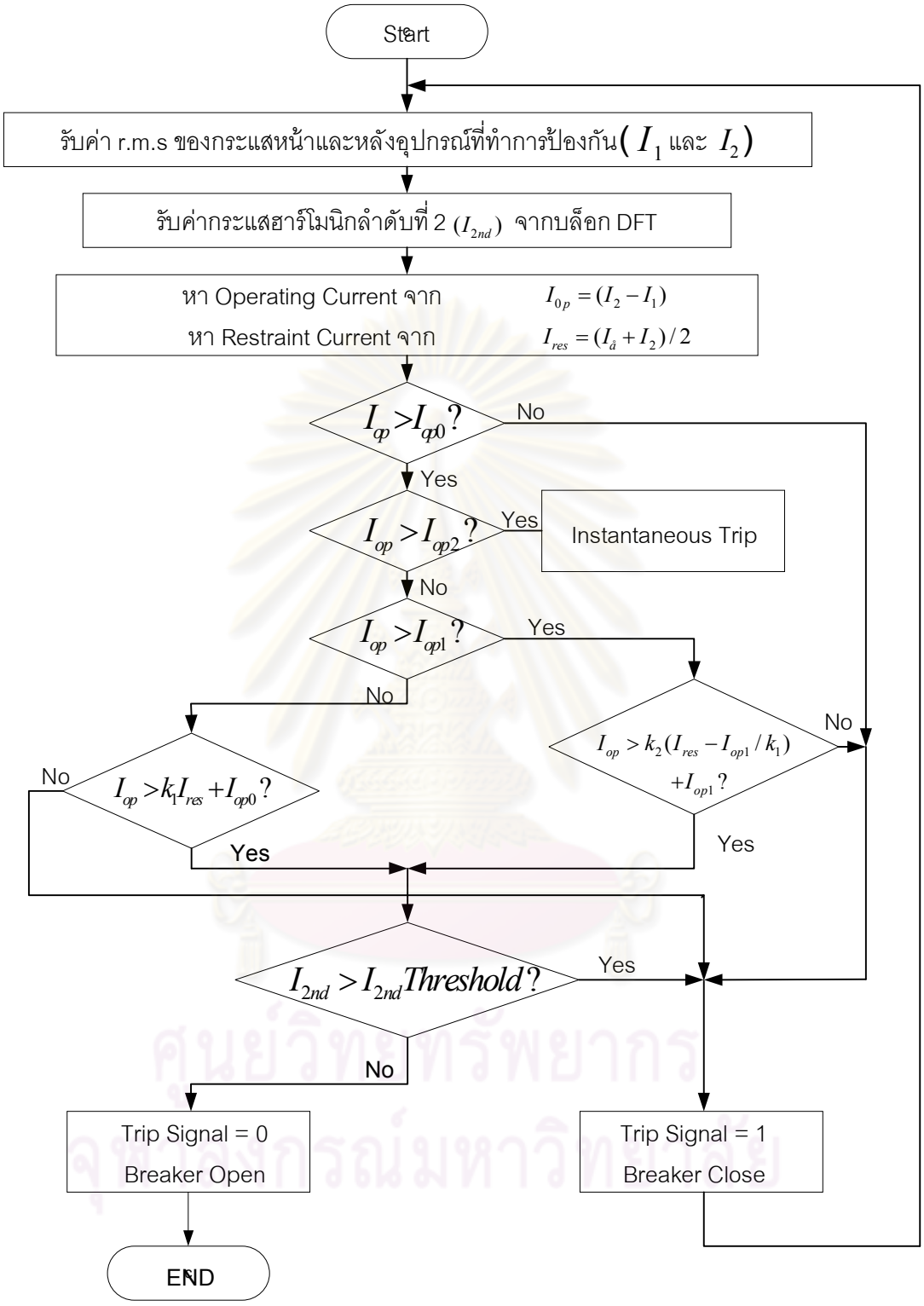
6. ทำการเปรียบเทียบค่า I_{op} กับค่า I_{op1} กรณี I_{op} มีค่ามากกว่า I_{op1} จะทำการเปรียบเทียบค่า I_{op} ว่ามีค่ามากกว่า $k_2(I_{res} - I_{op1}/k_1) + I_{op1}$ หรือไม่ ถ้ามีค่ามากกว่าไปข้อ 8 ถ้า I_{op} น้อยกว่า $k_2(I_{res} - I_{op1}/k_1) + I_{op1}$ ไปข้อ 9 กรณี I_{op} น้อยกว่า I_{op1} ไปข้อ 7

7. ทำการเปรียบเทียบค่า I_{op} ว่ามีค่ามากกว่า $k_1 I_{res} + I_{op0}$ หรือไม่ ถ้ามีค่ามากกว่าไปข้อ 8 ถ้า I_{op} ว่ามีค่าน้อยกว่า $k_1 I_{res} + I_{op0}$ ไปข้อ 9

8. เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 ที่วัดมา กับค่า 2^{nd} Harmonic Current Threshold for Blocking Trip ถ้ามีค่ามากกว่าไปข้อ 9 ถ้าน้อยกว่าไปข้อ 10

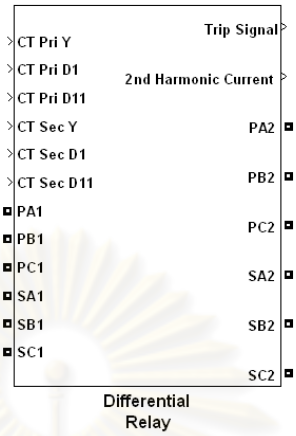
9. รีเลย์ส่งค่า Trip Signal เท่ากับ 1 (ปิดวงจร) ไปยังเซอกิตเบรกเกอร์ จบการทำงาน

10. รีเลย์ส่งค่า Trip Signal เท่ากับ 0 (เปิดวงจร) ไปยังเซอกิตเบรกเกอร์ จบการทำงาน



รูปที่ 4.19 แผนภาพบล็อก Relay Characteristic ของรีเลย์ผลต่าง

4.3.1 การนำแบบจำลองรีเลย์ผลต่างไปใช้งาน



รูปที่ 4.20 แบบจำลองรีเลย์ผลต่าง

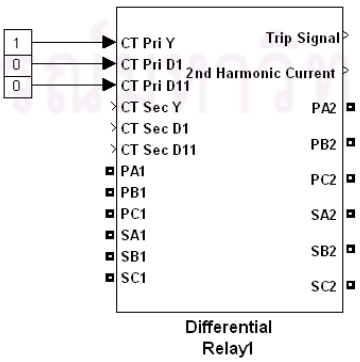
รูปที่ 4.20 แสดงแบบจำลองรีเลย์ผลต่างในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดย

สัญญาณเข้าขา 1 คือ CT Pri Y กรณีต้องการ CT ทางด้านหน้าอุปกรณ์ป้องกันต่อแบบ Y ป้อนค่า 1 ไม่ต้องการป้อนค่า 0

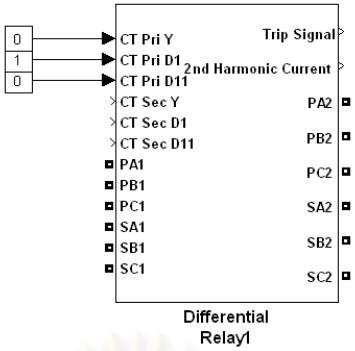
สัญญาณเข้าขา 2 คือ CT Pri D1 กรณีต้องการ CT ทางด้านหน้าอุปกรณ์ป้องกันต่อแบบ D1 ป้อนค่า 1 ไม่ต้องการป้อนค่า 0

สัญญาณเข้าขา 2 คือ CT Pri D11 กรณีต้องการ CT ทางด้านหน้าอุปกรณ์ป้องกันต่อแบบ D11 ป้อนค่า 1 ไม่ต้องการป้อนค่า 0

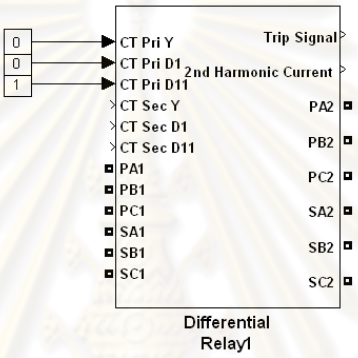
กรณีต้องการต่อ CT ด้านหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันแบบ Y ทำการป้อนค่าดังรูปที่ 4.21 กรณีต้องการต่อ CT ด้านหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันแบบ D1 ทำการป้อนค่าดังรูปที่ 4.22 กรณีต้องการต่อ CT ด้านหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันแบบ D11 ทำการป้อนค่าดังรูปที่ 4.23



รูปที่4.21 การกำหนด CT ต่อแบบ Y ด้านหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน



รูปที่ 4.22 การกำหนด CT ต่อแบบ D1 ด้านหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน



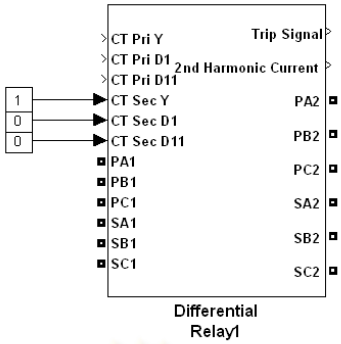
รูปที่ 4.23 การกำหนด CT ต่อแบบ D11 ด้านหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน

สัญญาณเข้าขา 4 คือ CT Sec Y กรณีต้องการ CT ทางด้านหลังอุปกรณ์ป้องกันต่อแบบ Y ป้อนค่า 1 ไม่ต้องการป้อนค่า 0

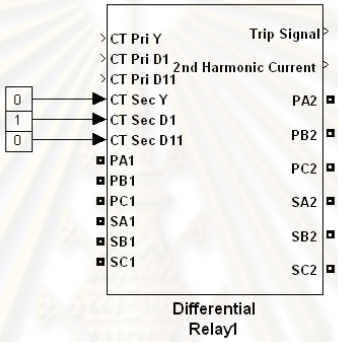
สัญญาณเข้าขา 5 คือ CT Sec D1 กรณีต้องการ CT ทางด้านหลังอุปกรณ์ป้องกันต่อแบบ D1 ป้อนค่า 1 ไม่ต้องการป้อนค่า 0

สัญญาณเข้าขา 6 คือ CT Sec D11 กรณีต้องการ CT ทางด้านหลังอุปกรณ์ป้องกันต่อแบบ D11 ป้อนค่า 1 ไม่ต้องการป้อนค่า 0

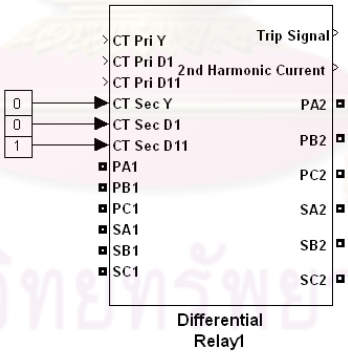
กรณีต้องการต่อ CT ด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันแบบY ทำการป้อนค่าดังรูปที่ 4.24 กรณีต้องการต่อ CT ด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันแบบ D1 ทำการป้อนค่าดังรูปที่ 4.25 กรณีต้องการต่อ CT ด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันแบบD11 ทำการป้อนค่าดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.24 การกำหนด CT ต่อแบบ Y ด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน



รูปที่ 4.25 การกำหนด CT ต่อแบบ D1 ด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน



รูปที่ 4.26 การกำหนด CT ต่อแบบ D11 ด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน

สัญญาณเข้าขา 7 คือ PA1 เป็นจุดเชื่อมต่อก่อนเข้า CT หน้าอุปกรณ์ป้องกันเฟส a

สัญญาณเข้าขา 8 คือ PB1 เป็นจุดเชื่อมต่อก่อนเข้า CT หน้าอุปกรณ์ป้องกันเฟส b

สัญญาณเข้าขา 9 คือ PC1 เป็นจุดเชื่อมต่อก่อนเข้า CT หน้าอุปกรณ์ป้องกันเฟส c

สัญญาณเข้าขา 10 คือ SA1 เป็นจุดเชื่อมต่อก่อนเข้า CT หลังอุปกรณ์ป้องกันเฟส a

สัญญาณเข้าขา 11 คือ SB1 เป็นจุดเชื่อมต่อก่อนเข้า CT หลังอุปกรณ์ป้องกันเฟส b

สัญญาณเข้าขา 12 คือ SC1 เป็นจุดเชื่อมต่อก่อนเข้า CT หลังอุปกรณ์ป้องกันเฟส c

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญญาณออกขาที่ 1 คือ Trip Signal ซึ่งเป็นสัญญาณที่ส่งไปควบคุมเซอร์กิตเบรกเกอร์ ถ้าสัญญาณออกเป็น 1 หมายถึงเซอร์กิตเบรกเกอร์ปิดวงจร ถ้าสัญญาณออกเป็น 0 หมายถึงเซอร์-กิตเบรกเกอร์เปิดวงจร

สัญญาณออกขาที่ 2 คือ ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 หน่อยเป็นแอมแปร์

สัญญาณออกขาที่ 3 คือ PA2 เป็นจุดเชื่อมต่อด้านหลัง CT หน้าอุปกรณ์ป้องกันเฟส a

สัญญาณออกขาที่ 4 คือ PB2เป็นจุดเชื่อมต่อด้านหลัง CT หน้าอุปกรณ์ป้องกันเฟส b

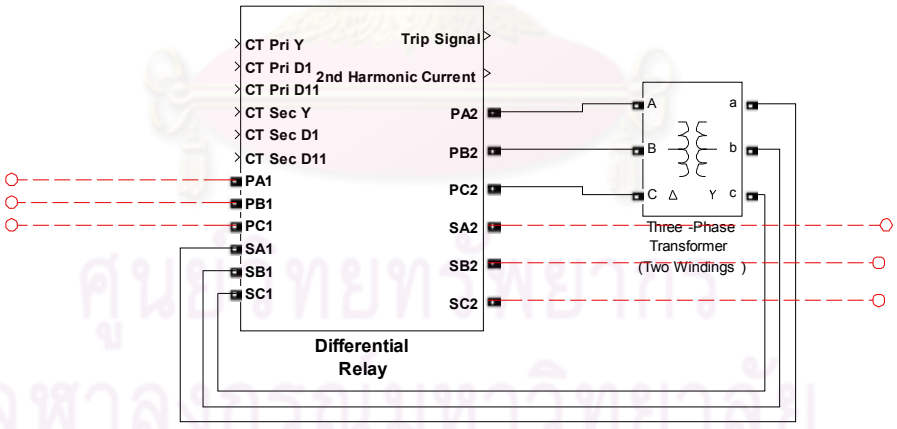
สัญญาณออกขาที่ 5 คือ PC2 เป็นจุดเชื่อมต่อด้านหลัง CT หน้าอุปกรณ์ป้องกันเฟส c

สัญญาณออกขาที่ 6 คือ SA2 เป็นจุดเชื่อมต่อด้านหลัง CT หลังอุปกรณ์ป้องกันเฟสa

สัญญาณออกขาที่ 7 คือ SB2 เป็นจุดเชื่อมต่อด้านหลัง CT หลังอุปกรณ์ป้องกันเฟสb

สัญญาณออกขาที่ 8 คือ SC2 เป็นจุดเชื่อมต่อด้านหลัง CT หลังอุปกรณ์ป้องกันเฟสc

รูปที่ 4.27 แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อแบบจำลองรีเลย์ผลต่างเข้ากับระบบ ขา PA1, PB1 และ PC1 เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่อยู่ก่อนหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน ขา PA2, PB2 และ PC2 เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันในกรณีนี้ คือหม้อแปลงไฟฟ้า ขาSA1, SB1และ SC1 เชื่อมต่อมาจากอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันคือหม้อแปลงไฟฟ้า ไฟฟ้า ขาSA2, SB2 และ SC2 เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่อยู่หลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน



รูปที่ 4.27 ตัวอย่างการเชื่อมต่อแบบจำลองรีเลย์ผลต่างเข้าระบบ

เมื่อทำการดับเบิลคลิกแบบจำลองรีเลย์จะเป็นดังรูป 4.28 ค่าที่ต้องทำการตั้งให้กับแบบจำลองรีเลย์ผลต่างมี 14 ค่า คือ

1. ค่า Front Side CT Primary กระแสปฐมภูมิหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน
2. ค่า Front Side CT Secondary กระแสทุติยภูมิหน้าอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน
3. ค่า Back Side CT Primary กระแสปฐมภูมิด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน

4. ค่า Back Side CT Secondary กระแสทุติยภูมิด้านหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน

5. ค่า I_{op0} หน่วยเป็นแอมแปร์

6. ค่า I_{op1} หน่วยเป็นแอมแปร์

7. ค่า I_{op2} หน่วยเป็นแอมแปร์

8. ค่าความชัน K_1

9. ค่าความชัน K_2

10. ค่า Time Delay เป็นค่าเวลาที่รีเลย์จะทำงานหลังตรวจพบความผิดปกติ หน่วยเป็นวินาที

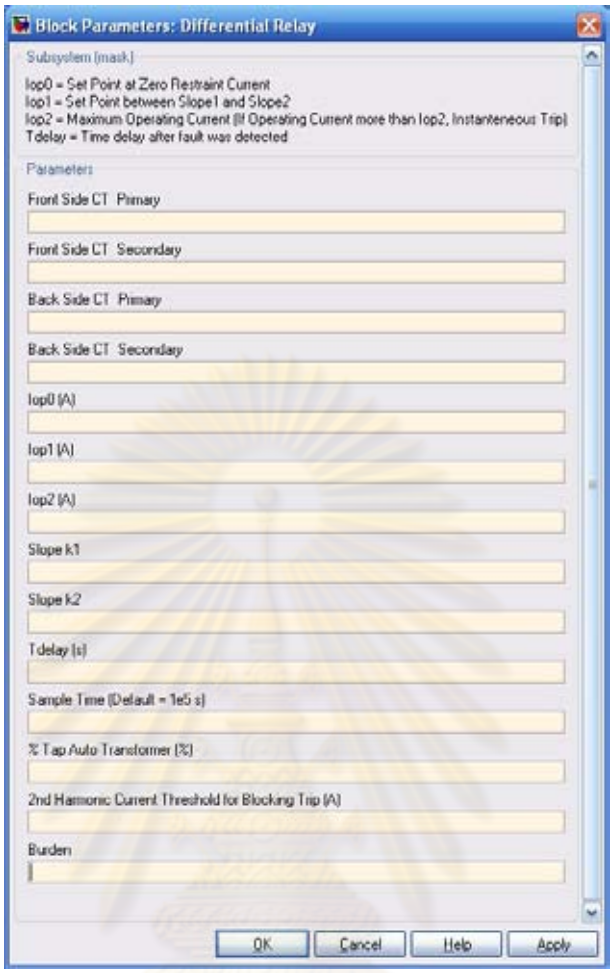
11. ค่า Sample Time ค่า Default เท่ากับ 1e-5 วินาที ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงทำการแก้ไขค่า Sample Time (TS) ใน M-file ด้วย

12. ค่า % Tap Auto Transformer เป็นค่าที่ใช้สำหรับปรับค่ากระแสหน้าและหลังอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันหลังผ่านหม้อแปลงกระแสให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

13. ค่า 2nd Harmonic Current Threshold for Blocking Trip เป็นค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ตั้งไว้หากค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 มีค่ามากกว่าค่าที่ตั้งไว้รีเลย์จะไม่ทำงาน หน่วยเป็นแอมแปร์

14. Burden เป็นค่า Burden ของหม้อแปลงกระแส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.28 ข้อมูลการตั้งค่าของแบบจำลองผลต่าง

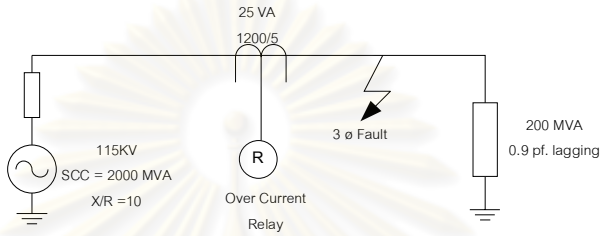
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดลอง

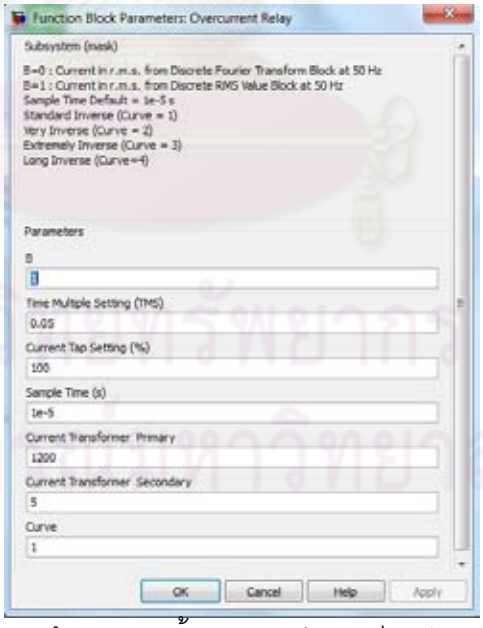
5.1 ผลการจำลองของแบบจำลองกระแสเกิน

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลอง ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส 115 kV ค่าพิกัดไฟฟ้าลัดวงจร 2000 MVA ค่า X/R = 10 มีโหลดขนาด 200 MVA 0.9 pf. lagging กำหนดให้เกิดความผิดพร่องแบบ 3 เฟส ที่เวลา 0.04 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 5.1

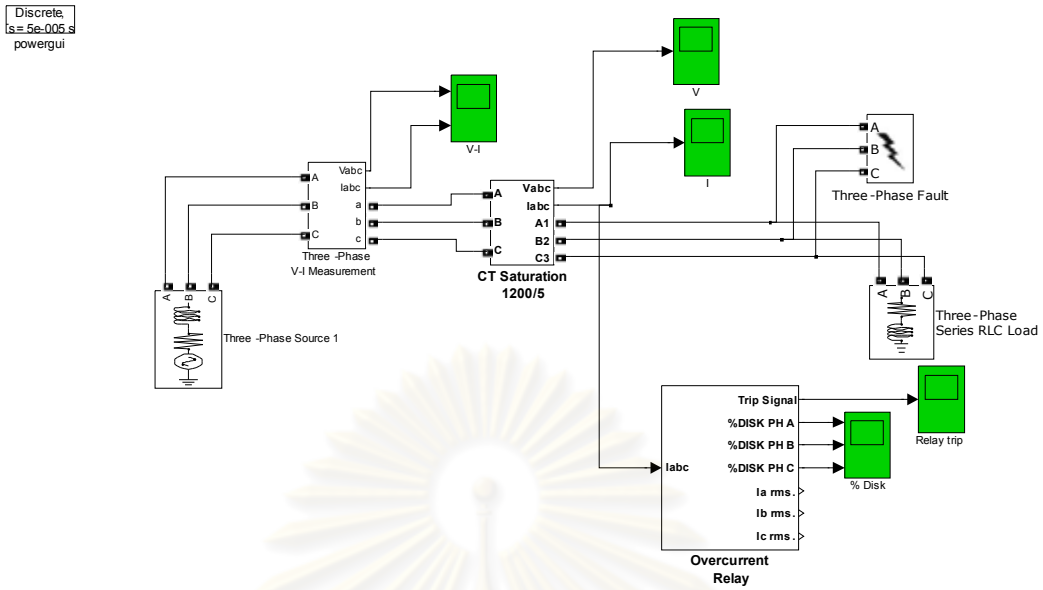


รูปที่ 5.1 ระบบไฟฟ้าสำหรับการทดลองรีเลย์กระแสเกิน

การตั้งค่าสำหรับแบบจำลองรีเลย์กระแสเกินแสดงดังรูปที่ 5.2 ซึ่งระบบไฟฟ้ามีกระแสพิกัด 1004.08 A ดังนั้นจึงเลือก CT ขนาด 1200/5 ปรับตั้งกระแสที่(CTS) 100% ใช้ลักษณะแบบผกผันมาตรฐาน (Standard Inverse) โดยมี A=0.14และ P=0.02 กำหนด TMS เท่ากับ 0.05



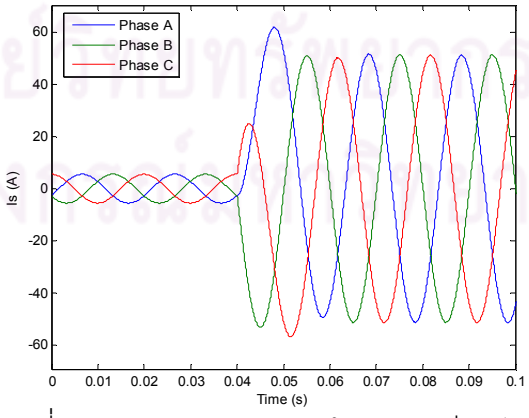
รูปที่ 5.2 ข้อมูลการตั้งค่าแบบจำลองรีเลย์กระแสเกิน



รูปที่ 5.3 ระบบไฟฟ้าจำลองสำหรับการทดสอบรีเลย์กระแสเกินในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

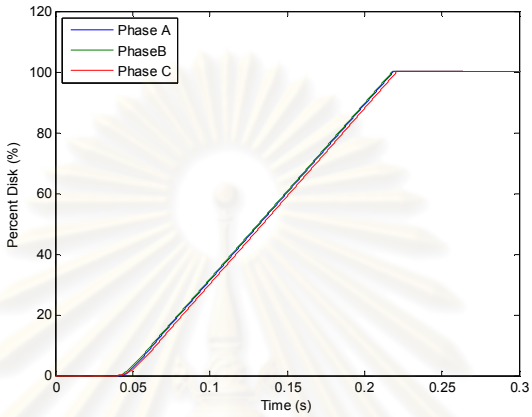
ระบบไฟฟ้าจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เมื่อเกิดความผิดพร่องแบบ 3 เฟส ที่เวลา 0.04 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 5.3

รูปที่ 5.4 แสดงกระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (I_s) ที่ป้อนให้กับรีเลย์กระแสเกินเมื่อหม้อแปลงกระแสมี เบอร์เดนเท่ากับ 0.7 Ω, ระบบไฟฟ้ามีอัตราส่วน X/R = 10 โดยเกิดความผิดพร่องแบบ 3 เฟส ที่เวลา 0.04 วินาที โดยมี Fault Resistance (R_f) ขนาด 3 Ω ต่อเฟส มีกระแสผิดพร่องทางด้านปฐมภูมิ 8626.7 A ในกรณีนี้ หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์ พบว่ารีเลย์ทำงานที่เวลา 218.1 ms นับจากเริ่มเกิดความผิดพร่องขึ้ น

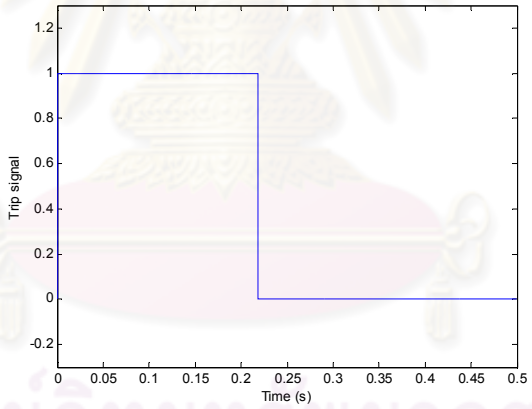


รูปที่ 5.4 กระแสทดสอบการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน
ในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว

รูปที่ 5.5 แสดงการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนจาก 0-100% พบว่าเปอร์เซ็นต์จาน-หมุนเฟส A, B และ C มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หลังจากเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบจนถึงเวลา 0.2181 วินาที พบว่าเปอร์เซ็นต์จานหมุนเฟส A มีค่าเท่ากับ 100% จึงทำให้สัญญาณทริปของรีเลย์เปลี่ยนจาก 1 (ปิดวงจร) เป็น 0 (เปิดวงจร) ดังรูป 5.6 เพื่อตัดความผิดพร่องออกจากระบบ



รูปที่ 5.5 เปอร์เซ็นต์จานหมุนรีเลย์กระแสเกินในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว



รูปที่ 5.6 สัญญาณทริปของรีเลย์กระแสเกินในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีศึกษาผลกระทบจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสใช้ในการจำลองการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน แสดงในตารางที่ 5.1

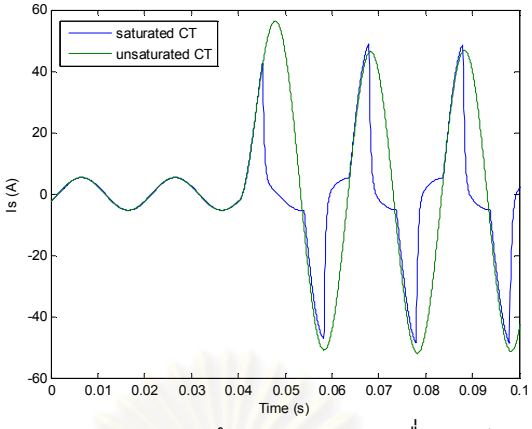
ตารางที่ 5.1 กรณีศึกษาที่ใช้ในการจำลองการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน

ผลกระทบจาก	พารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง	พารามิเตอร์คงที่
เบอร์เดน	เบอร์เดน = 3 Ω เบอร์เดน = 5 Ω เบอร์เดน = 10 Ω	R_f = 3 Ω X/R = 10
อัตราส่วน X/R	X/R = 20 X/R = 50 X/R = 100	เบอร์เดน = 1.5 Ω R_f = 0.1 Ω
กระแสลัดวงจร	R_f = 1 Ω R_f = 0.1 Ω R_f = $1x10^{-9}$ Ω	เบอร์เดน = 0.7 Ω X/R = 10

5.1.1 **ผลกระทบของ** Burden

รูปที่ 5.7 แสดงผลกระทบของเบอร์เดนเท่ากับ 5 Ω เมื่อหม้อแปลงกระแสมีพิกัด 25 VA, 1200/5 A โดยที่ Fault Resistance (R_f) = 3 Ω และระบบไฟฟ้ามีอัตราส่วน X/R = 10 ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว (สีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว (สีเขียว) การอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสจะส่งผลให้กระแสทางด้านทุติยภูมิมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์และส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวมีค่าลดลง

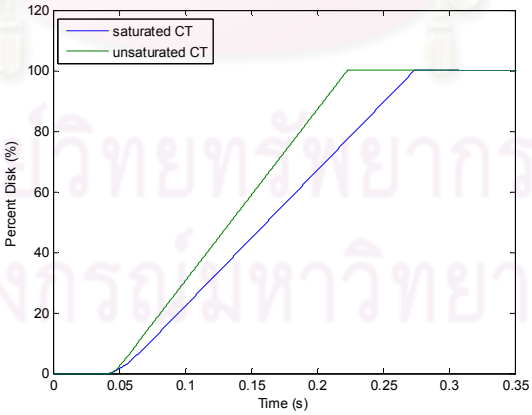
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.7 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อเบอร์เดนเท่ากับ 5 Ω
ในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน

รูปที่ 5.8 แสดงการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนจาก 0-100% หลังจากเกิดความผิดพร่องขึ้ น ในระบบพบว่าในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวเวลาที่เปอร์เซ็นต์จานหมุนทำงานถึง 100 % จะมีค่าช้ากล่ากรณีที่หม้อแปลงไม่เกิดการอิ่มตัวทั้ งนี้ เพราะว่าเมื่อหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวจะส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าลดลงจึงส่งผลต่อเวลาการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนที่ช้าลงตามไปด้วยและจะทำให้เวลาการทำงานของรีเลย์ช้าลงตามไปด้วย

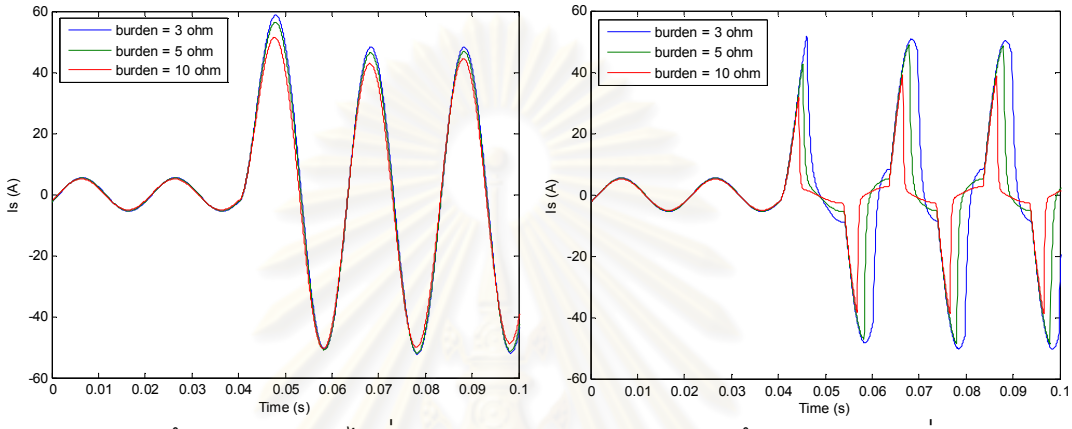
เวลาการทำงานของรีเลย์ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัวเท่ากับ 222.3 ms และเวลาการทำงานของรีเลย์ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสอิ่มตัวเท่ากับ 271.1 ms



รูปที่ 5.8 เปอร์เซ็นต์จานหมุนของรีเลย์กระแสเกินในกรณีเบอร์เดนเท่ากับ 5 Ω

รูปที่ 5.9 a) แสดงกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (I_s) เมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดอิ่มตัวการเพิ่มขึ้ นของเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสจะส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าลดลง

รูปที่ 5.9 b) แสดงกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (I_s) กระแสเมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีหม้อแปลงกระแสเกิดอิ่มตัว การเพิ่มขึ้นของเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสจะส่งผลให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวเร็วขึ้นและมีความรุนแรงซึ่งดูได้จากกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ที่มากขึ้นและส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิขณะที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวมีค่าลดลง

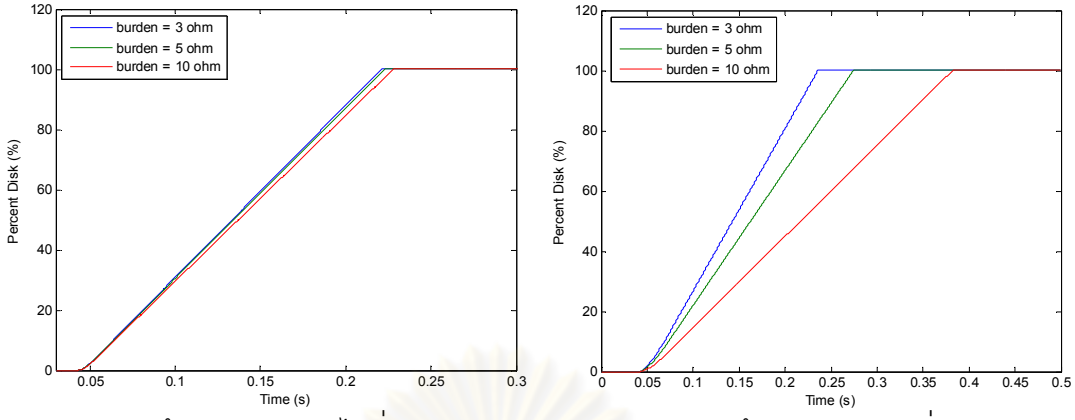


a) หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว b) หม้อแปลงกระแสอิ่มตัว

รูปที่ 5.9 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน

รูปที่ 5.10 a) และ b) แสดงการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนจาก 0-100% หลังจากเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบเมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวและกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว พบว่าเวลาที่เปอร์เซ็นต์จานหมุนทำงานถึง 100 % จะมีค่าช้าลงเมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ยอดของกระแสทุติยภูมิมีค่าลดลง จึงส่งผลต่อเวลาการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนที่ช้าลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



a) หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว b) หม้อแปลงกระแสอิ่มตัว

รูปที่ 5.10 การทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนเมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน

ตารางที่ 5.2 แสดงเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน กล่าวคือ เมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เวลาการทำงานของรีเลย์กรณีที่หม้อแปลงไม่เกิดการอิ่มตัวและกรณีที่หม้อแปลงเกิดการอิ่มตัวมีการทำงานที่ช้าลง เพราะการเพิ่มขึ้นของเบอร์เดนจะส่งผลให้กระแสทางด้านทุติยภูมิมีค่าลดลงส่งผลให้มีเวลาการทำงานที่ช้าลงตามไปด้วย

ส่วนกรณีที่มีค่าเบอร์เดนค่าเดียวกันจะเห็นว่ากรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวจะทำให้รีเลย์ทำงานช้ากว่ากรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวทั้งนี้ เพราะว่ากระแสทางด้านทุติยภูมิมีค่าลดลง

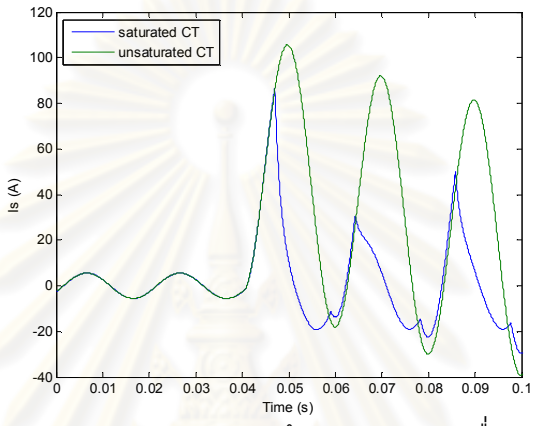
การที่รีเลย์ทำงานช้าลงจะทำให้เวลาที่รีเลย์สั่งการให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานจะช้าลงไปด้วยซึ่งจะส่งผลต่อการตัดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นออกไปจากระบบช้าลงและทำระบบเกิดความเสียหายมากขึ้น

ตารางที่ 5.2 ผลกระทบของเบอร์เดนต่อเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน

เบอร์เดน (Ω)	เวลาการทำงานของรีเลย์ (ms)	
	CT ไม่อิ่มตัว	CT อิ่มตัว
2	220.4	234.1
5	222.3	271.1
10	227.3	378.8

5.1.2 ผลกระทบของอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้า

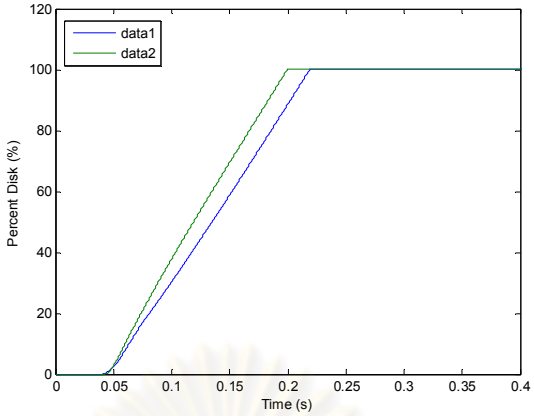
รูปที่ 5.11 แสดงผลกระทบของอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้าเมื่อ X/R = 50 โดยที่เบอร์เดนเท่ากับ 1.5 Ω และ Fault Resistance (R_f) = 0.1 Ω ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว (สีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว (สีเขียว) การอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสจะส่งผลให้กระแสทางด้านทุติยภูมิมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์และส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวมีค่าลดลง



รูปที่ 5.11 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อ X/R= 50 ในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน

รูปที่ 5.12 แสดงการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนจาก 0-100% หลังจากเกิดความผิดพร่องขึ้น ในระบบพบว่าในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวเวลาที่เปอร์เซ็นต์จานหมุนทำงานถึง 100 % จะมีค่าช้ากว่ากรณีที่หม้อแปลงไม่เกิดการอิ่มตัวทั้งนี้ เพราะว่าเมื่อหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวจะส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าลดลงจึงส่งผลต่อเวลาการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนที่ช้าลงตามไปด้วย

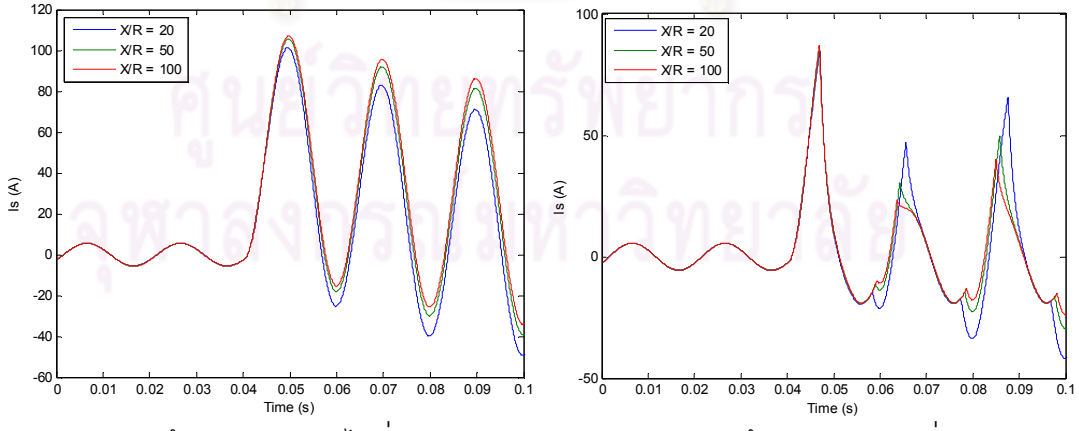
เวลาการทำงานของรีเลย์ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัวเท่ากับ 199.5 ms และเวลาการทำงานของรีเลย์ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสอิ่มตัวเท่ากับ 218.8 ms



รูปที่ 5.12 เปอร์เซ็นต์จานหมุนของรีเลย์กระแสเกินในกรณี X/R = 50

รูปที่ 5.13 a) แสดงกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (I_s) เมื่อ X/R ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดอิ่มตัว การเพิ่มขึ้นของ X/R ของระบบจะส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะว่า X/R ของระบบส่งผลให้เกิดผลขององค์ประกอบกระแสตรง (DC component) หรือ กระแสออฟเซตของกระแสผิดพร่องแต่ในกรณีนี้ จะเกิดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในช่วงแรกก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัว

รูปที่ 5.13 b) แสดงกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (I_s) เมื่อ X/R ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ในกรณีหม้อแปลงกระแสเกิดอิ่มตัว การเพิ่มขึ้นของ X/R ของระบบจะส่งผลให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวเร็วขึ้น และมีความรุนแรง ซึ่งดูได้จากกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ที่มากขึ้น และส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิขณะที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวมีค่าลดลง

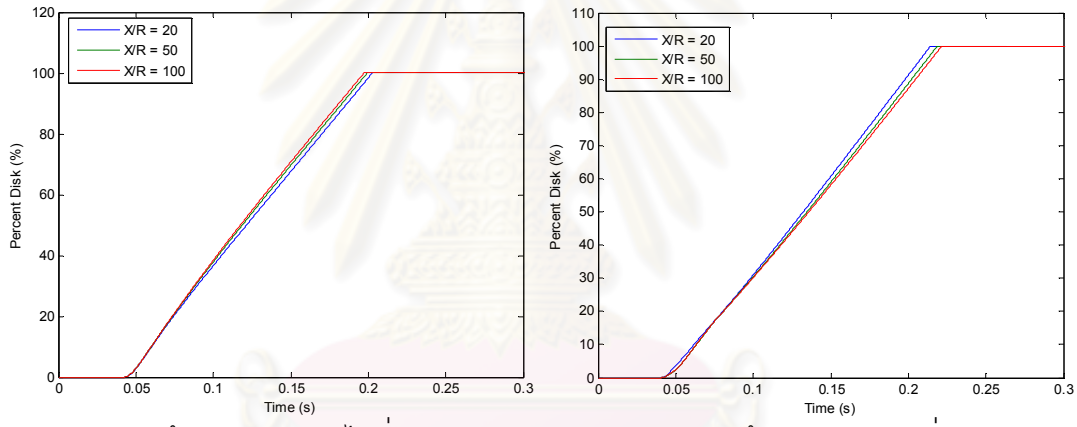


a) หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว b) หม้อแปลงกระแสอิ่มตัว

รูปที่ 5.13 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อ X/R ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน

รูปที่ 5.14 a) แสดงการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนจาก 0-100% หลังจากเกิดความผิดพร่องขึ้น ในระบบเมื่อ X/R ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว พบว่าเวลาที่เปอร์เซ็นต์จานหมุนทำงานถึง 100 % จะมีค่าเร็วขึ้น เมื่อ X/R ของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เพราะว่าเมื่อ X/R ของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงส่งผลต่อเวลาการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนที่เร็วขึ้น

รูปที่ 5.14 b) แสดงการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนจาก 0-100% หลังจากเกิดความผิดพร่องขึ้น ในระบบเมื่อ X/R ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว พบว่าเวลาที่เปอร์เซ็นต์จานหมุนทำงานถึง100 % จะมีค่าช้าลงเมื่อ X/R ของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อ X/R ของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าลดลงจึงส่งผลต่อเวลาการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนที่ช้าลงตามไปด้วย



a) หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว b) หม้อแปลงกระแสอิ่มตัว

รูปที่ 5.14 การทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนเมื่อX/R ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน

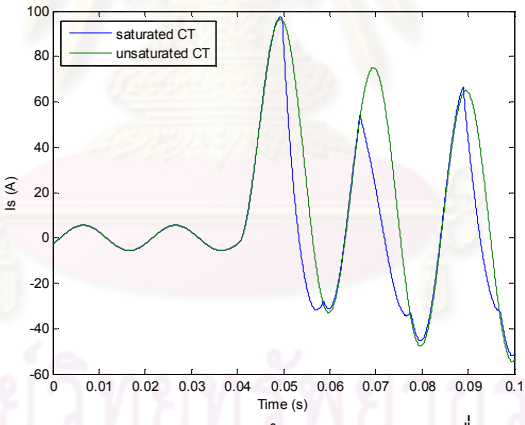
ตารางที่ 5.3 แสดงเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวจะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้าจะทำให้เวลาการทำงานของรีเลย์เร็วขึ้น ทั้งนี้ เพราะว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้าในกรณีที่หม้อแปลง-กระแสไม่เกิดการอิ่มตัวจะทำให้กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสมีขนาดเพิ่มขึ้น เพราะเกิดผลขององค์ประกอบกระแสตรง (DC component) หรือกระแสออฟเซตของกระแสผิดพร่อง ตรงกันข้ามกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวขึ้น จะทำให้เวลาการทำงานของรีเลย์มีค่าช้าลง ทั้งนี้เพราะว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้าในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวจะทำให้กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสมีขนาดลดลง

ตารางที่ 5.3 ผลกระทบของ X/R ต่อเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน

X/R	เวลาการทำงานของรีเลย์ (ms)	
	CT ไม่อิ่มตัว	CT อิ่มตัว
20	202.8	214.1
50	199.5	218.8
100	197.2	221.7

5.1.3 ผลกระทบของขนาดกระแสผิดพร่อง

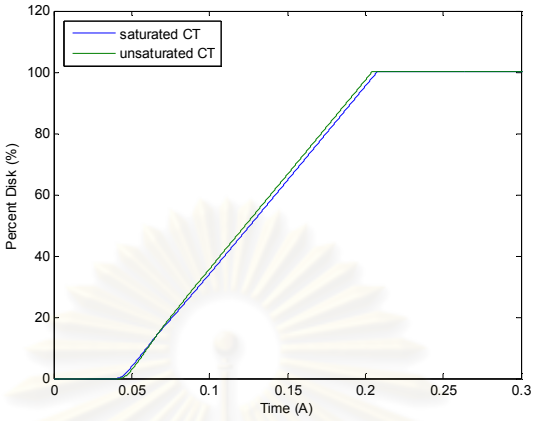
รูปที่ 5.15 แสดงผลกระทบของขนาดกระแสผิดพร่องที่ 9970.2 A โดยมี Fault Resistance (R_f) = 0.1 Ω, เบอร์เดนเท่ากับ 0.7 Ω และอัตราส่วน X/R = 10 ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว (สีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว (สีเขียว) การอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสจะส่งผลให้กระแสทางด้านทุติยภูมิมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์และส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวมีค่าลดลง



รูปที่ 5.15 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อ R_f = 0.1 Ω ในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน

รูปที่ 5.16 แสดงการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนจาก 0-100% หลังจากเกิดความผิดพร่องขึ้น ในระบบพบว่าในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวเวลาที่เปอร์เซ็นต์จานหมุนทำงานถึง 100 % จะมีค่าช้ากว่ากรณีที่หม้อแปลงไม่เกิดการอิ่มตัวทั้งนี้ เพราะว่าเมื่อหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวจะส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าลดลงจึงส่งผลต่อเวลาการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนที่ช้าลงตามไปด้วย

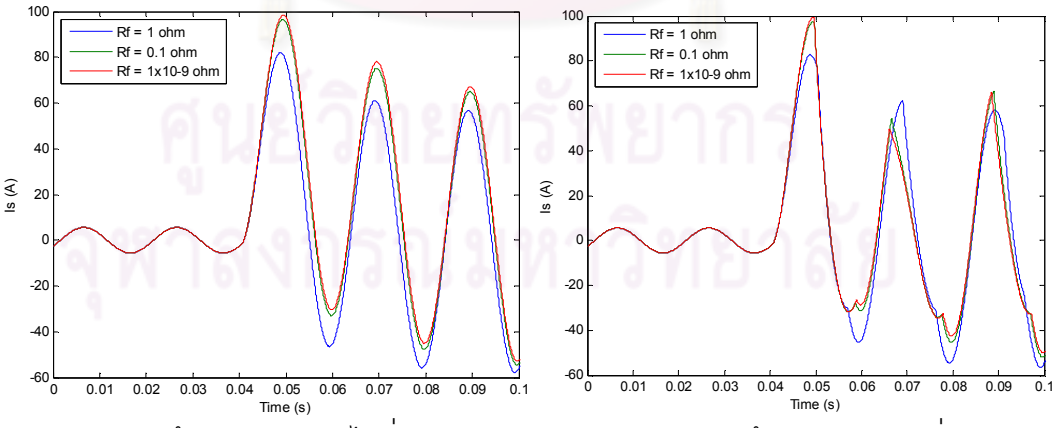
เวลาการทำงานของรีเลย์ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัวเท่ากับ 204.3 ms และเวลาการทำงานของรีเลย์ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสอิ่มตัวเท่ากับ 207.6 ms



รูปที่ 5.16 เปอร์เซ็นต์จานหมุนของรีเลย์กระแสเกินในกรณี $R_f = 0.1\ \Omega$

รูปที่ 5.17 a) แสดงกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (I_s) เมื่อกระแสผิดพร่องมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดอิ่มตัว การเพิ่มขึ้นของกระแสผิดพร่องจะส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าสูงขึ้น

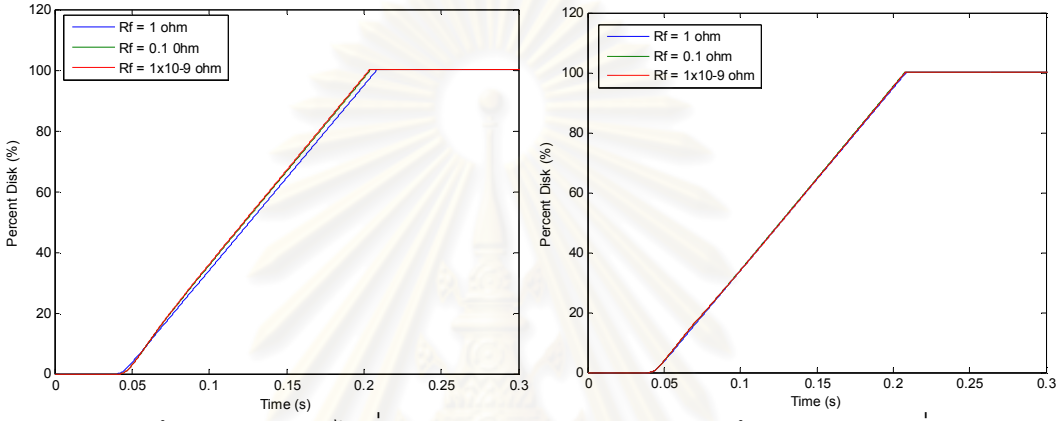
รูปที่ 5.17 b) แสดงกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (I_s) เมื่อกระแสผิดพร่องมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีหม้อแปลงกระแสเกิดอิ่มตัว การเพิ่มขึ้นของกระแสผิดพร่องจะส่งผลให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวเร็วขึ้นและมีความรุนแรง ซึ่งดูได้จากกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ที่มากขึ้น



a) หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว b) หม้อแปลงกระแสอิ่มตัว

รูปที่ 5. 17 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อกระแสผิดพร่องมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน

รูปที่ 5.18 (a,b) แสดงการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนจาก 0-100% หลังจากเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบเมื่อกระแสผิดพร่องมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวและกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว พบว่าเวลาที่เปอร์เซ็นต์จานหมุนทำงานถึง 100 % จะมีค่าเร็วขึ้นเมื่อกระแสผิดพร่องมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อกระแสผิดพร่องมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลต่อเวลาการทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนที่เร็วขึ้นตามไปด้วย



a) หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว b) หม้อแปลงกระแสอิ่มตัว

รูปที่ 5.18 การทำงานของเปอร์เซ็นต์จานหมุนเมื่อกระแสผิดพร่อง
มีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์กระแสเกิน

ตารางที่ 5.4 แสดงผลกระทบของกระแสผิดพร่อง ต่อเวลาการทำงานของรีเลย์ระยะทาง จะเห็นว่าเมื่อทำการลด R_f คือเป็นการเพิ่มขึ้นของกระแสผิดพร่อง จะส่งผลต่อเวลาการทำงานของรีเลย์ กล่าวคือในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวและกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวจะทำให้เวลาการทำงานของรีเลย์มีค่าเร็วขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสผิดพร่องจะทำให้กระแสทางด้านทุติยภูมิมีขนาดเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้รีเลย์ทำงานเร็วขึ้น

เมื่อพิจารณาที่กระแสผิดพร่องค่าเดียวกันจะเห็นว่าในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวจะทำงานช้ากว่ากรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว ทั้งนี้เพราะว่ากรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวจะส่งผลให้การแสทางด้านทุติยภูมิมีขนาดน้อยกว่ากรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว

ตารางที่ 5.4 ผลกระทบของกระแสผิดพร่องต่อเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน

กระแสผิดพร่อง (A)	เวลาการทำงานของรีเลย์ (ms)	
	CT ไม่อิ่มตัว	CT อิ่มตัว
9758.1 (R_f = 1 Ω)	208.2	208.7
9970.2 (R_f = 0.1 Ω)	204.3	207.6
10040.9 (R_f = 1x10^{-9} Ω)	203.6	206.9

5.2 ผลการจำลองของแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง

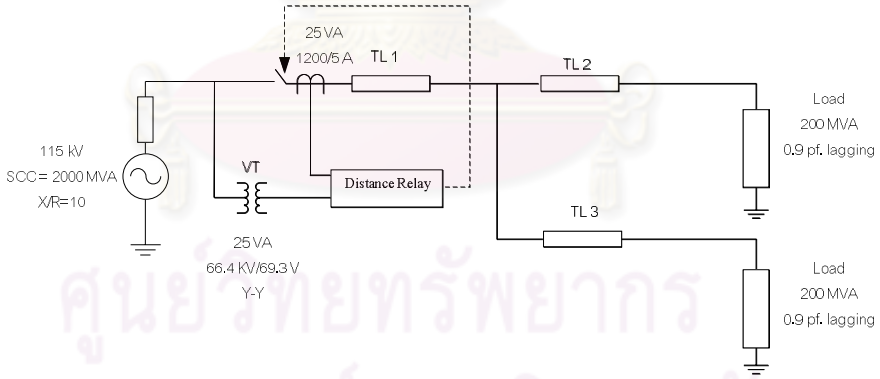
ตามปกติการป้องกันสายส่งด้วยรีเลย์ระยะทางจะแบ่งโซนป้องกันออกเป็น 3 ส่วนเพื่อให้สามารถป้องกันสายส่งได้ตลอดทั้งสาย การแบ่งโซนป้องกันทำได้ดังนี้

โซนป้องกันที่ 1 กำหนดที่ความยาว 85-90% ของสายส่งที่ทำการป้องกัน

โซนป้องกันที่ 2 กำหนดที่ความยาว 120-150% ของสายส่งที่ทำการป้องกัน

โซนป้องกันที่ 3 กำหนดที่ความยาว 150% ของความยาวสายส่งเส้นที่ยาวที่สุดถัดไป

ข้อมูลระบบ



รูปที่ 5.19 ระบบไฟฟ้าสำหรับการทดลองรีเลย์ระยะทาง

รูปที่ 5.19 แสดงระบบไฟฟ้าสำหรับการทดสอบ ระบบประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า115kV ค่าพิกัดไฟฟ้าลัดวงจรเท่ากับ 2000 MVA ค่า X/R = 10 สายส่งมีทั้งหมด3 เส้น พารามิเตอร์สายส่งเป็นตามตารางที่ 5.5 ระหว่างแหล่งจ่ายกับสายส่งTL1 มีรีเลย์ระยะทางติดตั้งอยู่ โหลดที่สายส่ง TL2 ขนาด 200 MVA 0.9 pf. lagging โหลดที่สายส่ง TL3 ขนาด 200 MVA 0.9 pf. Lagging

ตารางที่ 5.5 ข้อมูลพารามิเตอร์สายส่ง

Line	R1 (Ω/km)	R0 (Ω/km)	L1 (H/km)	L0 (H/km)	C1 (F/km)	C_0 (F/km)	Length (km)
TL1	0.04	0.1	0.00095	0.002866	1.31×10^{-12}	14.75×10^{-12}	100
TL2	0.07	0.1	0.00191	0.002866	1.31×10^{-12}	14.75×10^{-12}	100
TL3	0.02	0.1	0.00063	0.002866	1.31×10^{-12}	14.75×10^{-12}	100

การคำนวณหาค่า Setting สำหรับโซนป้องกันทั้ งง3 โซน ทางด้านทุติยภูมิ

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งเส้นที่ 1 (TL1) คำนวณจาก

$$Z_{TL1} = (0.04 \times 100) + j(2\pi \times 50 \times 0.00095 \times 100) = 4 + j30\Omega$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งเส้นที่ 2 (TL2) คำนวณจาก

$$Z_{TL2} = (0.07 \times 100) + j(2\pi \times 50 \times 0.00191 \times 100) = 7 + j60\Omega$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งเส้นที่ 3 (TL3) คำนวณจาก

$$Z_{TL3} = (0.02 \times 100) + j(2\pi \times 50 \times 0.00063 \times 100) = 2 + j20\Omega$$

การตั้ งค่าZone 1 ของรีเลย์ระยะทาง ให้ทำงานหากเกิดการลัดวงจรในช่วง 85% ของความยาวสายส่ง โดย CT = 1200/5 และ VT = 66.4kV/69.3 และสายส่งมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 4+j30 Ω

n_i = 1200/5 = 240

n_e = $66.4 \times 10^3/69.3$ = 958.15

จะได้ n_i/n_e = 240/958.15 = 0.25

อิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิคือ 0.25 x (4 + j30) = 1 + j7.5 Ω

ดังนั้ นจะต้องตั้ งค่า Z_{pickup} เท่ากับ 0.85 x (1 + j7.5) = 6.43 Ω

การตั้ งค่าZone 2 ของรีเลย์ระยะทาง ให้ทำงานหากเกิดการลัดวงจรในช่วง 120% ของความยาวสายส่ง โดย CT = 1200/5 และ VT = 66.4kV/69.3 และสายส่งมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 7+j60 Ω

n_i = 1200/5 = 240

n_e = $66.4 \times 10^3/69.3$ = 958.15

จะได้ n_i/n_e = 240/958.15 = 0.25

อิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิคือ 0.25 x (4 + j30) = 1 + j7.5 Ω

ดังนั้ นจะต้องตั้ งค่า Z_{pickup} เท่ากับ 1.2 x (1 + j7.5) = 9.07 Ω

การตั้งค่าZone 3 ของรีเลย์ระยะทาง ให้ทำงานครอบคลุม 150% ของความยาวสายส่งเส้นถัดไปที่ยาวที่สุด โดย CT = 1200/5 และ VT = 66.4kV/69.3 และสายส่งมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 7 + j60 Ω

n_i = 1200/5 = 240

n_e = $66.4x10^3/69.3$ = 958.15

จะได้ n_i/n_e = 240/958.15 = 0.25

อิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิ คือ 0.25 x (4 + j30) และ 0.25 x (7 + j60)

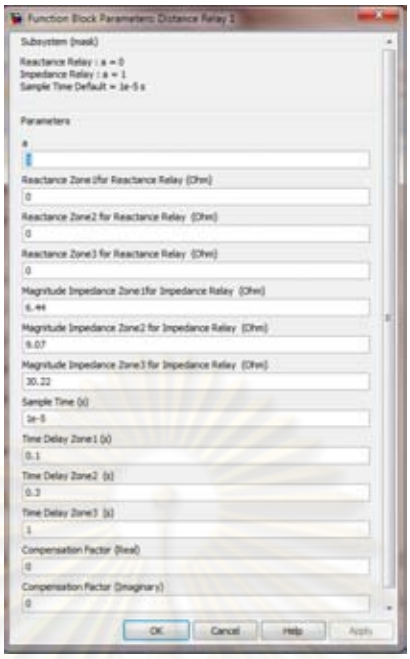
= 1 + j7.5 Ω และ 1.75 + j15 Ω

ดังนั้นจะต้องตั้งค่าZ_{pickup} เท่ากับ (1 + j7.5) +1.5 x (1.75 + j15) = 30.22 Ω

ตารางที่ 5.6 แสดงข้อมูลการตั้งค่าแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง เลือกลักษณะเฉพาะแบบอิมพีแดนซ์ จากนั้นตั้งค่าอิมพีแดนซ์สำหรับโซนป้องกันที่ 1, 2 และ 3 ตามค่าที่คำนวณมา กำหนดเวลาที่รีเลย์จะทำการทริปกรณีเกิดความผิดพร่องภายในโซนป้องกันที่ 1 คือ 0.1 วินาที กรณีเกิดความผิดพร่องภายในโซนป้องกันที่ 2 รีเลย์ทำงานภายในเวลา 0.3 วินาที กรณีเกิดความผิดพร่องภายในโซนป้องกันที่ 3 รีเลย์ทำงานภายในเวลา 1 วินาที รูปที่ 5.20 แสดงข้อมูลการตั้งค่าของแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง

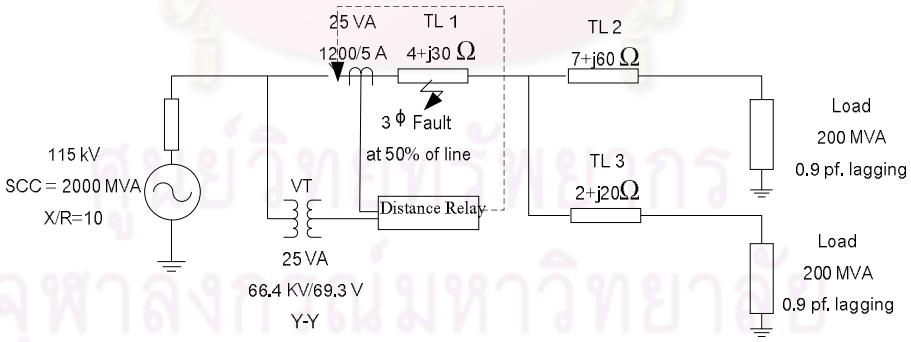
ตารางที่ 5.6 ข้อมูลการตั้งค่าแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง

Characteristic	Impedance Relay
Pick up Impedance Zone 1 (Ω)	6.43
Pick up Impedance Zone 2 (Ω)	9.07
Pick up Impedance Zone 3 (Ω)	30.22
Time Relay Zone 1 (s)	0.1
Time Relay Zone 2 (s)	0.3
Time Relay Zone 3 (s)	1
Compensate Factor (Real)	0
Compensate Factor (Imaginary)	0

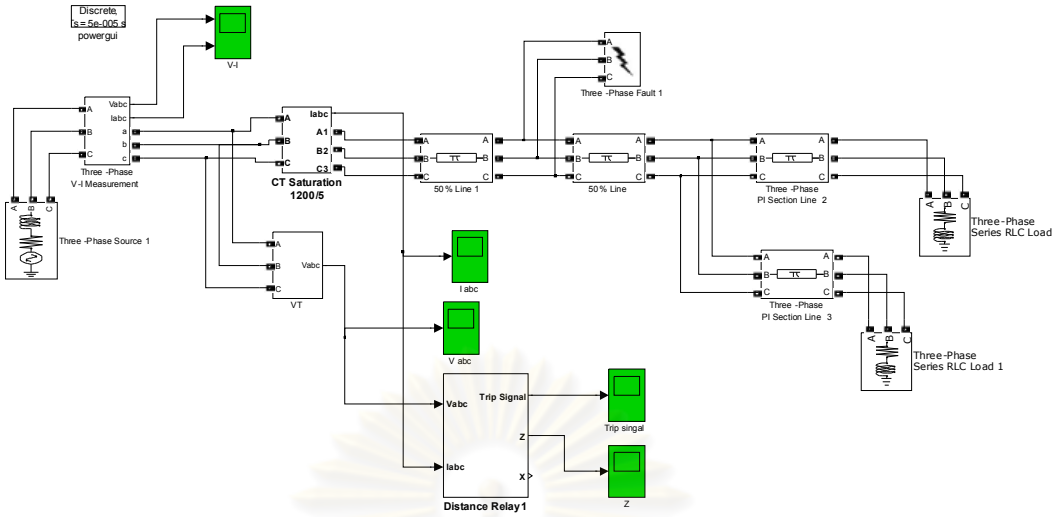


รูปที่ 5.20 ข้อมูลการตั้ งค่าแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง

รูปที่ 5.21 แสดงระบบไฟฟ้าสำหรับการทดลองซึ่งกำหนดให้เกิดความผิดพร่องที่ 50% ของความยาวสาย ที่เวลา 0.04 วินาที และรูปที่ 5.22 แสดงระบบไฟฟ้าจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กรณีเกิดความผิดพร่องที่ 50% ของความยาวสายซึ่งอยู่ภายในโซนป้องกันที่ 1

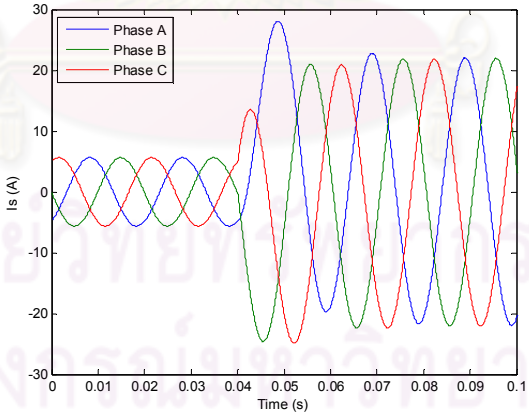


รูปที่ 5.21 ระบบไฟฟ้าสำหรับการทดลองรีเลย์ระยะทาง
เมื่อเกิดความผิดพร่องที่ 50% ของความยาวสาย



รูปที่ 5.22 ระบบไฟฟ้าสำหรับการทดสอบรีเลย์ระยะทางในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

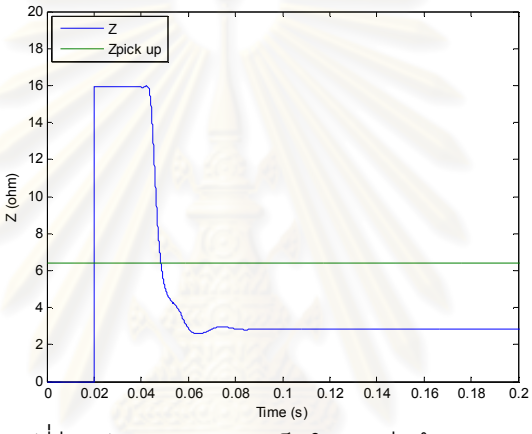
รูปที่ 5.23 แสดงกระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (I_s) ที่ป้อนให้กับรีเลย์ระยะทางเมื่อหม้อแปลงกระแสมีเบอร์เดนเท่ากับ 0.7 Ω, ระบบไฟฟ้ามีอัตราส่วน X/R = 10 โดยเกิดความผิดพร่องแบบ 3 เฟส ที่เวลา 0.04 วินาที โดยมี Fault Resistance (R_f) ขนาด 4 Ω ต่อเฟส มีกระแสผิดพร่องทางด้านปฐมภูมิ 3753.73 A ในกรณีนี้ หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์ พบว่ารีเลย์ทำงานที่เวลา 148.4 ms นับจากเริ่มเกิดความผิดพร่องขึ้ น



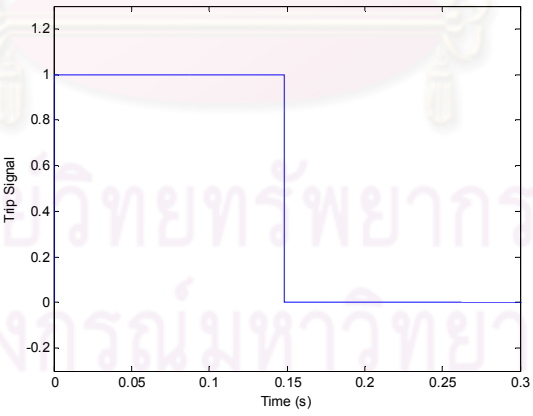
รูปที่ 5.23 กระแสทดสอบการทำงานของรีเลย์ระยะทาง
ในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว

รูปที่ 5.24 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่อ่านได้จากรีเลย์ระยะทาง หลังจากเกิดความผิดพร่อง พบว่าค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงจนถึง 9 Ω รูปที่ 5.43 แสดงสัญญาณทริปของรีเลย์ระยะทางพบว่ามีค่าเปลี่ยนจาก 1 (ปิดวงจร) เป็น 0 (เปิดวงจร) ที่เวลา 148.4 ms

กรณีเกิดความผิดพร่องในโซนป้องกันที่ 1 จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้งไว้ คือที่6.43 Ω ส่วนเวลาทริปที่ควรจะเป็นในกรณีนี้ หาได้จากเวลาที่เกิดความผิดพร่องคือ 0.04 วินาที บวกด้วยค่าหน่วงเวลาของโซนป้องกันที่ 1 กรณีนี้ ตั้งค่าหน่วงเวลาไว้ที่ 0.1 วินาทีนำมารวมกันจะได้เท่ากับ 0.14 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาทริปของแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 148.4 ms ซึ่งจะเห็นว่าเวลาทริปจากแบบจำลองระยะทางมีค่ามากกว่าเล็กน้อยเนื่องจากหลังจากเกิดความผิดพร่องอิมพีแดนซ์จะเริ่มลดลงตามเวลาจนค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้งไว้จึงจะได้เวลาที่เกิดความผิดพร่องซึ่งแสดงในรูปที่ 5.25 ทำให้เวลาทริปจากแบบจำลองมีค่าช้ากว่าเวลาทริปทางทฤษฎีเล็กน้อย



รูปที่ 5.24 ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว



รูปที่ 5.25 สัญญาณทริปของรีเลย์ระยะทางในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว

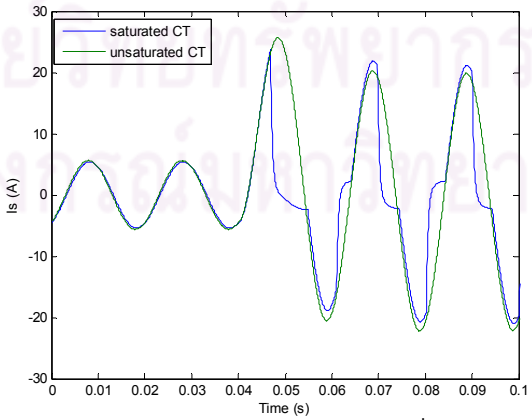
กรณีศึกษาผลกระทบจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสในการจำลองการทำงานของรีเลย์ระยะทาง แสดงในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 กรณีศึกษาที่ใช้ในการจำลองการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

ผลกระทบจาก	พารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง	พารามิเตอร์คงที่
เบอร์เดน	เบอร์เดน = 3 Ω เบอร์เดน = 5 Ω เบอร์เดน = 10 Ω	R_f = 4 Ω X/R = 10
อัตราส่วน X/R	X/R = 20 X/R = 50 X/R = 100	เบอร์เดน = 1 Ω R_f = 1x10^{-9} Ω
กระแสลัดวงจร	R_f = 2 Ω R_f = 0.1 Ω R_f = 1x10^{-9} Ω	เบอร์เดน = 0.7 Ω X/R = 10

5.2.1 **ผลกระทบของ** Burden

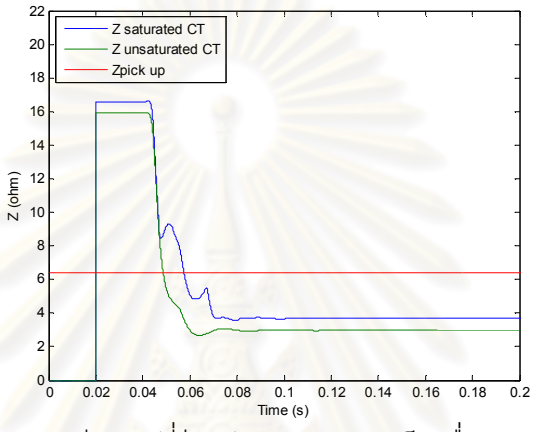
รูปที่ 5.26 แสดงผลกระทบของเบอร์เดนเท่ากับ 5 Ω เมื่อหม้อแปลงกระแสมีพิกัด 25 VA, 1200/5 A โดยที่ Fault Resistance (R_f) = 4 Ω และระบบไฟฟ้ามีอัตราส่วน X/R = 10 ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว (สีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว (สีเขียว) การอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสจะส่งผลให้กระแสทางด้านทุติยภูมิมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์และส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวมีค่าลดลง



รูปที่ 5.26 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อเบอร์เดนเท่ากับ5 Ω ในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง

รูปที่ 5.27 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่อ่านได้จากรีเลย์ระยะทางที่ทำให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว (สีฟ้า) เปรียบเทียบกับกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว (สีเขียว) หลังจากเกิดความผิดพร่องจะเห็นว่ากรณีเกิดความผิดพร่องในโซนป้องกันที่ 1 จะทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าลดลงจนค่าอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำกว่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้งไว้คือ 6.43 Ω รีเลย์จึงทำงาน

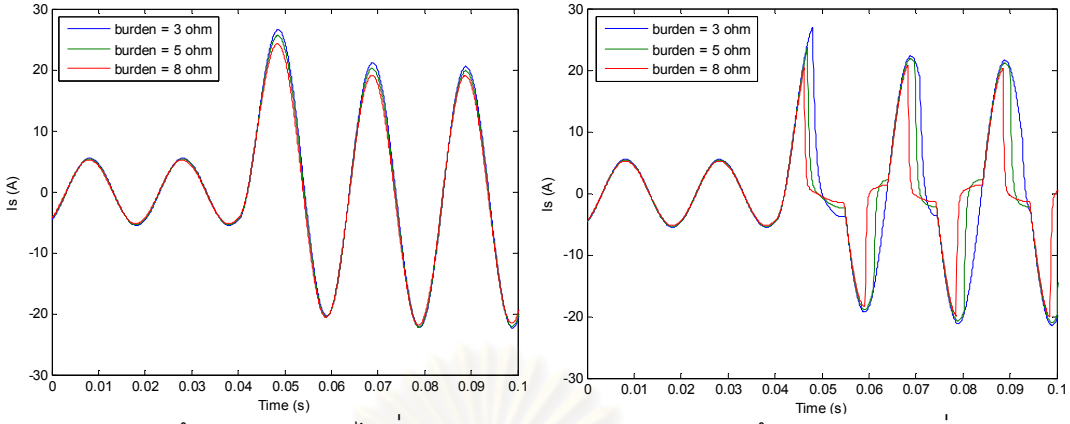
เวลาการทำงานของรีเลย์ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวรีเลย์จะทำงานที่เวลา 148.5 ms และในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวรีเลย์จะทำงานที่เวลา 157.5 ms



รูปที่ 5.27 ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อ Burden = 5 Ω

รูปที่ 5.28 a) แสดงกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (I_s) เมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดอิ่มตัว การเพิ่มขึ้นของเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสจะส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าลดลง

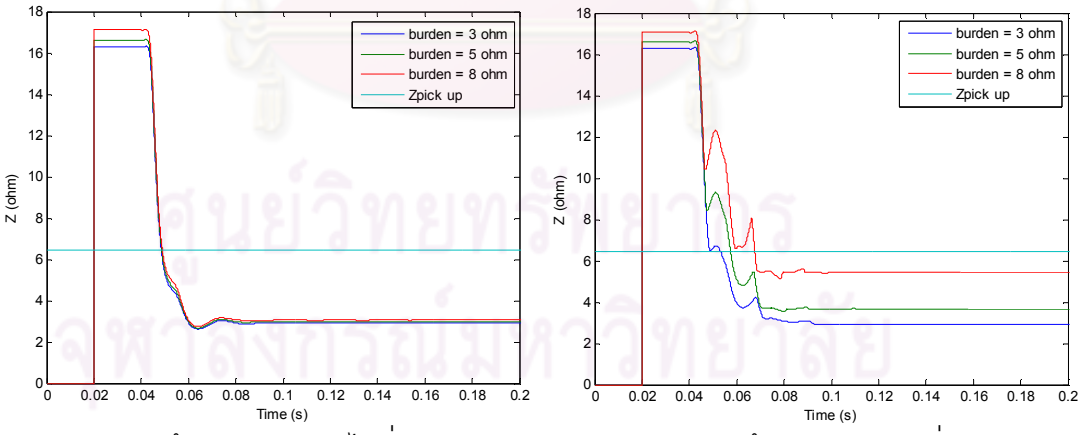
รูปที่ 5.28 b) แสดงกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (I_s) เมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีหม้อแปลงกระแสเกิดอิ่มตัว การเพิ่มขึ้นของเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสจะส่งผลให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวเร็วขึ้นและมีความรุนแรง ซึ่งดูได้จากกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ที่มากขึ้น และส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวมีค่าลดลง



a) หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว b) หม้อแปลงกระแสอิ่มตัว

รูปที่ 5.28 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อเบอร์แดนของหม้อแปลงกระแส
มีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง

รูปที่ 5.29 a) และ b) แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่อ่านได้จากรีเลย์ระยะทางเมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวและกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว หลังจากเกิดความผิดพร่องจะเห็นว่ากรณีเกิดความผิดพร่องในโซนป้องกันที่ 1 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้เมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าลดลงจนค่าอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำกว่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้งไว้คือ6.43 Ω รีเลย์จึงทำงานซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีค่าเพิ่มขึ้น นทำให้เวลาการทำงานของรีเลย์ช้าลง



a) หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว b) หม้อแปลงกระแสอิ่มตัว

รูปที่ 5.29 ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อเบอร์แดนของหม้อแปลงกระแส
มีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง

ตารางที่ 5.8 แสดงเวลาการทำงานของรีเลย์ระยะทาง กล่าวคือ เมื่อเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เวลาการทำงานของรีเลย์กรณีที่หม้อแปลงไม่เกิดการอิ่มตัวและกรณีที่หม้อแปลงเกิดการอิ่มตัวมีการทำงานที่ช้าลง เพราะการเพิ่มขึ้นของเบอร์เดนจะทำให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าลดลงจึงทำให้อิมพีแดนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นและจะส่งผลให้มีเวลาการทำงานที่ช้าลงตามไปด้วย

ส่วนกรณีที่มีค่าเบอร์เดนค่าเดียวกันจะเห็นว่ากรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวจะทำให้รีเลย์ทำงานช้ากว่ากรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว ทั้งนี้ เพราะว่ากรณีหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวจะทำให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าน้อยกว่ากรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวและทำให้มีค่าอิมพีแดนซ์ที่มากกว่าจึงส่งผลให้มีเวลาการทำงานที่ช้าลง

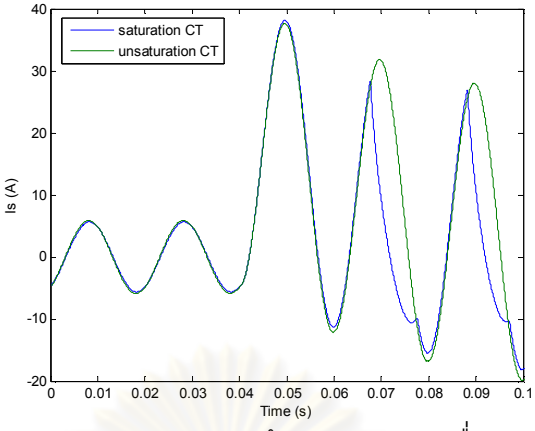
ตารางที่ 5.8 ผลกระทบของ Burden ต่อเวลาการทำงานของรีเลย์รีเลย์ระยะทาง

Burden (Ω)	เวลาการทำงานของรีเลย์ (ms)	
	CT ไม่อิ่มตัว	CT อิ่มตัว
3	148.5	153.3
5	148.7	157.5
8	149	167.7

5.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้า

รูปที่ 5.30 แสดงผลกระทบของอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้าเมื่อ X/R = 50 โดยมีเบอร์เดนเท่ากับ 1 Ω และ Fault Resistance (R_f) = $1x10^{-9}$ Ω ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว (สีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว (สีเขียว) การอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสจะส่งผลให้กระแสทางด้านทุติยภูมิมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์และส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวมีค่าลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

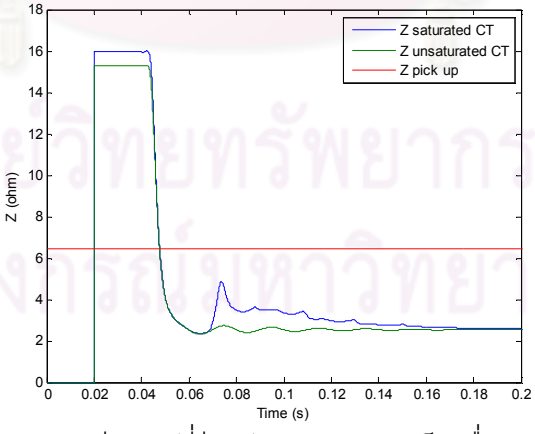


รูปที่ 5.30 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อ X/R = 50 Ω

ในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง

รูปที่ 5.31 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่อ่านได้จากรีเลย์ระยะทางที่ทำให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว (สีฟ้า) เปรียบเทียบกับกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว (สีเขียว) หลังจากเกิดความผิดพร่องจะเห็นว่ากรณีเกิดความผิดพร่องในโซนป้องกันที่ 1 จะทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าลดลงจนค่าอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำกว่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้งไว้คือ 6.43 Ω รีเลย์จึงทำงาน

เวลาการทำงานของรีเลย์ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวและไม่เกิดการอิ่มตัว รีเลย์จะทำงานที่เวลา 147.6 ms ทั้งนี้เพราะว่าในช่วงที่ค่าอิมพีแดนซ์ลดลงต่ำกว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้งไว้กรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวและไม่เกิดการอิ่มตัวมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันจึงทำให้เวลาเท่ากัน

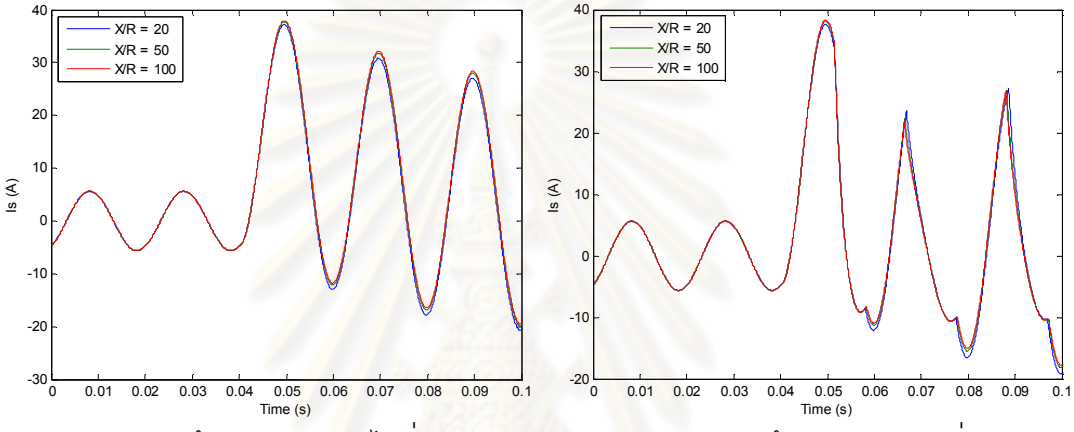


รูปที่ 5.31 ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อ X/R = 50 Ω

รูปที่ 5.32 a) แสดงกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (I_s) เมื่อ X/R ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดอิ่มตัว การเพิ่มขึ้นของ X/R ของระบบจะส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เพราะว่า X/R ของระบบส่งผลให้เกิดผลของ

องค์ประกอบกระแสตรง (DC component) หรือ กระแสออฟเซตของกระแสผิดพร่องแต่ในกรณีนี้จะเกิดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในช่วงแรกก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัว

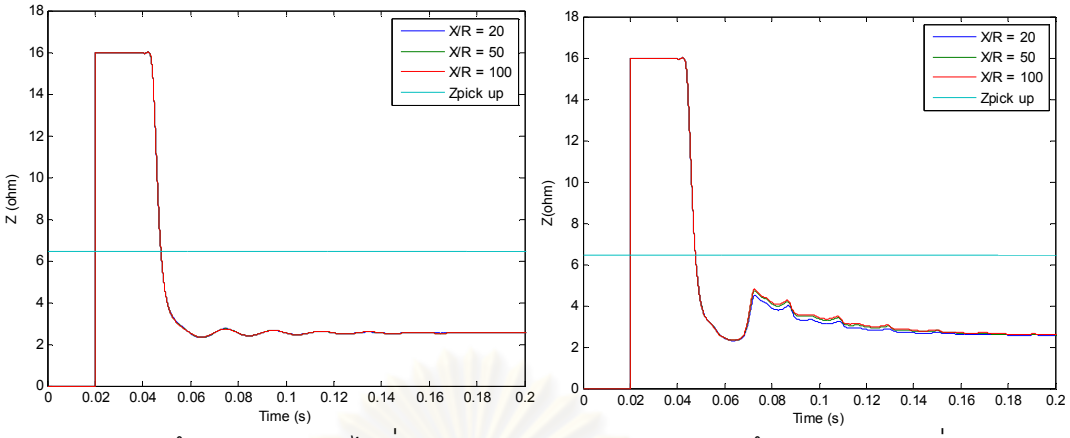
รูปที่ 5.32 b) แสดงกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (I_s) เมื่อ X/R ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ในกรณีหม้อแปลงกระแสเกิดอิ่มตัว การเพิ่มขึ้นของ X/R ของระบบจะส่งผลให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวเร็วขึ้นและมีความรุนแรง ซึ่งดูได้จากกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ที่มากขึ้นและส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวมีค่าลดลง



a) หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว b) หม้อแปลงกระแสอิ่มตัว

รูปที่ 5.32 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อ X/R ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง

รูปที่ 5.33 a) และ b) แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่อ่านได้จากรีเลย์ระยะทางเมื่อ X/R ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวและในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว หลังจากเกิดความผิดพร่องจะเห็นว่ากรณีเกิดความผิดพร่องในโซนป้องกันที่ 1 จะทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าลดลงจนค่าอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำกว่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้งไว้คือ 6.43 Ω รีเลย์จึงทำงานซึ่งจะเห็นว่าในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวและไม่เกิดการอิ่มตัวรีเลย์จะทำงานที่เวลา 147.6ms ทั้งนี้ เพราะว่าในช่วงที่ค่าอิมพีแดนซ์ลดลงต่ำกว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้งไว้กรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวและไม่เกิดการอิ่มตัวมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันจึงทำให้เวลาการทำงานของรีเลย์มีค่าเท่ากัน



a) หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว b) หม้อแปลงกระแสอิ่มตัว

รูปที่ 5.33 ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อ X/R ของระบบ
มีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง

ตารางที่ 5.9 แสดงเวลาการทำงานของรีเลย์ระยะทาง จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้าในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวและกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวขึ้นจะทำให้เวลาการทำงานของรีเลย์มีค่าเท่ากันคือที่ 145.4ms ทั้งนี้เพราะว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้าจะไม่ส่งผลทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบมีการเปลี่ยน แต่การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้าจะส่งผลต่อองค์ประกอบกระแสตรง (DC component) หรือกระแสออฟเซตของกระแสผิดพร่องเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

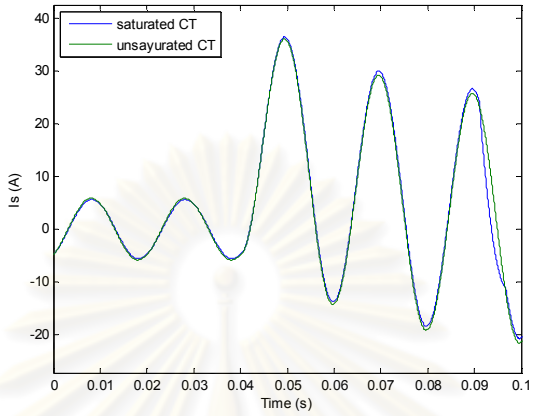
ตารางที่ 5.9 ผลกระทบของ X/R ต่อเวลาการทำงานของรีเลย์รีเลย์ระยะทาง

X/R	เวลาการทำงานของรีเลย์ (ms)	
	CT ไม่อิ่มตัว	CT อิ่มตัว
20	147.6	147.6
50	147.6	147.6
100	147.6	147.6

5.2.3 ผลกระทบของขนาดกระแสผิดพร่อง

รูปที่ 5.34 แสดงผลกระทบของขนาดกระแสผิดพร่องที่ 3818.37 A โดยมี Fault Resistance (R_f) = 0.1 Ω, เบอร์เดนเท่ากับ 0.7 Ω และระบบไฟฟ้ามีอัตราส่วน X/R = 10 ที่ทำให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว (สีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว

(สีเขียว) การอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสจะส่งผลให้กระแสทางด้านทุติยภูมิมีรูปร่างที่ผิดเพี้ ยนไปจากรูปคลื่นไซน์และส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวมีค่าลดลง

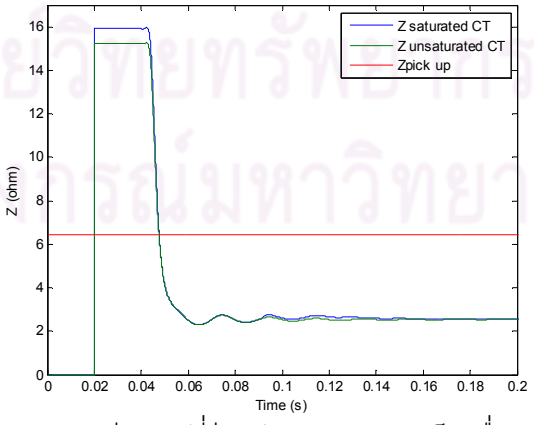


รูปที่ 5.34 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อ R_f = 0.1 Ω

ในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง

รูปที่ 5.35 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่อ่านได้จากรีเลย์ระยะทางที่ทำให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว (สีฟ้า) เปรียบเทียบกับกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว (สีเขียว) หลังจากเกิดความผิดพร่องจะเห็นว่ากรณีเกิดความผิดพร่องในโซนป้องกันที่ 1 จะทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าลดลงจนค่าอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำกว่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้ งไว้คือ 6.43 Ω รีเลย์จึงทำงาน

เวลาการทำงานของรีเลย์ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวรีเลย์จะทำงานที่เวลา 145.4 ms และในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวรีเลย์จะทำงานที่เวลา 145.5 ms

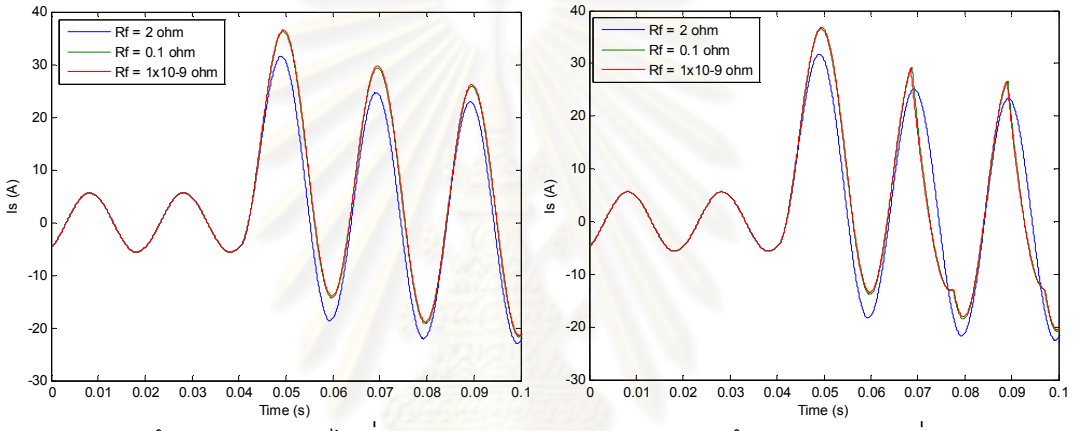


รูปที่ 5.35 ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อ R_f = 0.1Ω

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.36 a) แสดงกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (I_s) เมื่อกระแสผิดพร่องมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดอิ่มตัว การเพิ่มขึ้นของกระแสผิดพร่องจะส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าสูงขึ้น

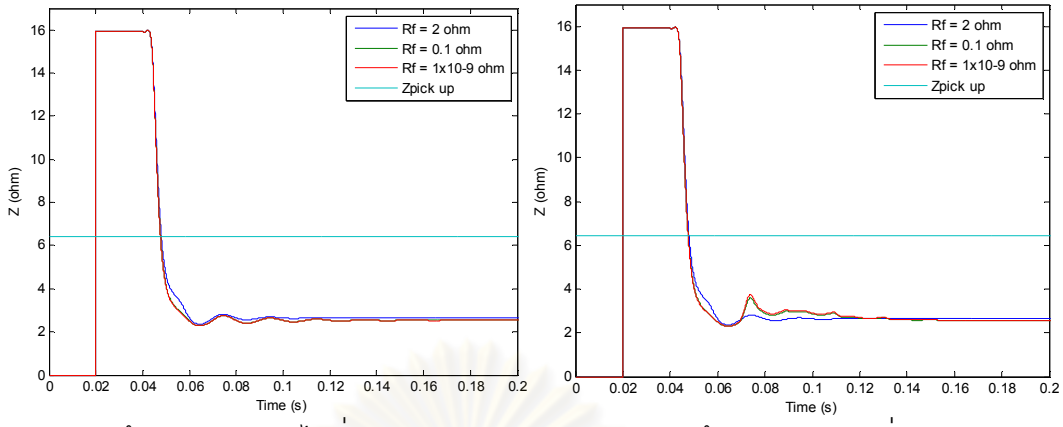
รูปที่ 5.36 b) แสดงกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (I_s) เมื่อกระแสผิดพร่องมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีหม้อแปลงกระแสเกิดอิ่มตัว การเพิ่มขึ้นของกระแสผิดพร่องจะส่งผลให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวเร็วขึ้นและมีความรุนแรง ซึ่งดูได้จากกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ที่มากขึ้นและจะส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าสูงขึ้นด้วย



a) หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว b) หม้อแปลงกระแสอิ่มตัว

รูปที่ 5.36 กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อกระแสผิดพร่องมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง

รูปที่ 5.37 a) และ b) แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่อ่านได้จากรีเลย์ระยะทางเมื่อกระแสผิดพร่องมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวและกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว หลังจากเกิดความผิดพร่องจะเห็นว่ากรณีเกิดความผิดพร่องในโซนป้องกันที่ 1 จะทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าลดลงจนค่าอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำกว่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้งไว้คือ 6.43 Ω รีเลย์จึงทำงานซึ่งจะเห็นว่าเมื่อกระแสผิดพร่องมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เวลาการทำงานของรีเลย์เร็วขึ้นตามไปด้วย



a) หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว b) หม้อแปลงกระแสอิ่มตัว

รูปที่ 5.37 ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อกระแสผิดพร่อง
มีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของการจำลองรีเลย์ระยะทาง

ตารางที่ 5.10 แสดงผลกระทบของกระแสผิดพร่อง ต่อเวลาการทำงานของรีเลย์ระยะทาง จะเห็นว่าเมื่อทำการลด R_f คือเป็นการเพิ่มขึ้นของกระแสผิดพร่อง จะส่งผลต่อเวลาการทำงานของรีเลย์ กล่าวคือในกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวและกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวจะทำให้เวลาการทำงานของรีเลย์มีค่าเร็วขึ้น ทั้งนี้ เพราะว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสผิดพร่องจะทำให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าลดลง จึงส่งผลให้รีเลย์ทำงานเร็วขึ้น

เมื่อพิจารณาที่กระแสผิดพร่องค่าเดียวกันจะเห็นว่าในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวจะทำงานช้ากว่ากรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว ทั้งนี้ เพราะว่ากรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวจะทำให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิมีค่าลดลงจึงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าสูงขึ้น จึงส่งผลให้รีเลย์ทำงานช้าลง

ตารางที่ 5.10 ผลกระทบของกระแสผิดพร่องต่อเวลาการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

กระแสผิดพร่อง (A)	เวลาการทำงานของรีเลย์ (ms)	
	CT ไม่อิ่มตัว	CT อิ่มตัว
3818.37 (R_f = 2 Ω)	148	148.2
3889.08 (R_f = 0.1 Ω)	147.6	147.7
3995.15 (R_f = 1x10^{-9} Ω)	147.1	147.2

5.3 ผลการจำลองของแบบจำลองรีเลย์ผลต่าง

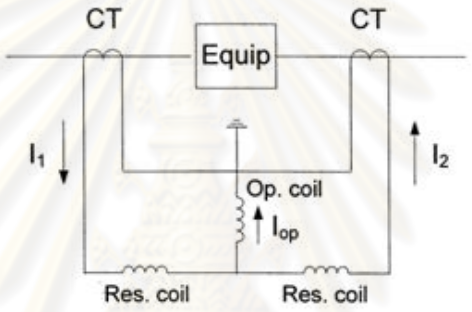
รีเลย์ผลต่างเปอร์เซ็นต์ (Percentage Differential Relay) ประกอบด้วยขดลวดสองชุด คือ ขดลวดทำงาน (Operating Coil หรือ Op.coil) และขดลวดต้านการทำงาน (Restraining Coil หรือ Res.coil) ดังรูปที่ 5.38

กระแสที่ไหลผ่านขดลวดทำงาน (I_{op}) หาตามสมการ

$$I_{op} = I_2 - I_1$$

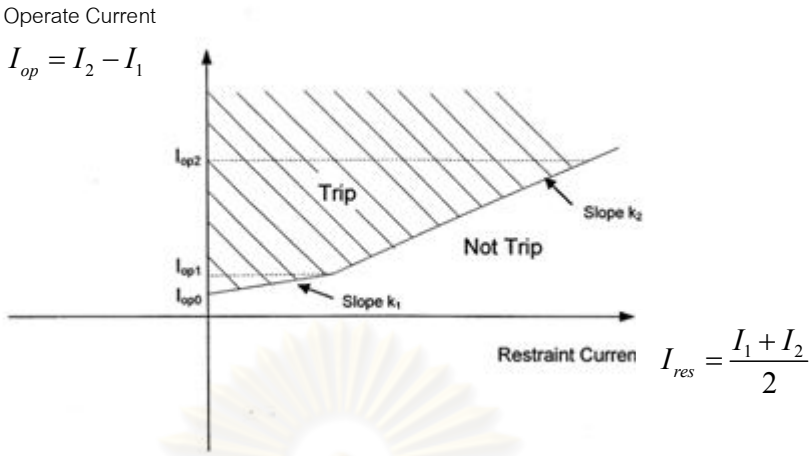
กระแสที่ไหลผ่านขดลวดต้านทำงาน (I_{res}) หาตามสมการ

$$I_{res} = \frac{I_1 + I_2}{2}$$



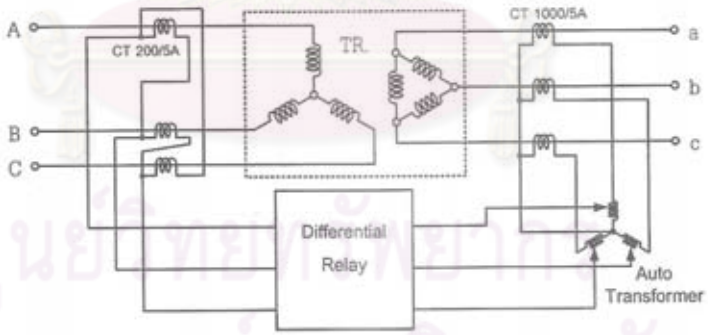
รูปที่ 5.38 รีเลย์ผลต่างเปอร์เซ็นต์

ลักษณะเฉพาะของรีเลย์ผลต่างแสดงในรูปที่ 5.39 บริเวณแรเงาคือ บริเวณที่รีเลย์ทำงาน เมื่อเกิดความผิดพร่องนอกเขตป้องกัน $\frac{I_1 + I_2}{2}$ จะมีค่าสูง จากกราฟจะเห็นว่า $I_2 - I_1$ จะมีค่าสูงด้วย รีเลย์จึงมีความไวต่ำกรณีเกิดความผิดพร่องนอกเขตป้องกันโดยความไวจะช้าหรือเร็วขึ้น กับความชันที่เลือกใช้ กรณีสามารถกำหนดได้ 2 ค่าความชัน คือ k_1 และ k_2 ค่า I_{op2} เป็นค่ากระแสผลต่างสูงสุด ถ้าผลต่างกระแสเกินค่านี้ รีเลย์ทำงานทันที I_{op1} เป็น Break Point ระหว่างความชัน k_1 และ k_0 ค่า I_{op0} เป็นค่ากระแสผลต่างที่ยอมรับได้ ถ้าผลต่างกระแสมีค่าน้อยกว่าค่านี้ รีเลย์ไม่ทำงานไม่ว่าค่า I_{res} จะมีค่าเท่าไรก็ตาม

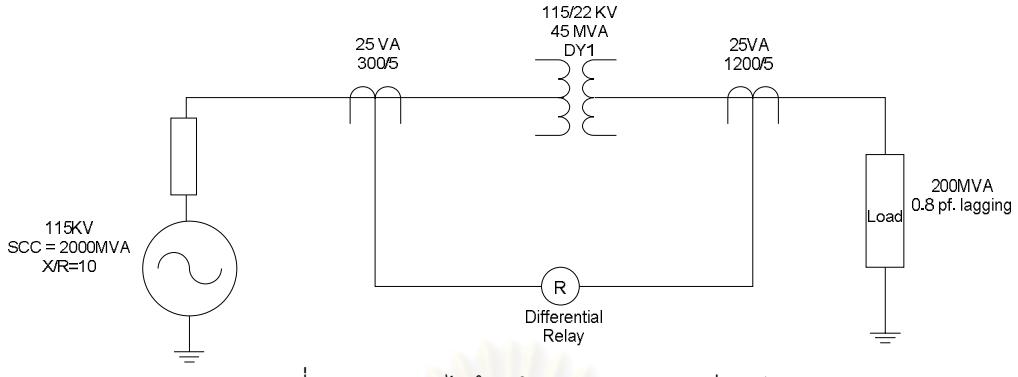


รูปที่ 5.39 ลักษณะสมบัติของรีเลย์ผลต่างเปอร์เซ็นต์

ปัญหาของการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยรีเลย์ผลต่าง คือ กระแสที่ไหลทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงมีค่าไม่เท่ากัน จึงต้องชดเชยกระแสทั้งสองด้านให้รีเลย์ผลต่างมองเห็นเท่ากัน ตัวอย่าง กรณีหม้อแปลงที่ต่อแบบ $Y-\Delta$ และกระแสมีเฟสต่างกัน 30° จึงต้องทำการเลื่อนเฟสให้ตรงกันโดยต่อหม้อแปลงกระแสทางด้าน Δ ของหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Y และต่อ CT ทางด้าน Y ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Δ ดังรูปที่ 5.40 จากนั้นคำนวณ%Tap ของหม้อแปลงออโต้ (Auto Transformer) เพื่อชดเชยผลต่างของค่ากระแสให้เท่ากัน



รูปที่ 5.40 การต่อหม้อแปลงกระแสเพื่อชดเชยการเลื่อนเฟส และ การต่อหม้อแปลงออโต้เพื่อปรับค่ากระแส



รูปที่ 5.41 ระบบไฟฟ้าสำหับการทดลองรีเลย์ผลต่าง

ระบบไฟฟ้าสำหรับการทดลองเป็นดังรูปที่ 5.41 ระบบประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า 115 kV ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าลัดวงจรเท่ากับ2000 MVA ค่า X/R เท่ากับ 10 จ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า 115 kV/22 kV ขนาด 45 MVA, %Z = 12 ค่า X/R เท่ากับ 10 ต่อแบบ DY1 โหลดที่บัสมีขนาด 200 MVA 0.9 pf lagging ล้าหลัง รีเลย์ผลต่างต่อคร่อมหม้อแปลงตามรูปที่ 5.41

การออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับรีเลย์ผลต่าง

ด้าน 115 kV

กระแสพิกัดของหม้อแปลงทางด้าน 115 kV

$$= \frac{45\times10^{6}}{\sqrt{3}\times115\times10^{3}} = 225.91A$$

เลือกอัตราส่วนหม้อแปลงกระแส (CT) เท่ากับ 300/5 ต่อแบบ Y ดังนั้นกระแสทางด้านทุติยภูมิของ CT ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเท่ากับ

$$225.91\times\frac{5}{300} = 3.77A$$

ด้าน 22 kV

กระแสพิกัดของหม้อแปลงทางด้าน 22 kV

$$= \frac{45\times10^{6}}{\sqrt{3}\times22\times10^{3}} = 1180.94A$$

เลือกอัตราส่วนหม้อแปลงกระแส (CT) เท่ากับ 1200/5 ต่อแบบ D1เพื่อเลื่อนเฟสกระแสทางด้านทุติยูมิของหม้อแปลงให้ตรงกับเฟสของกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ดังนั้นกระแสทางด้านทุติยภูมิของ CT ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเท่ากับ

$$1180.92\times\frac{5}{1200} = 4.92A$$

ดังนั้นLine Current ของ CT เท่ากับ $4.92\times\sqrt{3} = 8.52A$

กระแสด้านทุติยภูมิของ CT หน้าหม้อแปลงเท่ากับ 3.77 A กระแสทางด้วนทุติยภูมิของ CT หลังหม้อแปลงเท่ากับ 8.52 A มีค่าไม่เท่ากันจึงใช้ Auxiliary CT หรือ Interposing CT เป็นแบบ Autotransformer Y-Connected ต่อกับ CT ด้าน 22 kV โดยมีจำนวน Turn ดังนี้

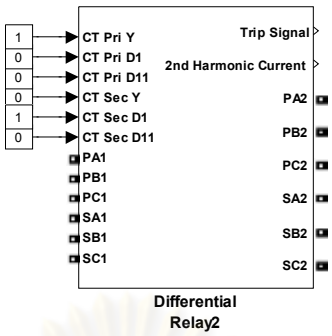
$$\text{CT Turn Ratio} = \frac{8.52}{3.77} = 2.25$$

ดังนั้นต้องตั้งTap ที่ 225% ของ Auto Transformer จึงจะได้กระแสเข้ารีเลย์ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง เท่ากับ3.77 A

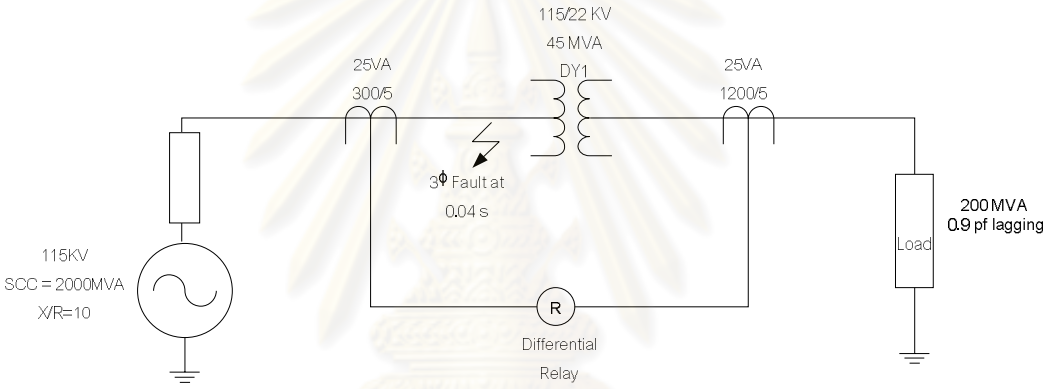
รูปที่ 5.42 แสดงข้อมูลการตั้งค่าของแบบจำลองรีเลย์ผลต่าง กำหนดค่า I_{op0} เท่ากับ 0.25A ค่า I_{op1} เท่ากับ 0.625 A ค่า I_{op2} เท่ากับ 14 A ค่าความชัน k_1 เท่ากับ 0.1 ค่าความชัน k_2 เท่ากับ 0.2 ค่า %Tap ของ Auto Transformer ตั้งไว้ที่ 225% ค่าเวลาการทำงานของรีเลย์หลังจากพบความผิดพร่อง (Tdelay) เท่ากับ 0 วินาที คือให้รีเลย์ทำงานทันทีหากตรวจพบว่าเกิดความผิดพร่องภายในโซนป้องกัน ค่าอัตราส่วนหม้อแปลงกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเท่ากับ 300/5 ค่าอัตราส่วนหม้อแปลงกระแสทางด้านทุติภูมิของหม้อแปลงเท่ากับ 1200/5 ค่า 2nd Harmonic - Current Threshold Blocking Trip ตั้งค่าไว้ที่1000 หมายความว่าถ้าระบบมีฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 เกิน 1000 รีเลย์จึงไม่ทำการทริป

กำหนดอินพุตแบบจำลองรีเลย์ขา 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 เท่ากับ 1, 0, 0, 0, 0 และ 1 ตามลำดับดังรูปที่5.43 หมายความว่ากำหนดการต่อ CT ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงแบบ Y และการต่อ CT ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแบบ D1

รูปที่ 5.42 ข้อมูลการตั้งค่าแบบจำลองรีเลย์ผลต่าง



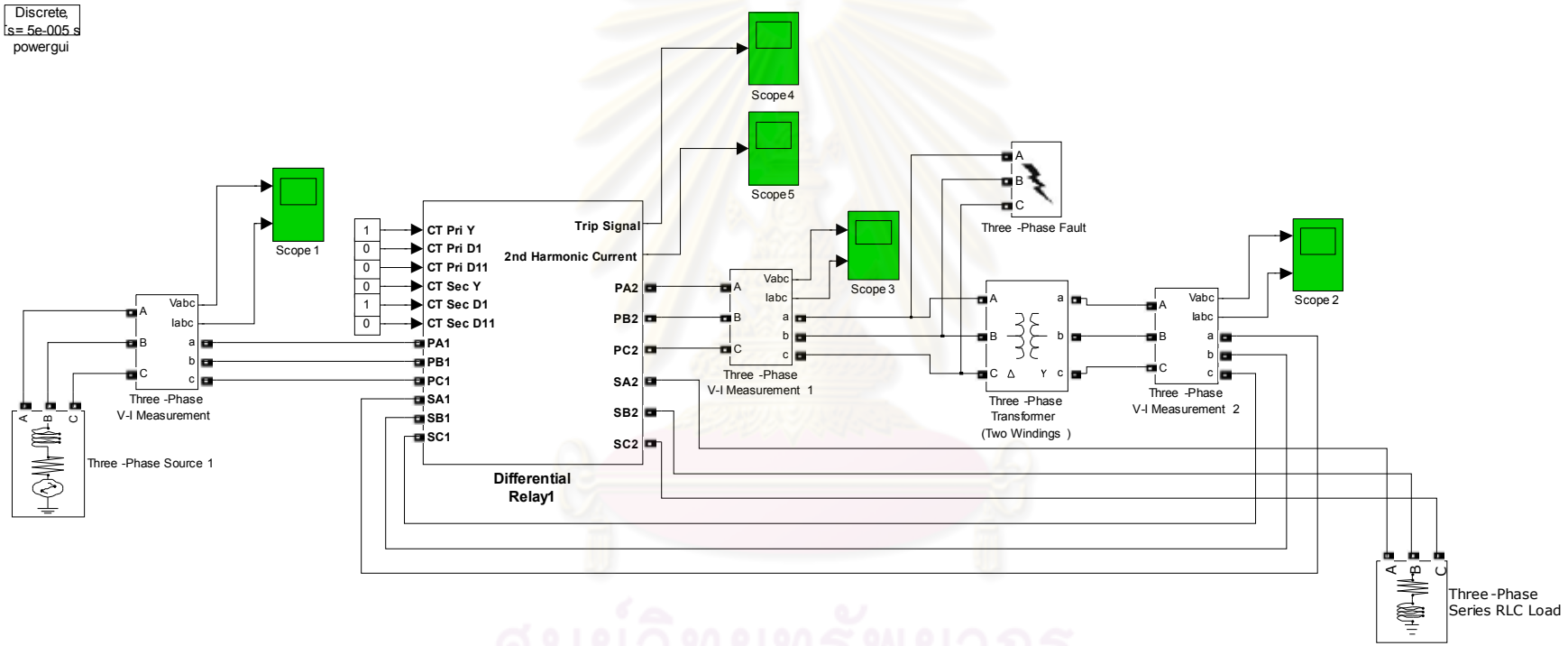
รูปที่ 5.43 กำหนด CT ต่อแบบ Y ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงแบบ
และ CTต่อแบบ D1ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแบบ



รูปที่ 5.44 ระบบไฟฟ้าสำหรับการทดสอบรีเลย์ผลต่างเมื่อเกิดความผิดพร่อง

รูปที่ 5.44 แสดงระบบไฟฟ้าสำหรับการทดสอบรีเลย์ผลต่าง กรณีเกิดความผิดพร่องแบบสามเฟสที่เวลา 0.04 วินาที ซึ่งอยู่ในโซนป้องกัน รูปที่5.45 แสดงระบบไฟฟ้าจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สำหรับการทดสอบรีเลย์ผลต่าง

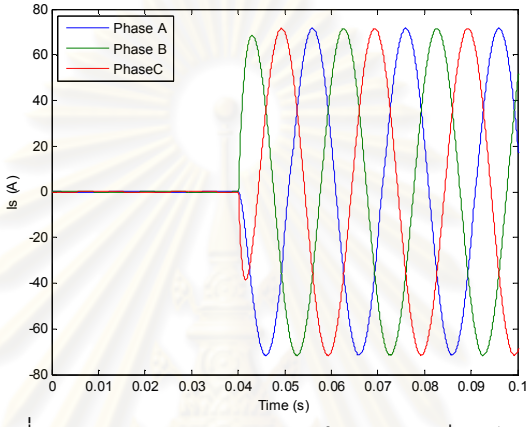
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.45 ระบบไฟฟ้าจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สำหรับการทดสอบรีเลย์ผลต่าง

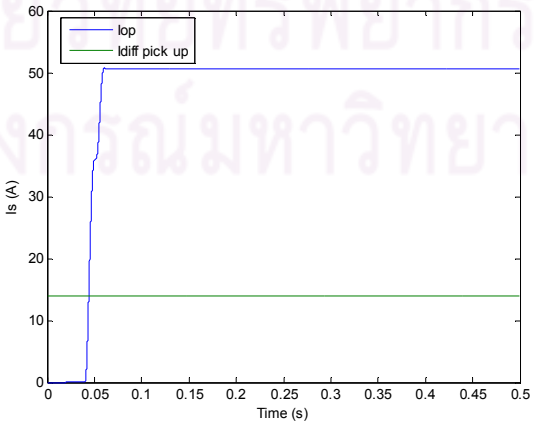
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.46 แสดงกระแสทุติยภูมิ (I_2-I_1) ของหม้อแปลงกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ผลต่างเมื่อหม้อแปลงกระแสมีเบอร์เดนเท่ากับ 0.5 **Ω**, ระบบไฟฟ้ามีอัตราส่วน X/R = 10 โดยเกิดความผิดพร่องแบบ 3 เฟส ที่เวลา 0.04 วินาที โดยมี Fault Resistance (R_f)ขนาด 20 **Ω** ต่อเฟส ในกรณีนี้ หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์ พบว่ารีเลย์ทำงานที่เวลา 40.3 ms นับจากเริ่มเกิดความผิดพร่องขึ้ น

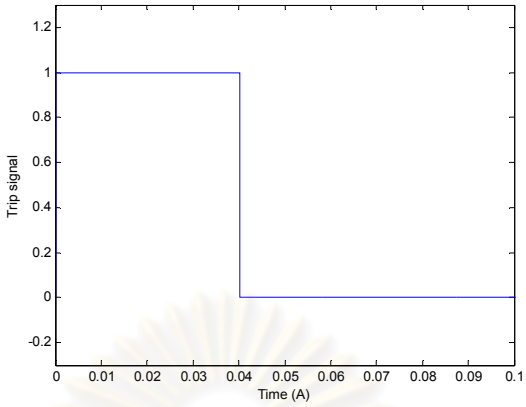


รูปที่ 5.46 กระแสทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง (I_2-I_1)
ในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว

รูปที่ 5.47แสดงค่ากระแสทำงาน หรือ กระแสผลต่าง (I_{OP}) (สีฟ้า) เทียบกับค่าขอบเขตกระแสผลต่างสูงสุด ($I_{Diff\ Pick\ up}$) (สีเขียว) พบว่าค่ากระแสทำงานมีค่าเกินค่ากระแสผลต่างสูงสุด ทำให้สัญญาณทริปของรีเลย์เปลี่ยนจาก 1 (ปิดวงจร) เป็น 0 (เปิดวงจร) ที่เวลา 40.3 ms ดังรูป 5.48 เพื่อตัดความผิดพร่องออกจากระบบ



รูปที่ 5.47 กระแสทำงานเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตกระแสผลต่างสูงสุด
ในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว



รูปที่ 5.48 สัญญาณทริปของรีเลย์ผลต่าง
ในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว

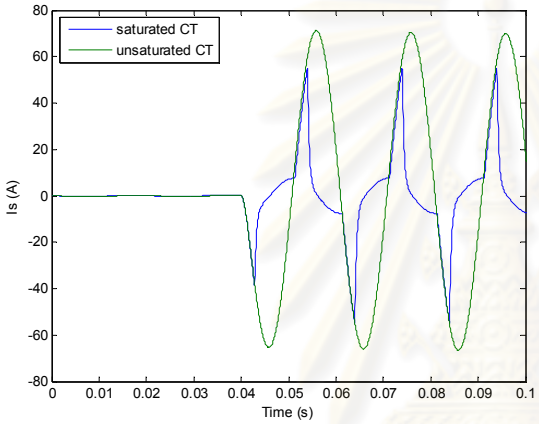
กรณีศึกษาผลกระทบจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสใช้ในการจำลองการทำงานของรีเลย์ผลต่าง แสดงในตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 กรณีศึกษาที่ใช้ในการจำลองการทำงานของรีเลย์ผลต่าง

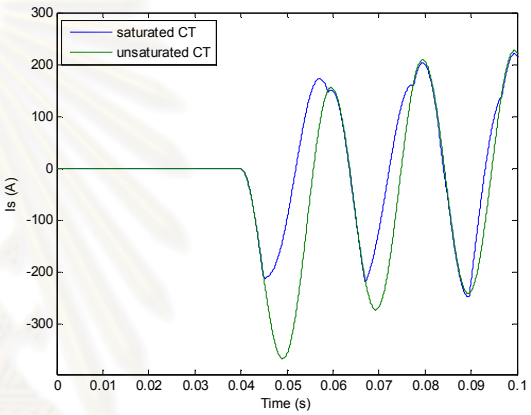
ผลกระทบจาก	พารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง	พารามิเตอร์คงที่
เบอร์เดน	เบอร์เดน = 3 Ω เบอร์เดน = 5 Ω เบอร์เดน = 10 Ω	R_f = 20 Ω X/R = 10
อัตราส่วน X/R	X/R = 20 X/R = 50 X/R = 100	เบอร์เดน = 0.5 Ω R_f = 1 Ω
กระแสลัดวงจร	R_f = 10 Ω R_f = 5 Ω R_f = $1x10^{-9}$ Ω	เบอร์เดน = 0.5 Ω X/R = 10

5.3.1 ผลการจำลองการทำงานของรีเลย์ผลต่างเมื่อหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ

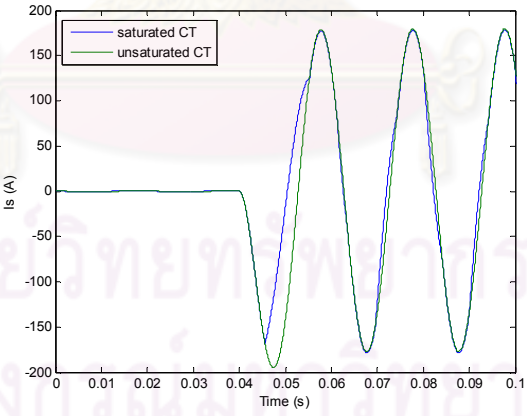
รูปที่ 5.49 a),b) และ c) แสดงกระแสทุติยภูมิ (I_2-I_1) ของหม้อแปลงกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ผลต่างที่ทำให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว (สีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว (สีเขียว) เมื่อหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวด้วยปัจจัยต่าง ๆ การอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสจะส่งผลให้กระแสทางด้านทุติยภูมิมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์และส่งผลให้ขนาดของกระแสทุติยภูมิในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวมีค่าลดลง



a) ผลของ Burden



b) ผลของ X/R ของระบบ

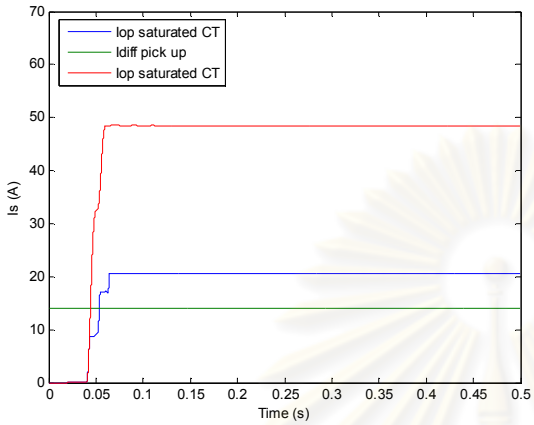


c) ผลของกระแสผิดพร่อง

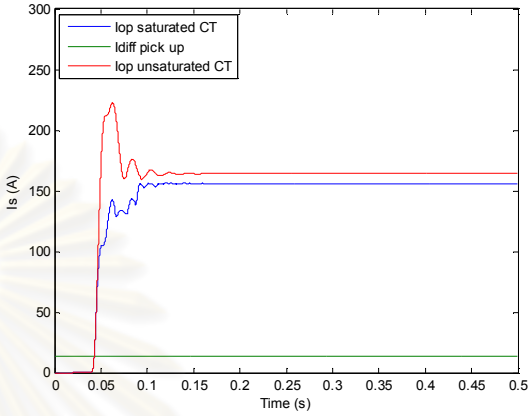
รูปที่ 5.49 การอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ของรีเลย์ผลต่าง

รูปที่ 5.50 a),b) และ c) แสดงค่ากระแสทำงาน หรือ กระแสผลต่าง (I_{OP}) กรณีหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว (สีฟ้า) และกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่อิ่มตัว (สีแดง) เทียบกับค่าขอบเขตกระแสผลต่างสูงสุด ($I_{Diff\ Pick\ up}$) (สีเขียว) ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวด้วยปัจจัยต่าง ๆ

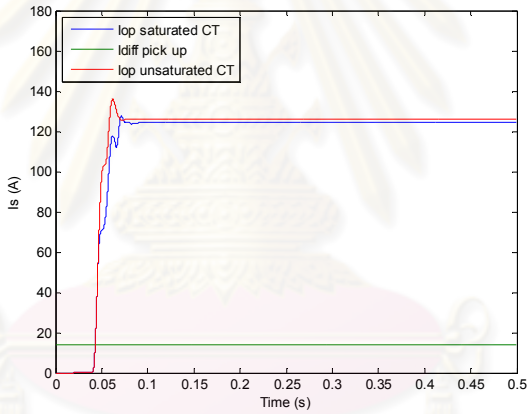
พบว่าค่ากระแสทำงานมีค่าเกินค่ากระแสผลต่างสูงสุดทั้ง3 กรณี ทำให้สัญญาณ Trip ของรีเลย์เปลี่ยนจาก 1 (ปิดวงจร) เป็น 0 (เปิดวงจร) ที่เวลา 40.3



a) ผลของ Burden



b) ผลของ X/R ของระบบ



c) ผลของกระแสผิดพร่อง

รูปที่ 5.50 กระแสทำงานเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตกระแสผลต่างสูงสุด
เมื่อหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ

ตารางที่ 5.12 แสดงเวลาการทำงานของรีเลย์ผลต่างจะเห็นว่ารีเลย์ผลต่างจะทำงานที่เวลาเดียวกันไม่ว่าหม้อแปลงกระแสจะเกิดการอิ่มตัวด้วยกรณีใด ๆ ก็ตามทั้งนี้ เพราะว่ารีเลย์ผลต่างจะสั่งให้รีเลย์ทำงานทันทีทันใดหากตรวจพบสิ่งผิดปกติเกิดขึ้น ในโซนป้องกันและเกิดกระแสผลต่างขึ้น โดยไม่คำนึงถึงว่าหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวหรือไม่ก็ตามจึงส่งผลให้รีเลย์ทำงานที่เวลาเดียวกัน

ตารางที่ 5.12 เวลาการทำงานของรีเลย์รีเลย์ผลต่างเมื่อเกิดการอิ่มตัวเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ

Burden (Ω)	X/R	กระแสผิดพร่อง (A)	เวลาการทำงานของรีเลย์ (ms)	
			CT ไม่อิ่มตัว	CT อิ่มตัว
3	20	5303.3 (R_f = 10 Ω)	40.3	40.3
5	50	9758.07 (R_f = 5 Ω)	40.3	40.3
10	100	9970.2 (R_f = 1x10^{-9} Ω)	40.3	40.3

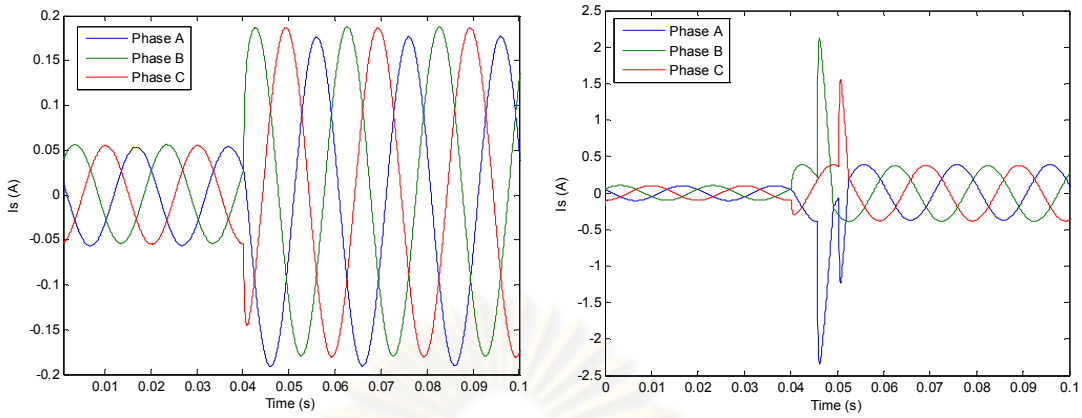
5.3.2 กรณีรีเลย์ผลต่างทำงานผิดพลาด

กรณีที่รีเลย์ผลต่างทำงานผิดพลาด คือ เมื่อเกิดความผิดพร่องนอกโซนป้องกัน รีเลย์ควรจะไม่ทำงาน แต่เมื่อเกิดความผิดพร่องนอกโซนป้องกันและหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวขึ้ นจะทำให้รีเลย์ผลต่างทำงานผิดพลาดได้

5.3.2.1 กรณีผลของ Burden

รูปที่ 5.51 (a) แสดงกระแสทุติยภูมิ (I_2-I_1) ของหม้อแปลงกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ผลต่างเมื่อหม้อแปลงกระแสมีเบอร์เดนเท่ากับ 3 Ω, ระบบไฟฟ้ามีอัตราส่วน X/R = 10 โดยเกิดความผิดพร่องแบบ 3 เฟส ที่เวลา 0.04 วินาที โดยมี Fault Resistance (R_f) ขนาด 20 Ω และเกิดความผิดพร่องนอกโซนป้องกันในกรณีนี้จะเห็นว่าจะไม่เกิดกระแสผลต่างขึ้ นในระบบจึงส่งผลทำให้รีเลย์ไม่ทำงาน

รูปที่ 5.51 (b) แสดงกระแสทุติยภูมิ (I_2-I_1) ของหม้อแปลงกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ผลต่างเมื่อหม้อแปลงกระแสมีเบอร์เดนเท่ากับ 7 Ω, ระบบไฟฟ้ามีอัตราส่วน X/R = 10 โดยเกิดความผิดพร่องแบบ 3 เฟส ที่เวลา 0.04 วินาที โดยมี Fault Resistance (R_f) ขนาด 20 Ω และเกิดความผิดพร่องนอกโซนป้องกันในกรณีนี้จะเห็นว่าหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวไม่เท่ากันส่งผลให้เกิดกระแสผลต่างขึ้ นในระบบจึงส่งผลให้รีเลย์ทำงาน



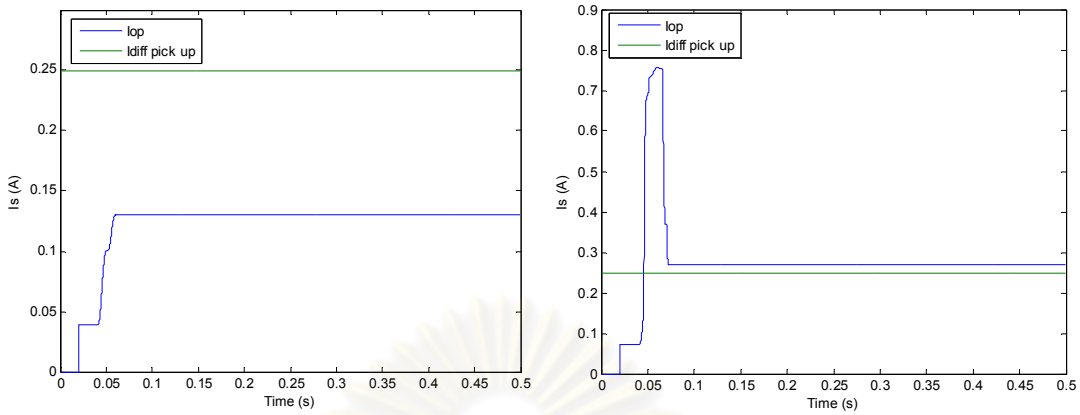
a) Burden = 3 Ω b) Burden = 7 Ω

รูปที่ 5.51 กระแสทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง (I_2-I_1)
ในสภาวะรีเลย์ผลต่างทำงานผิดพลาดเนื่องจากผลของ Burden

รูปที่ 5.52 (a) แสดงค่ากระแสทำงาน หรือ กระแสผลต่าง (I_{OP}) (สีฟ้า) เทียบกับค่าขอบเขตกระแสผลต่างสูงสุด ($I_{Diff\ Pick\ up}$) (สีเขียว) ในกรณีเบอร์เดนเท่ากับ 3 Ω พบว่าค่ากระแสทำงานมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสผลต่างสูงสุด ทำรีเลย์ไม่ทำงานคือสัญญาณทริปของรีเลย์เป็น 1 (ปิดวงจร) ตลอดเวลา

รูปที่ 5.52 (b) แสดงค่ากระแสทำงาน หรือ กระแสผลต่าง (I_{OP}) (สีฟ้า) เทียบกับค่าขอบเขตกระแสผลต่างสูงสุด ($I_{Diff\ Pick\ up}$) (สีเขียว) ในเบอร์เดนเท่ากับ 7 Ω พบว่าค่ากระแสทำงานมีค่ามากกว่าค่ากระแสผลต่างสูงสุดแสดงว่าเกิดกระแสผลต่างขึ้น ทำให้รีเลย์ทำงานจึงส่งผลให้สัญญาณทริปของรีเลย์เปลี่ยนจาก 1 (ปิดวงจร) เป็น 0 (เปิดวงจร) ที่เวลา 40.3 ms เพื่อตัดความผิดพร่องออกจากระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



a) Burden = 3 Ω b) Burden = 7 Ω

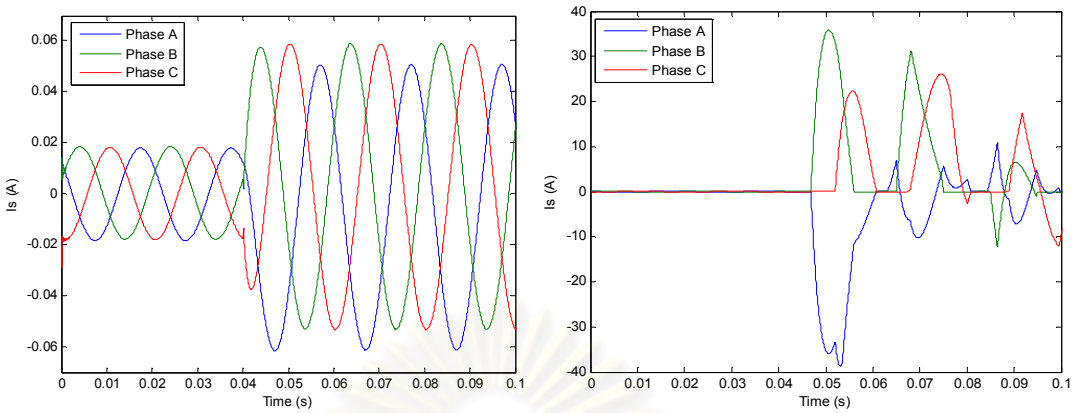
รูปที่ 5.52 กระแสทำงานเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตกระแสผลต่างสูงสุด ในสภาวะรีเลย์ผลต่างทำงานผิดพลาดเนื่องจากผลของ Burden

5.3.2.2 กรณีผลของขนาดกระแสผิดพร่อง

รูปที่ 5.53 (a) แสดงกระแสทุติยภูมิ (I_2-I_1) ของหม้อแปลงกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ผลต่างเมื่อหม้อแปลงกระแสมีเบอร์เดนเท่ากับ 0.5 Ω, ระบบไฟฟ้ามีอัตราส่วน X/R = 10 โดยเกิดความผิดพร่องแบบ 3 เฟส ที่เวลา 0.04 วินาที โดยมี Fault Resistance (R_f) ขนาด 5 Ω และเกิดความผิดพร่องนอกโซนป้องกันในกรณีนี้จะเห็นว่าจะไม่เกิดกระแสผลต่างขึ้น ในระบบจึงส่งผลทำให้รีเลย์ไม่ทำงาน

รูปที่ 5.53 (b) แสดงกระแสทุติยภูมิ (I_2-I_1) ของหม้อแปลงกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ผลต่างเมื่อหม้อแปลงกระแสมีเบอร์เดนเท่ากับ 0.5 Ω, ระบบไฟฟ้ามีอัตราส่วน X/R = 10 โดยเกิดความผิดพร่องแบบ 3 เฟส ที่เวลา 0.04 วินาที โดยมี Fault Resistance (R_f) ขนาด 0.01 Ω และเกิดความผิดพร่องนอกโซนป้องกันในกรณีนี้จะเห็นว่าหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวไม่เท่ากันส่งผลให้เกิดกระแสผลต่างขึ้น ในระบบจึงส่งผลให้รีเลย์ทำงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



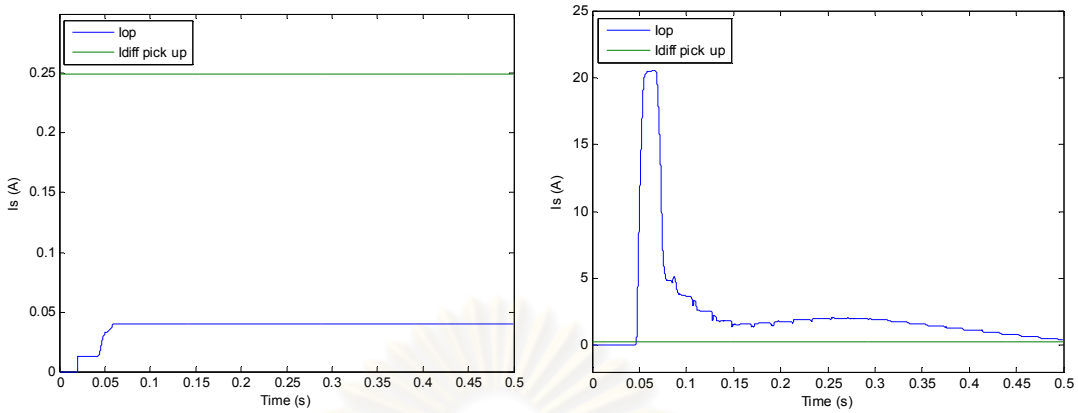
a) R_f= 5 Ω b) R_f= 0.01 Ω

รูปที่ 5.53 กระแสทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง (I_2-I_1)
ในสภาวะรีเลย์ผลต่างทำงานผิดพลาดเนื่องจากผลของกระแสผิดพร่อง

รูปที่ 5.54 (a) แสดงค่ากระแสทำงาน หรือ กระแสผลต่าง (I_{OP}) (สีฟ้า) เทียบกับค่าขอบเขตกระแสผลต่างสูงสุด ($I_{Diff\ Pick\ up}$) (สีเขียว) ในกรณี R_f= 5 Ω พบว่าค่ากระแสทำงานมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสผลต่างสูงสุด ทำรีเลย์ไม่ทำงานคือสัญญาณทริปของรีเลย์เป็น 1 (ปิดวงจร) ตลอดเวลา

รูปที่ 5.54 (b) แสดงค่ากระแสทำงาน หรือ กระแสผลต่าง (I_{OP}) (สีฟ้า) เทียบกับค่าขอบเขตกระแสผลต่างสูงสุด ($I_{Diff\ Pick\ up}$) (สีเขียว) ในกรณี R_f= 0.01 Ω พบว่าค่ากระแสทำงานมีค่ามากกว่าค่ากระแสผลต่างสูงสุดแสดงว่าเกิดกระแสผลต่างขึ้นทำให้รีเลย์ทำงานจึงส่งผลให้สัญญาณทริปของรีเลย์เปลี่ยนจาก 1 (ปิดวงจร) เป็น 0 (เปิดวงจร) ที่เวลา 40.3 ms เพื่อตัดความผิดพร่องออกจากระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



a) R_f= 5 Ω b) R_f= 0.01 Ω

รูปที่ 5.54 กระแสทำงานเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตกระแสผลต่างสูงสุด
ในสภาวะรีเลย์ผลต่างทำงานผิดพลาดเนื่องจากผลของกระแสผิดพร่อง

จะเห็นว่าในกรณีที่รีเลย์ผลต่างทำงานผิดพลาดไปจากภาวะปกติ คือ เมื่อเกิดความผิดพร่องนอกโซนป้องกัน รีเลย์ควรจะไม่ทำงาน แต่เมื่อเกิดความผิดพร่องนอกโซนป้องกันและหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวขึ้น จากผลของฮาร์มอนิกและผลของกระแสผิดพร่องจะทำให้รีเลย์ผลต่างทำงาน ซึ่งรีเลย์จะทำงานก็ต่อเมื่อหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวที่รุนแรงและจะส่งผลให้รีเลย์ผลต่างเห็นกระแส I_1 และ I_2 มีค่าต่างกันจึงเกิดกระแสผลต่างขึ้น ในระบบจึงทำให้รีเลย์จึงทำงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบเนื่องจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสต่อการทำงานของรีเลย์ป้องกัน โดยการจำลองระบบไฟฟ้าซึ่งมีหม้อแปลงกระแสและรีเลย์แบบต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อหาเวลาการทำงานของรีเลย์เปรียบเทียบกับกรณีที่หม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวกับกรณีที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว จากผลการจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

รีเลย์กระแสเกิน

- พบว่ารีเลย์จะทำงานช้าลงเมื่อหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวขึ้น เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ผลของเบอร์เดน ผลของอัตราส่วน X/R ของระบบ และผลของกระแสผิดพร่อง
- การเพิ่มขึ้นของเบอร์เดนส่งผลให้รีเลย์ทำงานช้าลงยิ่งเกิดการอิ่มตัวมากยิ่งส่งผลให้รีเลย์ทำงานช้าลง
- การเพิ่มขึ้นของกระแสผิดพร่องส่งผลให้รีเลย์ทำงานเร็วขึ้น แต่ยิ่งเกิดการอิ่มตัวรีเลย์จะทำงานขึ้นไม่มาก
- การเพิ่มขึ้นของ X/R ของระบบจะส่งผลให้รีเลย์จะทำงานช้าลงในกรณีหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว แต่รีเลย์จะทำงานเร็วขึ้นในกรณีหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัว

รีเลย์ระยะทาง

- พบว่ารีเลย์จะทำงานช้าลงเมื่อหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวขึ้น เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ผลของเบอร์เดน ผลของอัตราส่วน X/R ของระบบ และผลของกระแสผิดพร่อง
- การเพิ่มขึ้นของเบอร์เดนส่งผลให้รีเลย์ทำงานช้าลงยิ่งเกิดการอิ่มตัวมากยิ่งส่งผลให้รีเลย์ทำงานช้าลง
- การเพิ่มขึ้นของกระแสผิดพร่องส่งผลให้รีเลย์ทำงานเร็วขึ้น แต่ยิ่งเกิดการอิ่มตัวรีเลย์จะทำงานขึ้นไม่มาก
- การเพิ่มขึ้นของ X/R ของระบบจะไม่ส่งผลต่อเวลาการทำงานของรีเลย์ไม่ว่าหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวหรือหม้อแปลงกระแสไม่เกิดการอิ่มตัวก็ตาม

รีเลย์ผลต่าง

- ในกรณีของรีเลย์ผลต่างรีเลย์จะทำงานที่เวลาเดียวกันไม่ว่าหม้อแปลงกระแสจะเกิดการอิ่มตัวด้วยผลจากอะไรก็ตาม ทั้งนี้ เพราะว่ารีเลย์ผลต่างจะสั่งให้รีเลย์ทำงานทันทีทันใดหากตรวจพบสิ่งผิดปกติเกิดขึ้น นในโซนป้องกันและเกิดกระแสผลต่างขึ้น นโดยไม่คำนึงถึงว่าหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวหรือไม่ก็ตามจึงส่งผลให้รีเลย์ทำงานที่เวลาเดียวกัน

- ในกรณีที่รีเลย์ผลต่างทำงานผิดพลาดไปจากภาวะปกติ คือ คือ เมื่อเกิดความผิดพร่องนอกโซนป้องกัน รีเลย์ควรจะไม่ทำงาน แต่เมื่อเกิดความผิดพร่องนอกโซนป้องกันและหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวขึ้น นจากผลของเบอร์เดนและผลของกระแสผิดพร่องจะส่งผลให้รีเลย์ผลต่างทำงาน ซึ่งรีเลย์จะทำงานก็ต่อเมื่อหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวที่รุนแรงและจะส่งผลให้รีเลย์ผลต่างเห็นกระแส I_1 และ I_2 มีค่าต่างกันจึงเกิดกระแสผลต่างขึ้น นในระบบจึงทำให้รีเลย์จึงทำงาน

6.2 ข้อเสนอแนะ

- สามารถศึกษาการเกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสด้วยปัจจัยอื่น ๆ ได้เช่น ผลกระทบจาก ฟลักซ์ตกค้าง นอกเหนือจากผลของเบอร์เดน ของหม้อแปลงกระแส, X/R ของระบบไฟฟ้า, กระแสผิดพร่อง

- แบบจำลองรีเลย์ป้องกันที่สำคัญที่ใช้ในระบบป้องกันไฟฟ้ามีอีกหลายชนิดนอกเหนือจากรีเลย์กระแสเกิน, รีเลย์ระยะทาง, รีเลย์ผลต่าง ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองได้ เช่น รีเลย์กระแสสมดุล, รีเลย์ชิงโครไนซ์, รีเลย์ความถี่ รีเลย์ความร้อนและรีเลย์ความดันเป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] ประสิทธิ์ พิทยพัตน์ การป้องกันระบบไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: เอ็มแอนด์อี, 2545.

[2] IEEE Std C37.110-2007,"IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes", IEEE Power Engineering Society

[3] Hydro-Québec. "SimPowerSystems for Use with Simulink", TransÉnergie Technologies

[4] M.Kezunovic,B.Kasztenny and Z.Galijasevic.Modeling. Developing and Testing Protective Relays Using MATLAB Programmable Relay and Digital Simulation.3rd International Conference on Digital Power System Simulators-ICD'99,Vasteras:Sweden,May 1999.

[5] Nicholas Villamagna and Peter A. Crossley. A CT Saturation detection algorithm using symmetrical components for current differential protection. IEEE Transactions on Power Delivery (January 2006):38-45

[6] T.S. Sidhu, M. Hfuda, and M.S. Sachdev. A technique for generating software models of microprocessor-based relays. IEEE Canadian Conference, pp.289-292,1998

[7] Li-Cheng Wu,Chih-Wen Liu,Ching-Shan Chen. Modeling and testing of a digital distance relay MATLAB/SIMULINK.Power Symposium, 2005. Proceeding on the 37th Annual North American: 253-259.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภักดี สิทธิการ เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม 2526 ที่จังหวัดพังงา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2548 แล้วเข้าศึกษาต่อระดับปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคปลายปีการศึกษา 2549

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย