

การวิเคราะห์หม้อแปลงกระแสในสภาวะชั่วคราว  
และผลกระทบต่อรีเลย์ผลต่าง

THE ANALYSIS OF CURRENT TRANSFORMERS UNDER  
TRANSIENT CONDITION AND THEIR EFFECTS ON  
DIFFERENTIAL RELAYS

อรรถรัตน์ นาวิกาวตาร  
AUTTARAT NAWIKAVATAN

๕๕๘  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2135-9

การวิเคราะห์หม้อแปลงกระแสในสถานะชั่วคราว  
และผลกระทบต่อรีเลย์ผลต่าง

THE ANALYSIS OF CURRENT TRANSFORMERS UNDER  
TRANSIENT CONDITION AND THEIR EFFECTS ON  
DIFFERENTIAL RELAYS

อรรถรัตน์ นาวิกาวตาร

AUTTARAT NAWIKAVATAN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 63410  
วัน,เดือน,ปี ๒๘ ส.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2135-9

**THE ANALYSIS OF CURRENT TRANSFORMERS UNDER  
TRANSIENT CONDITION AND THEIR EFFECTS ON  
DIFFERENTIAL RELAYS**

**AUTTARAT NAWIKAVATAN**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THEREQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN LELCTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABAND**

**2006**

**ISBN 974-15-2135-9**

**COPYRIGHT 2006**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์หม้อแปลงกระแสในสถานะชั่วคราวและผลกระทบต่อรีเลย์ ผลต่าง
นักศึกษา	นาย อรรถรัตน์ นาวิกาวตาร
รหัสนักศึกษา	45061022
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรม ไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ได้นำเสนอ การวิเคราะห์ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส เมื่อเกิดทรานเซียนต์ โดยการสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงกระแส และระบบด้วยโปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transients Program) ซึ่งในส่วนของแบบจำลองหม้อแปลงกระแสได้มีการต่อ magnetizing branch ขนานเข้ากับขดลวดทุติยภูมิได้เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น Type-96 pseudo non-linear hysteretic inductor ซึ่งสามารถกำหนดคุณสมบัติการอิ่มตัวในแกนเหล็ก และทางด้านฮีสเทอรีซิส โดยมีโปรแกรมย่อย “SATURA” และ “HYSDAT” ช่วยในการจัดการข้อมูลก่อนป้อนค่าให้กับตัวเหนี่ยวนำ ในการวิเคราะห์จะพิจารณาถึงผลกระทบของ อัตราส่วน X/R, เบอร์เดน และระดับความถูกต้อง (Accuracy Class) ที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของหม้อแปลงกระแส โดยได้มีการนำข้อมูลหม้อแปลงกระแสที่ใช้ในระบบป้องกันหม้อแปลงกำลังขนาด 20 MVA และ 75 MVA มาทำการศึกษา ผลการทดสอบสามารถนำไปใช้กับเครื่องทดสอบรีเลย์ Programma รุ่น Freja 300 เพื่อทดสอบสมรรถนะของรีเลย์ป้องกัน และสามารถนำผลการวิเคราะห์ไปใช้เป็นข้อมูลในการเลือกหม้อแปลงกระแสและรีเลย์ป้องกันอย่างเหมาะสม

<b>Thesis Title</b>	The analysis of current transformers under transient condition and their effects on differential relays
<b>Student</b>	Mr. Auttarat Nawikavatan
<b>Student ID</b>	45061022
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2006
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Monthon Leelajindakrairerk

### **ABSTRACT**

This thesis presents the analysis of current transformer transients. The model is constructed on EMTP (Electromagnetic Transients Program). In the current transformer model, the secondary winding is connected in parallel with a magnetizing branch with non-linear characteristics of the inductor. Type-96 pseudo non-linear hysteretic inductor with saturation and hysteresis characteristics is used incorporated with the sub-programs "SATURA" and "HYSDAT". These programs are employed in data of saturation and hysteresis for input data of the inductor. The analysis is taken into account effect of X/R ratios, burdens, accuracy classes on current transformer performances. Data protection system of 20 MVA and 75 MVA power transformers are used in the study. The results can be used for the programme model Freja 300 relay testing machine system for operating performances of the relay. In addition, appropriate current transformer and protection relays can be selected based on the results.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยการแนะนำและคำปรึกษาจาก ร.ศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร.ศ. สันติ อัสวศรีพงศ์ธร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้อนุเคราะห์ให้ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องทดสอบรีเลย์ พร้อมให้คำแนะนำในการใช้งานจนการทดสอบรีเลย์ป้องกันลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท เอบีบี จำกัด คุณอภิสิทธิ์ เอกชีวานนท์ และคุณอัมรินทร์ ผ่องโสภา ที่ได้ให้คำแนะนำในเรื่องการใช้งานโปรแกรม ATP-EMTP และได้อนุเคราะห์ให้ผู้วิจัยได้ยืมรีเลย์ป้องกันมาใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณ บริษัท ผลิตไฟฟ้าขนอม จำกัด คุณทรงเกียรติ จิโสะ ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลระบบไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าขนอม เพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จำกัด (มหาชน) คุณพิพัฒน์ บุญนาค ที่แนะนำการใช้งานโปรแกรม ATP-EMTP

ขอขอบคุณ วิศวกร บริษัท เอ็มเออาซี (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้คำแนะนำในเรื่องการทดสอบรีเลย์ และให้ทดลองใช้เครื่องทดสอบรีเลย์

ขอขอบคุณ ทุกคนในครอบครัว และ บริษัท ซีคู เทคโนโลยี จำกัด รวมทั้ง พี่ ๆ และเพื่อน ๆ ทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้คำแนะนำ และช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายอรรถรัตน์ นาวิกาวตาร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.4.1 ส่วนที่เป็น Software .....	4
1.4.2 ส่วนที่เป็น Hardware.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นของหม้อแปลงกระแส.....	6
2.1 ทฤษฎีของหม้อแปลงกระแส.....	6
2.1.1 หน้าที่ของหม้อแปลงกระแส.....	6
2.1.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงกระแส.....	7
2.1.3 โลหะที่ใช้ทำ core.....	8
2.1.3.1 Hot rolled silicon-iron alloy.....	8
2.1.3.2 Cold rolled oriented silicon-iron alloy (electrical steel).....	9
2.1.3.3 Nickel-iron alloy.....	9
2.1.3.4 Composite material.....	9
2.1.4 การบอกลักษณะของหม้อแปลงกระแส.....	9
2.1.5 ข้อกำหนดของความแม่นยำของ CT (accuracy class).....	10

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.5.1 ตามมาตรฐาน IEEE/ANSI.....	10
2.1.6 การเลือกหม้อแปลงกระแส.....	11
2.1.6.1 การเลือก primary rated current.....	11
2.1.6.2 การเลือก secondary rated current.....	11
2.1.6.3 การเลือก secondary rated burden.....	12
2.1.7 การใช้งาน overload.....	13
2.1.8 Open circuit voltage ในหม้อแปลงกระแส.....	13
2.1.9 สิ่งแตกต่างกันระหว่าง protective และ metering current transformer.....	14
2.2 การอิ่มตัวของวัสดุตัวนำแม่เหล็ก (SATURATION).....	15
2.3 ฮิสเตอร์รีซิส (HYSTERESIS).....	15
2.4 การวิเคราะห์กระแส และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงกระแส.....	16
2.5 ปัจจัยการเกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก.....	18
2.6 ลักษณะโครงสร้าง.....	20
บทที่ 3 หลักการทำงานของรีเลย์ผลต่าง (Differential Relay).....	23
3.1 หลักการ Percentage Differential Current.....	24
3.1.1 ส่วนการวิเคราะห์อัตราผลต่างของกระแสกับผลรวมกระแส (Percentage Differential Current).....	26
3.2 หลักการ Harmonic Restraint.....	28
3.3 ข้อผิดพลาดของการใช้หลักการ Percentage Differtial Current ในการสั่งปลดวงจร.....	32
3.4 ข้อผิดพลาดของการใช้หลักการ Harmonic Restranic ในการสั่งยับยั้งการปลดวงจร.....	33
3.5 ลักษณะการต่อใช้งาน.....	34

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 แบบจำลองหม้อแปลงกระแส และระบบ.....	35
4.1 แบบจำลองของหม้อแปลงกระแส.....	40
4.2 การทดสอบความถูกต้องของวงจรใน ATPDraw.....	43
4.3 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ.....	45
4.4 กำหนดขอบเขตกรณีศึกษา.....	45
4.5 การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงกระแส และระบบ.....	49
4.6 โครงสร้างของแบบจำลองของหม้อแปลงกระแสที่ใช้ ATP.....	51
4.7 การใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น Type-96 pseudo non-linear hysteristic inductor.....	52
4.8 การใช้โปรแกรมย่อย SATURA.....	53
4.9 การใช้โปรแกรมย่อย HYSDAT.....	57
4.10 การใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น Type-96 pseudo non-linear hysteristic inductor.....	65
บทที่ 5 การทดสอบบริเลย์ผลต่าง.....	69
5.1 ในการเตรียมไฟล์ .PL4 เพื่อนำไปใช้กับโปรแกรม Freja Sim300.....	71
5.2 การใช้งานโปรแกรม Freja Sim300.....	73
5.3 การต่ออุปกรณ์ในการทดสอบ.....	80
บทที่ 6 ผลการทดลอง.....	82
6.1 ผลจากแบบจำลองหม้อแปลงกระแส และระบบด้วย โปรแกรม ATP-EMTP.....	82
6.2 ผลการทดสอบบริเลย์.....	99

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 บทสรุป.....	103
เอกสารอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก ก การแก้ไข ไฟล์เริ่มต้น (startup file) ของโปรแกรม EMTP.....	107
ภาคผนวก ข ข้อมูลรีเลย์ผลต่าง SEL-587.....	113
ภาคผนวก ค ข้อมูลเครื่องทดสอบรีเลย์ FREJA 300.....	119
ประวัติผู้เขียน.....	122

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงรูปร่างของ flux ที่มี flat-topped shape.....	13
2.2 B-H curve (SATURATION).....	14
2.3 B-H curve (HYSTERESIS).....	16
2.4 วงจรสมมูลอย่างง่ายของหม้อแปลงกระแส และระบบขณะเกิดลัดวงจร.....	17
2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการใช้ในการสร้างกระแส ด้านทุติยภูมิเมื่อกระแสด้านปฐมภูมิมีออฟเซตกระแสตรง 100%.....	18
2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง KS และเวลาที่เกิดการอิ่มตัว เมื่อ T1 คงที่และ T2 ที่ค่าต่าง ๆ ที่ค่า PF ของเบอร์เดน = 1.....	19
2.7 ส่วนประกอบและภาคตัดขวางภายในของ Current Transformer แบบ Bottom Core.....	20
2.8 ตัวอย่าง Magnetizing Curve ของ Current Transformer สามารถปรับกระแสได้ 10 Ratio .....	21
2.9 สัญลักษณ์หม้อแปลงกระแสแบบต่าง ๆ.....	22
3.1 หลักการ Percentage Differential Current.....	24
3.2 แสดงเส้นคุณลักษณะของรีเลย์ที่ใช้หลักการ Percentage Differential Current.....	25
3.3 เส้นคุณลักษณะของหลักการ Percentage Differential Current.....	26
3.4 กระแสอินรัชขณะเริ่มจ่ายไฟให้กับหม้อแปลง โดยมีมุมของแรงดันเฟส A, B และ C ที่ 90, 330, 210 .....	29
3.5 ผลของสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กที่มีต่อขนาดของกระแสทรานเซียนต์ ขณะที่มุมของสนามแม่เหล็กขณะต่อวงจรสอดคล้องกับสนามแม่เหล็กที่ตกค้าง.....	29
3.6 ผลของสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กที่มีต่อขนาดของกระแสทรานเซียนต์ ขณะที่มุมของสนามแม่เหล็กขณะต่อวงจร ไม่สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กที่ตกค้าง.....	30
3.7 กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดการฟลัดภายนอก.....	30
3.8 กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลงที่เกาะบนบัสเดียวกัน เริ่มจ่ายไฟ (Sympathetic Inrush Current).....	31

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน หรือความถี่ที่มีต่อส่วนประกอบฮาร์มอนิก.....	32
3.10 หม้อแปลงกำลัง Star-Delta ที่มีการต่อหม้อแปลงกระแสแบบ Delta-Star.....	35
3.11 หม้อแปลงกำลัง Delta-Delta ที่มีการต่อหม้อแปลงกระแสแบบ Star-Star.....	35
4.1 ส่วนประกอบของโปรแกรม ATP-EMTP .....	37
4.2 โปรแกรมกราฟิกที่สามารถนำมาใช้งานและชนิดของไฟล์ต่าง ๆ.....	38
4.3 ส่วนต่าง ๆ ของหน้าต่างหลักของโปรแกรม ATPDraw.....	39
4.4 หน้าต่างตั้งค่าโปรแกรม.....	40
4.5 แบบจำลองที่ 1 ของหม้อแปลงกระแส.....	40
4.6 แบบจำลองที่ 2 ของหม้อแปลงกระแส.....	41
4.7 แบบจำลองที่ 3 ของหม้อแปลงกระแส.....	42
4.8 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับแบบจำลองต่าง ๆ ในกรณี CT 2000:5, Fault 12050 A, Burden 8 ohm .....	42
4.9 วงจรทดสอบความถูกต้องใน ATPDraw.....	43
4.10 ข้อมูล Excitation Test ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสขนาด 2000:5 C400 50Hz.....	44
4.11 กระแสด้านทุติยภูมิที่ได้จากวงจรทดสอบความถูกต้องใน ATPDraw.....	44
4.12 ข้อมูลส่วนหนึ่งของระบบใน โรงผลิตไฟฟ้าขอม.....	45
4.13 v1 – i1 ข้อมูลการทดสอบ Vrms-Irms ของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 50Hz v1 – i1 ข้อมูลการทดสอบ Vrms-Irms ของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 50Hz.....	46
4.14 v1 – i1 ข้อมูลการทดสอบ Vrms-Irms ของหม้อแปลงกระแส 400:5 C400 50Hz v2 – i2 ข้อมูลการทดสอบ Vrms-Irms ของหม้อแปลงกระแส 400:5 C400 50Hz.....	47
4.15 วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแสและระบบขณะเกิดการลัดวงจร.....	49
4.16 แบบจำลองของหม้อแปลงกระแสและระบบใน ATPDraw.....	50
4.17 ส่วนประกอบของ ATP Saturable Transformer.....	51
4.18 แสดงตัวอย่างการป้อน Attributes ของตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติ ไม่เป็นเชิงเส้น Type96 pseudo non-linear hysteretic inductor.....	52

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 แสดงตัวอย่างการป้อนข้อมูลเพื่อแปลงข้อมูล Vrms-Irms ให้เป็น $\lambda$ -Ipeak โดยใช้ข้อมูลของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 50Hz.....	53
4.20 แสดงตัวอย่างไฟล์เอาต์พุตที่ได้จากการแปลงข้อมูล Vrms-Irms ให้เป็น $\lambda$ -Ipeak โดยใช้ข้อมูลของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 50Hz.....	53
4.21 แสดงตัวอย่างการป้อนข้อมูลเพื่อแปลงข้อมูล $\lambda$ -Ipeak ให้แสดงข้อมูลคุณลักษณะด้านฮิสเตอร์รีซิสโดยใช้ข้อมูลของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 50Hz.....	57
4.22 แสดงตัวอย่างไฟล์เอาต์พุตที่แสดงข้อมูลคุณลักษณะด้านฮิสเตอร์รีซิสโดยใช้ข้อมูลของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 50Hz.....	58
4.23 แสดงเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสที่ได้จากโปรแกรมย่อย HYSDAT ของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 50Hz.....	63
4.24 แสดงเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสที่ได้จากโปรแกรมย่อย HYSDAT ของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 50Hz.....	63
4.25 แสดงเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสที่ได้จากโปรแกรมย่อย HYSDAT ของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 50Hz.....	64
4.26 แสดงเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสที่ได้จากโปรแกรมย่อย HYSDAT ของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 50Hz.....	64
4.27 แสดงตัวอย่างการป้อน Attributes ของตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น Type-96 pseudo non-linear hysteristic inductor Card : BRANCH.....	65
4.28 แสดงตัวอย่างการป้อน Characteritic ของตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น Type-96 pseudo non-linear hysteristic inductor Card : BRANCH.....	66
4.29 แสดงตัวอย่างการป้อนข้อมูลกระแสซึ่งเป็น Card : SOURCE.....	67
4.30 แสดงตัวอย่างการป้อนข้อมูล RLC ซึ่งเป็น Card : BRANCH.....	67
4.31 แผนผังแสดงโครงสร้างของแบบจำลอง.....	68
5.1 แผนผังการทดสอบรีเลย์ป้องกันด้วยวิธีต่าง ๆ.....	71
5.2 แผนผังการปรับความถี่ในการสุ่ม (Sampling Frequency).....	71
5.3 แสดงขั้นตอนการเตรียมไฟล์ .PL4 เพื่อนำไปใช้กับ โปรแกรม Freja Sim300.....	72

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 ตัวอย่างไฟล์ .PL4 ที่ได้มาจากแบบจำลองที่ใช้โปรแกรม ATP-EMTP ที่มี Probe Current 1 Phases 3 จุด.....	73
5.5 แสดงไฟล์ .DAT ที่พร้อมสำหรับการแปลงเป็นไฟล์ .SDF.....	73
5.6 ข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิต.....	74
5.7 เมนูหลักของโปรแกรม Freja Sim300.....	74
5.8 การเพิ่มไฟล์ .DAT.....	75
5.9 เมนูเลือกรูปแบบในการแปลงไฟล์.....	75
5.10 การตั้งค่าเพื่อแปลงไฟล์ .DAT เป็น .SDF.....	76
5.11 แสดงลักษณะของไฟล์ .SDF ที่ได้จากการ โปรแกรม Freja Sim300.....	77
5.12 แสดงรูปคลื่นไฟล์ .PL4 ก่อนการแปลงเป็นไฟล์ .SDF.....	77
5.13 แสดงรูปคลื่นที่ได้มาจากการแปลงไฟล์ .SDF.....	78
5.14 แสดงการแก้ไขของค้ประกอบภายในของไฟล์ .SDF.....	79
5.15 เครื่องทดสอบบริเลย์ FREJA 300.....	80
5.16 แสดงแผนผังการทดสอบบริเลย์ผลต่าง.....	81
6.1 ผลตอบสนองหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A154 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เดน 4 $\Omega$ .....	83
6.2 ผลตอบสนองหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A154 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เดน 4 $\Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมตัวของหม้อแปลงกระแส.....	83
6.3 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A158 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เดน 4 $\Omega$ .....	84
6.4 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A158 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เดน 4 $\Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมตัวของหม้อแปลงกระแส.....	84
6.5 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A254 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เดน 8 $\Omega$ .....	85

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.6 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A254 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เด็น 8 $\Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมิตัวของหม้อแปลงกระแส.....	85
6.7 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A258 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เด็น 8 $\Omega$ .....	86
6.8 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A258 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เด็น 8 $\Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมิตัวของหม้อแปลงกระแส.....	86
6.9 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A354 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เด็น 4+j7 $\Omega$ .....	87
6.10 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A354 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เด็น 4+j7 $\Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมิตัวของหม้อแปลงกระแส.....	87
6.11 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A358 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เด็น 4+j7 $\Omega$ .....	88
6.12 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A358 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เด็น 4+j7 $\Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมิตัวของหม้อแปลงกระแส.....	88
6.13 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A454 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เด็น 8+j14 $\Omega$ .....	89
6.14 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A454 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เด็น 8+j14 $\Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมิตัวของหม้อแปลงกระแส.....	89
6.15 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A458 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เด็น 8+j14 $\Omega$ .....	90

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.16 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A458 $I_{FSYM} = 12885$ Arms, X/R=10 เบอร์เด็น $8+j14 \Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมิตัวองหม้อแปลงกระแส.....	90
6.17 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B152 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น $4 \Omega$ .....	91
6.18 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B152 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น $4 \Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมิตัวองหม้อแปลงกระแส.....	91
6.19 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B158 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น $4 \Omega$ .....	92
6.20 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B158 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น $4 \Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมิตัวองหม้อแปลงกระแส.....	92
6.21 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B252 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น $8 \Omega$ .....	93
6.22 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B252 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น $8 \Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมิตัวองหม้อแปลงกระแส.....	93
6.23 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B258 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น $8 \Omega$ .....	94
6.24 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B258 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น $8 \Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมิตัวองหม้อแปลงกระแส.....	94
6.25 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B352 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น $4 +j7 \Omega$ .....	95

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.26 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B352 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น 4+j7 $\Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส.....	95
6.27 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B358 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น 4+j7 $\Omega$ .....	96
6.28 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B358 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น 4+j7 $\Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส.....	96
6.29 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B452 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น 8+j14 $\Omega$ .....	97
6.30 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B452 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น 8+j14 $\Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส.....	97
6.31 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B458 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น 8+14 $\Omega$ .....	98
6.32 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B458 $I_{FSYM} = 913$ Arms, X/R=15 เบอร์เด็น 8+14 $\Omega$ ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส.....	98
6.33 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง SEL-587 ในกรณีที่รับกระแส จากหม้อแปลงกระแสขนาด 2000:5 ในกรณีที่มีการอิ่มตัว และไม่มีการอิ่มตัว ของหม้อแปลงกระแส.....	100
6.34 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง SEL-587 ในกรณีที่รับกระแส จากหม้อแปลงกระแสขนาด 400:5 ในกรณีที่มีการอิ่มตัว และไม่มีการอิ่มตัว ของหม้อแปลงกระแส.....	101
6.35 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง SEL-587 ในกรณีที่รับกระแส จากหม้อแปลงกระแสขนาด 2000:5 ที่ระบุค่าความแม่นยำแตกต่างกัน.....	101

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.36 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง SEL-587 ในกรณีที่ได้รับกระแส จากหม้อแปลงกระแสขนาด 400:5 ที่ระบุค่าความแม่นยำแตกต่างกัน.....	102
ก-1 การแก้ไขไฟล์เริ่มต้นของโปรแกรม EMTP เพื่อกำหนดรูปแบบของไฟล์ .PL4 ให้เป็น FORMATTED ASCII Text File.....	107
ก-2 แสดงตัวอย่างไฟล์ Source code ของแบบจำลอง.....	110
ข-1 ภาพด้านหน้าของรีเลย์ SEL-587.....	113
ข-2 ภาพด้านหลังของรีเลย์ SEL-587.....	113
ข-3 ฟังก์ชันของรีเลย์ป้องกัน SEL-587.....	114
ข-4 แสดงแผนผังการทำงานของรีเลย์ SEL-587.....	117
ค-1 แสดงส่วนต่างๆ ที่อยู่ด้านหน้าเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja 300.....	119

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เบอร์ดัชนีมาตรฐานของหม้อแปลงกระแสสำหรับระบบป้องกัน.....	10
4.1 แสดงลำดับของแหล่งจ่ายกระแสในการทดสอบความถูกต้องของวงจร.....	43
4.2 ขนาดหม้อแปลงกระแสที่ใช้ในการทดสอบ.....	45
4.3 ชื่อและขอบเขตของกรณีศึกษาสำหรับหม้อแปลงกระแสขนาด 2000 : 5 50Hz .....	48
4.4 ชื่อและขอบเขตของกรณีศึกษาสำหรับหม้อแปลงกระแสขนาด 400 : 5 50Hz.....	48
4.5 แสดงรายละเอียดของส่วนประกอบที่ใช้ในแบบจำลอง.....	50
4.6 แสดงรายละเอียดของข้อมูลที่จะต้องป้อนให้ Saturable Transformer.....	51
4.7 สรุปข้อมูลการแปลง Vrms-Irms ให้เป็น $\lambda$ - Ipeak ของหม้อแปลงกระแส 2000:5C400.....	55
4.8 สรุปข้อมูลการแปลง Vrms-Irms ให้เป็น $\lambda$ - Ipeak ของหม้อแปลงกระแส 2000:5C800.....	55
4.9 สรุปข้อมูลการแปลง Vrms-Irms ให้เป็น $\lambda$ - Ipeak ของหม้อแปลงกระแส 400:5C200.....	56
4.10 สรุปข้อมูลการแปลง Vrms-Irms ให้เป็น $\lambda$ - Ipeak ของหม้อแปลงกระแส 400:5C800.....	56
4.11 สรุปข้อมูลคุณลักษณะด้าน ฮิสเตอร์รีซิส ที่ได้จากโปรแกรม HYSDAT โดยใช้ข้อมูล ณ จุดอิ่มตัวสูงสุด Ipeak= 17.508 Ampere $\lambda = 2.19$ Volts-sec ของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 50Hz .....	59
4.12 สรุปข้อมูลคุณลักษณะด้าน ฮิสเตอร์รีซิส ที่ได้จากโปรแกรม HYSDAT โดยใช้ข้อมูล ณ จุดอิ่มตัวสูงสุด Ipeak= 8.719 Ampere $\lambda = 1.41$ Volts-sec ของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 50Hz.....	60
4.13 สรุปข้อมูลคุณลักษณะด้าน ฮิสเตอร์รีซิส ที่ได้จากโปรแกรม HYSDAT โดยใช้ข้อมูล ณ จุดอิ่มตัวสูงสุด Ipeak= 14.87 Ampere $\lambda = 0.87$ Volts-sec ของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 50Hz.....	61
4.14 สรุปข้อมูลคุณลักษณะด้าน ฮิสเตอร์รีซิส ที่ได้จากโปรแกรม HYSDAT โดยใช้ข้อมูล ณ จุดอิ่มตัวสูงสุด Ipeak= 14.81Ampere $\lambda = 2.97$ Volts-sec ของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 50Hz.....	62
6.1 ผลการทดสอบเบรลีย์ในสภาวะต่าง ๆ ของหม้อแปลงกระแส 2000:5.....	99
6.2 ผลการทดสอบเบรลีย์ในสภาวะต่าง ๆ ของหม้อแปลงกระแส 400:5.....	100
ก-1 ส่วนประกอบต่างๆภายในโปรแกรม ATP-EMTP.....	111

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ข-1 แสดงข้อมูลในการตั้งค่ารีเลย์.....	118
ค-1 แสดงข้อมูลจำเพาะของเครื่องทดสอบรีเลย์ FREJA 300.....	120

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในปัจจุบัน หากความผิดปกติในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้น เช่น สภาวะลัดวงจรในระบบส่งจ่ายรีเลย์ป้องกันจะสั่งปลดวงจรทำให้กระแสไฟฟ้าขาดหายไป ผลกระทบที่เกิดขึ้นไม่ใช่แค่ค่าซ่อมแซมอุปกรณ์หรือเปลี่ยนใหม่เท่านั้น ยังมีผลกระทบการผลิตในอุตสาหกรรมอีกด้วย การเกิดสภาวะผิดปกติในบางครั้งรีเลย์ป้องกันอาจทำงานผิดพลาดได้ เพราะความผิดปกติที่เกิดขึ้นอาจเป็นสภาวะที่จะส่งผลเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า หรือเป็นเพียงสภาวะผิดปกติชั่วขณะที่ส่งผลไม่ร้ายแรงต่ออุปกรณ์และระบบ ดังนั้นการลดความเสียหาย และช่วยให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องมีระบบป้องกันที่มีความไว และความน่าเชื่อถือสูง เพื่อป้องกันการดำเนินงานที่ผิดพลาดของรีเลย์ป้องกันจึงต้องมีการตรวจสอบการทำงานของรีเลย์เพื่อให้มั่นใจว่า เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในโซนป้องกัน รีเลย์ป้องกันจะทำงานได้อย่างถูกต้อง

หม้อแปลงกระแสเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบป้องกันใช้ในการลดกระแสสูงให้เป็นกระแสต่ำเพื่อป้อนให้กับรีเลย์ป้องกันในระบบป้องกันไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของหม้อแปลงกระแสในสภาวะชั่วคราว (Transients) การเกิดสภาวะชั่วคราวหรือลัดวงจรขึ้นในระบบอาจทำให้แกนเหล็กของหม้อแปลงเกิดการอิ่มตัว (Saturation) ซึ่งความรุนแรงในการอิ่มตัว จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างที่เชื่อมต่อยู่ในระบบ ทำให้กระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์เกิดการผิดเพี้ยนส่งผลให้รีเลย์ป้องกันทำงานผิดพลาดได้

การทดสอบรีเลย์ป้องกันที่ง่ายและนิยมใช้กันนั้น จะใช้วิธีการป้อนกระแสหรือแรงดันในสภาวะอยู่ตัว ให้กับรีเลย์ป้องกันที่ต้องการจะทดสอบ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในเวลาทีรีเลย์ป้องกันทำงาน เปรียบเทียบกับขนาดของกระแสหรือแรงดันที่ป้อนให้กับรีเลย์ การทดสอบในลักษณะดังกล่าว จะไม่สามารถทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ป้องกันในสภาวะชั่วคราวได้ เพราะในความเป็นจริง กรณีเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบ การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสและแรงดันอาจมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยน อันเนื่องมาจากผลของออฟเซตกระแสตรงและการอิ่มตัวในแกนเหล็ก ของหม้อแปลงกระแส ซึ่งจะมีผลต่อเวลาในการทำงานของรีเลย์ป้องกัน การทดสอบรีเลย์โดยการป้อนรูปคลื่นกระแสหรือแรงดัน ที่มีลักษณะรูปร่างที่เหมือนจริงในการทดสอบรีเลย์ป้องกันจึงน่าจะเป็นวิธีที่ถูกต้องที่สุด

การวิเคราะห์และทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะทรานเซียนต์ สามารถจัดแยกออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภทคือ ประเภทที่ใช้โมเดลจำลอง ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันมานาน ตัวอย่างเช่น TNA (Transient Network Analyzer) และอีกวิธีคือการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำการจำลององค์

ประกอบต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าแล้วทำการวิเคราะห์ ซึ่งแนวโน้มในปัจจุบันและอนาคต จะมีการใช้งานโปรแกรมในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากหน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภาครัฐบาลและเอกชน มีคอมพิวเตอร์ได้ใช้งานอยู่แล้ว และสามารถติดตั้งโปรแกรมใช้งานร่วมกับคอมพิวเตอร์ โดยไม่จำเป็นต้องสร้างโมเดลจำลอง ซึ่งมักจะประสบปัญหาในเรื่องของงบประมาณและเวลาที่ต้องสูญเสียไป การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากการวิเคราะห์ระบบในสถานะอยู่ตัว (Steady state) เช่น การหากระแสลัดวงจร การวิเคราะห์ Load flow เป็นต้น ยังมีการวิเคราะห์ระบบในสถานะทรานเซียนต์ (Transient) ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะของทรานเซียนต์ตามช่วงเวลาที่พิจารณา ได้แก่ ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic transients) ซึ่งมีช่วงเวลายาวเป็นไมโครวินาที และทรานเซียนต์ทางกลไฟฟ้า (Electromagnetical transients) ที่ถูกนำมาพิจารณาในการศึกษาเสถียรภาพ (Stability) ของเครื่องกลไฟฟ้าซึ่งมีช่วงเวลายาวในการพิจารณาเป็นมิลลิวินาที สาเหตุของการเกิดทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า มาจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบอย่างทันทีทันใด เช่น การเกิดฟ้าผ่า การลัดวงจร การปิดหรือเปิดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่ในสายส่ง และสายเคเบิลซึ่งอาจจะรวมกับผลของการออสซิลเลตในวงจรส่วนประกอบชนิดก้อน (Lumped element) เช่น หม้อแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด เป็นต้น สำหรับการวิเคราะห์ทรานเซียนต์สามารถทำการวิเคราะห์ได้เป็น 2 แบบคือ แบบแรกจะวิเคราะห์ทรานเซียนต์ในโดเมนความถี่ แล้วจึงแปลงไปสู่โดเมนเวลาในขั้นสุดท้าย ซึ่งจะใช้หลักการวิเคราะห์ฟูเรียร์ ส่วนแบบที่สองเป็นการวิเคราะห์ในโดเมนเวลาโดยตรง โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเทอมที่ขึ้นกับความถี่ให้เป็นเทอมในโดเมนเวลาก่อน ซึ่งเป็นหลักการทำงานของโปรแกรม EMTP

โปรแกรมทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Transients Program) หรือ EMTP เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้จำลองโมเดลต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อวิเคราะห์ผลการทำงานหรือทำนายค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาในระบบไฟฟ้ากำลังโดยมีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันของเวลา โดยทั่วไปจะใช้ศึกษาผลการรบกวนต่อระบบ (Disturbance) เช่น การสวิตชิงของ Circuit Breaker ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบ

โปรแกรม EMTP เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ระบบขนาดใหญ่ที่มีองค์ประกอบหรือโมเดลของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าหลากหลาย พารามิเตอร์ขององค์ประกอบอาจเป็นค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับความถี่หรือเป็นค่าที่ขึ้นกับความถี่ เช่น กรณีสายส่งหรือเคเบิล และเป็นแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น หรืออาจเปลี่ยนแปลงตามค่าของเวลาได้ ซึ่งภายในระบบใหญ่นี้จะมีการเชื่อมโยงกันระหว่างระบบย่อย ในการวิเคราะห์สามารถทำการคำนวณแบบคำนวณครั้งเดียวหรือเป็นการจำลองที่เป็นการวิเคราะห์แบบกลุ่มซึ่งมีการคำนวณหลาย ๆ ครั้ง โดยมีข้อมูลอินพุตเป็นข้อมูลของโมเดลนั้น ๆ โดยเฉพาะหรือเป็นข้อมูลสถิติสำหรับการแสดงผลของข้อมูลของโปรแกรม EMTP นอกจากจะแสดงผลเป็นตารางตัวเลขแล้ว ยังสามารถแสดงผลในรูปของกราฟได้อีกด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้โปรแกรม โดยต้องมีการระบุรูปแบบการแสดงผลในตัวโปรแกรมก่อนที่

จะทำการรันโปรแกรม โปรแกรม EMTP ยังคงเป็นโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาตลอดเวลา โดยใช้หน่วยงานต่าง ๆ ในหลายประเทศร่วมมือกัน โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะแก้ไขข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ พัฒนาประสิทธิภาพของโปรแกรมในการคำนวณ มีการปรับปรุงพัฒนาโมเดลต่าง ๆ ให้เหมาะสมเพื่อความสะดวกในการใช้งาน และลดขีดจำกัดในการใช้งานของโปรแกรม โดยวัตถุประสงค์เพื่อทำการจำลองโมเดล ซึ่งสัญญาณที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลจากการใช้งานจริงเพื่อใช้ในการออกแบบการวิเคราะห์ การทำนาย การทดสอบ และเป็นการประหยัดต้นทุนในการสร้างโมเดลจริง นอกจากนี้ยังช่วยลดระยะเวลาในการศึกษาปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าอีกด้วย ซึ่งแนวโน้มในอนาคตการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการจำลองทางไฟฟ้าจะมีบทบาทที่สำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาและปรับปรุงงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้ได้มีการนำเสนอเป็น 2 ส่วนคือส่วนแรกจะเป็นการใช้โปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transients Program) มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง (Simulation) เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของหม้อแปลงกระแสในเงื่อนไขต่าง ๆ ส่วนที่สองคือการนำผลการทดลองจากโปรแกรม EMTP ซึ่งเป็นไฟล์ PL4 นำไปแปลงเป็นไฟล์มาตรฐาน เพื่อให้ใช้กับเครื่องทดสอบรีเลย์ โดยเครื่องทดสอบรีเลย์จะแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่มีรูปร่างเช่นเดียวกับที่ได้จากแบบจำลองแล้วป้อนให้กับรีเลย์ เพื่อทดสอบรีเลย์ป้องกันในสภาวะชั่วคราว หรือในสภาวะรูปคลื่นผิดเพี้ยน ซึ่งจะช่วยให้เห็นถึงสมรรถนะการทำงานของแท่งจริงของรีเลย์ป้องกัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

นำเสนอแบบจำลองหม้อแปลงกระแสและระบบด้วยโปรแกรม ATP – EMTP ( Alternative Transient Program- Electromagnetic Transients Program) เพื่อศึกษาผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแสในสภาวะชั่วคราว โดยในการวิเคราะห์จะพิจารณาถึงผลกระทบของอัตราส่วน X/R, เบอร์เดน และระดับความแม่นยำที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของหม้อแปลงกระแส

นำเสนอแผนการทดสอบรีเลย์ในรูปแบบที่จะทำให้เห็นสมรรถนะของรีเลย์ที่แท้จริง โดยนำข้อมูลไฟล์ PL4 ซึ่งเป็นไฟล์เข้าที่พูดของโปรแกรม EMTP ซึ่งที่สามารถใช้ร่วมกับ โปรแกรม Freja sim300 disturbance simulator ในการแปลงไฟล์ให้ใช้กัน ได้กับเครื่องทดสอบรีเลย์ Programma รุ่น Freja 300 เพื่อทดสอบสมรรถนะของรีเลย์ผลต่างรุ่น SEL-587 ในสภาวะต่าง ๆ โดยสามารถนำแบบจำลองไปใช้ในการพิจารณาออกแบบเลือกหม้อแปลงกระแส และรีเลย์ที่มีความเหมาะสมในระบบป้องกัน เพื่อลดความผิดพลาดในการทำงานของรีเลย์ ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง และเกิดความคุ้มค่าในการลงทุน

### 1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดแบ่งตามหัวข้อเรื่องไว้ทั้งสิ้นจำนวน 7 บท ในบทแรกได้กล่าวถึงความสำคัญของระบบป้องกันและแนะนำโปรแกรม ATP-EMTP ที่จะนำมาใช้สร้างแบบจำลอง รวมถึงวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2. ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นของหม้อแปลงกระแส ได้กล่าวถึงพื้นฐานของหม้อแปลงกระแส มาตรฐานที่ใช้อ้างอิงและได้อธิบายสภาวะต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นในหม้อแปลงกระแสตลอดถึงโครงสร้าง และการเลือกหม้อแปลงกระแสไปใช้งาน

บทที่ 3. หลักการทำงานของรีเลย์ผลต่าง ได้อธิบายถึงการทำงานของรีเลย์ผลต่างที่ใช้หลักการ Percentage Differential Current และหลักการ Harmonic Restraint รวมถึงข้อผิดพลาดของหลักการดังกล่าว

บทที่ 4. แบบจำลองหม้อแปลงกระแสและระบบ อธิบายถึงหลักการรวมถึงวิธีการสร้างแบบจำลองหม้อแปลงกระแสและระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองพร้อมทั้งได้แสดงข้อและขอบเขตของกรณีศึกษาไว้ในบทนี้ด้วย

บทที่ 5. การทดสอบรีเลย์ผลต่างกล่าวถึงการทดสอบรีเลย์ด้วยวิธีการสมัยใหม่ที่ใช้ข้อมูลเข้าที่พุดจากโปรแกรม ATP-EMTP มาทดสอบรีเลย์ผลต่าง SEL-587 ด้วยเครื่องทดสอบรีเลย์ Programma รุ่น Freja 300 โดยได้กล่าวถึงวิธีการและขั้นตอนทั้งหมดในการทดสอบรีเลย์

บทที่ 6. ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแสได้แสดงรูปคลื่นผลลัพธ์ในกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่ได้จากโปรแกรม ATP-EMTP เปรียบเทียบให้เห็นถึงรูปคลื่นในสภาวะทรานเซียนต์ในขณะที่มีการอิ่มตัวและไม่มีการอิ่มตัวในแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส

บทสุดท้ายเป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ส่วนของภาคผนวกได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการแก้ไขค่าเริ่มต้นของโปรแกรม EMTP ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ข้อมูลของรีเลย์ SEL587 และข้อมูลของเครื่องทดสอบรีเลย์ Programma รุ่น Freja300

### 1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

#### 1.4.1 ส่วนที่เป็น Software ประกอบด้วย

- ATP-EMTP (Alternative Transient Program – Electromagnetic Transients Program)
- PCPLOT for Windows
- Freja Sim300 Disturbance Simulator
- Mathcad 2000 Professional
- MS Office
- Notepad

#### 1.4.2. ส่วนที่เป็นHardware ประกอบด้วย

- คอมพิวเตอร์
- เครื่องทดสอบรีเลย์ Programma รุ่น Freja 300
- รีเลย์ผลต่าง Schweitzer Engineering Laboratories รุ่น SEL-587

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นของหม้อแปลงกระแส

### 2.1 ทฤษฎีของหม้อแปลงกระแส

หม้อแปลงกระแส แตกต่างกับ หม้อแปลงกำลัง แต่ใช้หลักการ electromagnetic induction เหมือนกัน ลักษณะการใช้งานต่างกัน ในหม้อแปลงกำลัง กระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ จะมีความสัมพันธ์กับกระแสด้านทุติยภูมิ ซึ่งเป็นไปตามโพล แต่หม้อแปลงกระแส มีขดลวดปฐมภูมิ ต่ออนุกรม กับสาย เพื่อวัดกระแสที่ไหลผ่าน หรือกล่าวได้ว่า กระแสในขดลวดปฐมภูมิ จะไม่ขึ้นกับโพลที่ต่ออยู่

อาจแบ่งประเภทของ หม้อแปลงกระแส ได้เป็น 2 ชนิดตามการใช้งาน

1. หม้อแปลงกระแสสำหรับการวัด (Measurement CT)
2. หม้อแปลงกระแสสำหรับการป้องกัน (Protection CT)

#### 2.1.1 หน้าที่ของหม้อแปลงกระแส

คือ แปลงกระแสสูงค่าหนึ่งเป็นกระแสอีกค่าหนึ่งที่ต่ำลง ตามมาตรฐานกำหนด อัตรากระแส ของขดลวดทุติยภูมิ ไว้ที่ 5A และ 1A เพื่อเป็นมาตรฐานในการผลิตอุปกรณ์ หรือเครื่องมือ ที่นำมาต่อเข้าด้านทุติยภูมิ กรณีใช้งานกับไฟแรงสูง จำเป็นต้องมีฉนวนที่สามารถทนต่อแรงดันใช้งาน และแรงดันผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นในระบบ แต่หากไม่คำนึงถึงฉนวน (insulation) สิ่งสำคัญของหม้อแปลงกระแส ที่ต้องมี คือ

- ขดลวดปฐมภูมิ (primary winding)
- แกนเหล็ก (magnetic core)
- ขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding)
- โหลดภาระ (burden)

ขดลวดปฐมภูมิ เป็นขดลวดที่ต่ออนุกรม กับ สาย หรือ วงจรด้านปฐมภูมิ แบ่งเป็นชนิด มีรอบเดียว (single-turn primary winding) ได้แก่ ring-type หรือ through-type ใช้ line conductor / cable, หรือ บัสบา คล้องหรือสวมให้ผ่านช่อง (window) ของแกนที่มีขดลวดทุติยภูมิ พันอยู่จึงถือเป็นรอบเดียว และชนิดที่มีหลายรอบ (multi-turn primary winding หรือ wound primary current transformer) ขดลวดปฐมภูมิ มีหนึ่งรอบจะดีกว่าหลายรอบ กล่าวคือผลต่อแรงทางกลที่กระทำกับตัวนำของปฐมภูมิ ในขณะที่กระแสลัดวงจร ไหลผ่าน และความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสสูง (dynamic and thermal stresses)

แกนเหล็ก (magnetic core) เป็นแกนเหล็กที่ให้ induced flux ไหล คุณสมบัติของหม้อแปลง กระแส ที่สำคัญคงเป็นเรื่องความละเอียดถูกต้องแม่นยำ และความเที่ยงตรง (accuracy) ของหม้อแปลงกระแสคุณสมบัตินี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกน และโครงสร้างของแกน จึงมักใช้ magnetic alloys

ขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding) เป็นขดลวดชุดที่สองที่พันบนแกนเพื่อลดกระแสให้ต่ำลง สามารถนำอุปกรณ์ต่าง ๆ มาต่อเพื่อวัดค่าได้ คุณสมบัติของ หม้อแปลงกระแสขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (flux density) ในแกน (core) เป็นสำคัญ ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ ทั้งหมดในวงจรทุติยภูมิ ส่วนหนึ่งคือ อิมพีแดนซ์ ของขดลวดทุติยภูมิ บางกรณีจะมีค่ามากกว่าอิมพีแดนซ์ ของอุปกรณ์ หรือ เบอร์เดน ที่ต่อเข้า

โหลดภาระ (burden) เป็นอิมพีแดนซ์ ของอุปกรณ์ที่ต่อทาง ทุติยภูมิ เช่น รีเลย์ เครื่องมือวัด หรืออุปกรณ์อื่น ๆ รวมทั้งสายที่ต่อระหว่างอุปกรณ์กับ ขั้วทุติยภูมิ รวมทั้งหมด คือ เบอร์เดน ของหม้อแปลงกระแส อาจมีหน่วยเป็น VA หรือ โอห์ม ก็ได้ เช่น

$$\begin{array}{l} \text{หม้อแปลงกระแส ที่มี อัตราเบอร์ดน เท่ากับ} \\ \text{อัตรากระแสทุติยภูมิ} \\ Z_b: \text{เบอร์ดน} \end{array} \quad = \quad \begin{array}{l} P \\ I_s \\ P/(I_s)^2 \end{array} \quad \begin{array}{l} VA \\ A \\ \text{ohm} \end{array}$$

ถ้า เบอร์ดน มี power factor เท่ากับ  $\cos \phi$

$$\text{ค่า resistance จะเท่ากับ} \quad R_b = Z_b \cdot \cos \phi$$

$$\text{ค่า reactance จะเท่ากับ} \quad X_b = Z_b \cdot \sin \phi$$

บางคนอาจมีความเข้าใจผิดคิดว่าซื้อ หม้อแปลงกระแส ที่มี เบอร์ดน สูง ๆ ไว้ก่อน เมื่อเวลาใช้งานจะต่อ เบอร์ดน ที่มีค่าต่ำกว่าอัตราเบอร์ดน มากแล้วจะทำให้ได้ความแม่นยำดีขึ้น ความผิดพลาด น้อยลง ความเข้าใจนี้ไม่ถูกต้อง ซึ่งจะกล่าวต่อไป

ค่ากำหนดต่าง ๆ ของหม้อแปลงกระแส

- อัตรากระแสปฐมภูมิ
- อัตรากระแสทุติยภูมิ
- อัตราเบอร์ดน
- ความถี่ใช้งาน
- ระดับความแม่นยำ
- แรงดันระบบด้านปฐมภูมิ
- อัตรากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ และระยะเวลาที่ไหลผ่าน

## 2.1.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงกระแส

ถ้ากระแส  $I_p$  ไหลผ่านทาง ขดลวดปฐมภูมิ จะเกิด

- induced flux : ใน แกน
- ฟลักซ์ ในแกน จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันที่ขดลวดปฐมภูมิ :  $E_s$
- $E_s$  กัดขึ้นทำให้เกิดกระแส  $I_s$  ไหลในวงจรทุติยภูมิ
- กระแสที่ไหลเป็นไปตาม ampere-turn balance

$$N_p I_p = N_s I_s \text{ (เป็น ideal transformer)} \quad (2.1)$$

ในทางปฏิบัติ ขดลวดทุติยภูมิ จะมีทั้ง resistance และ leakage reactance และต้องคำนึงถึง capacitance ที่อาจมีค่าสูงจนมีผลต่ออิมพีแดนซ์ของวงจร

$$E_s = I_s Z_s = k \cdot \phi_m \quad (2.2)$$

$\phi_m$  เป็น exciting ampere-turn :  $N_p I_p$

ฉะนั้น  $N_p I_p$  จึงถูกแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนของ primary exciting ampere-turn :  $N_p I_e$  และ ส่วนของ primary transferring ampere-turn :  $N_p I_{pt}$  เมื่อกระแสที่แปลงไปที่ด้านทุติยภูมิไม่ใช่กระแสทั้งหมด จึงทำให้เกิด current error หรือ ratio error ขึ้น

## 2.1.3 โลหะที่ใช้ทำ core

โลหะที่ใช้ทำแกนเหล็ก (core) ต้องเป็น ferromagnetic material เนื่องจาก error เกิดขึ้นจาก magnetizing current ที่ใช้ในการสร้าง flux จึงจำเป็นต้องศึกษาเรื่อง magnetizing curve ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง flux density และ magnetizing ampere-turn หรือ B-H curve

Material ส่วนใหญ่ที่ใช้ คือ

- hot rolled silicon-iron alloy
- cold rolled oriented silicon-iron alloy (electrical steel)
- nickel-iron alloy
- composite material

### 2.1.3.1 Hot rolled silicon-iron alloy

ในยุคแรก ๆ material ที่ใช้ทำแกนเหล็กมีส่วนผสมของ mild steel กับ carbon ปริมาณเล็กน้อย มีข้อเสียคือ ageing เร็ว หรือมีอายุการใช้งานสั้น คือช่วงใช้งานจะมี hysteresis loss สูงขึ้นเรื่อย ๆ ต่อมามีการพัฒนาใช้ silicon ผสมแทน carbon ทำให้ปัญหาเรื่อง ageing หดไป แต่ถ้าใส่ silicon มากจะเปราะ และหักง่าย ไม่สะดวกเวลาตัดและเจาะรู ปัจจุบันมี hot rolled electrical

hot rolled electrical steel ที่มี silicon ผสมน้อยลงมีคุณสมบัติของ permeability ดีขึ้น จึงนิยมใช้ทำหม้อแปลง ทำให้มีชื่อเรียกว่า transformer grade

### 2.1.3.2 Cold rolled oriented silicon-iron alloy (electrical steel)

ต่อมามีการพัฒนาการผลิตเหล็กมากขึ้นสามารถใช้วิธี cold rolled ทำให้สามารถปรับปรุง magnetic property ได้ดีขึ้นทำให้เกิดการเรียงตัวกันของ crystal structure ดีขึ้น ในทิศทางที่รีด ทำให้ flux ที่ไหล ในแนวนานกับผิวของแผ่นเหล็ก (laminated sheet) ได้ค่า permeability ดีขึ้นมาก ลด ค่าสูญเสีย (losses) ทำให้ หม้อแปลงกระแส มีขนาดลดลง แต่ flux ที่ไหลในทิศทางที่หักโค้งจะค้อยกว่าแนวนาน ฉะนั้นการทำ core sheet เป็นรูปตัว T หรือตัว U จะค้อยกว่าการทำให้เป็น strip wound core และเป็นรูป ring-type core

### 2.1.3.3 Nickel-iron alloy

เป็นโลหะที่มีค่าสูญเสีย (losses) ต่ำ แต่มี permeability สูง มีข้อเสียคือ คุณสมบัติ magnetic performance จะเปลี่ยนแปลงถ้าได้รับ mechanical stress ส่วนใหญ่เป็น c-core จะประกอบและ bonded ก่อนแล้วจึงตัดเป็นแบ่งเป็นรูป C ฉะนั้นจำเป็นต้องป้องกันเวลาขนย้าย และประกอบอย่างดี การผลิต alloy ชนิดนี้มีราคาแพง จึงใช้เฉพาะ หม้อแปลงกระแส ที่ต้องการ accuracy สูงเท่านั้น

### 2.1.3.4 Composite material

ใช้ผสมกันระหว่าง nickel-iron alloy กับ electrical steel ข้อดี คือ สามารถใส่ nickel-iron alloy ไว้ตรงกลางระหว่าง electrical steel ทำให้มี mechanical reinforce

## 2.1.4 การบอกลักษณะของ หม้อแปลงกระแส

ratio คือ อัตราส่วนของการแปลงกระแส จากกระแสด้านปฐมภูมิ เป็นกระแสด้านทุติยภูมิ เช่น ratio ของ current transformer 300 : 5 มีความหมายว่า หม้อแปลงกระแส มี rated primary current เท่ากับ 300 A และ rated secondary current มีค่า 5A หรือ แปลงกระแส ที่เป็น multi-ratio : 100-1200 A. สามารถเลือกกระแสใช้ได้ 10 ratio ตั้งแต่ 100 A. ถึง 1200 A. โดยที่ กระแสด้านทุติยภูมิ มีค่าคงที่เท่ากับ 5 A. และ กรณีที่มีทุติยภูมิ หลายชุดพันบนแต่ละ core ให้เลือกใช้งาน เรียกว่า multi-core เช่น 100-1200//5

- current rating factor : RF คือ ค่าจำนวนเท่าของกระแสด้านปฐมภูมิ ที่หม้อแปลงกระแส สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง เช่น 1, 1.3, 2 เป็นต้น
- ความแม่นยำ (accuracy) คือความถูกต้องแม่นยำของการแปลงกระแส ซึ่งมีลักษณะต่างกัน ระหว่าง ชนิด protection และ metering

- Polarity ใช้ในกรณีที่น่า ทุติยภูมิ ของหม้อแปลงกระแส สองชุด หรือมากกว่าสองชุดมาต่อกัน และทิศทางการไหลของกระแส

### 2.1.5 ข้อกำหนดของความแม่นยำของหม้อแปลงกระแส (accuracy class)

#### 2.1.5.1 ตามมาตรฐาน IEEE/ANSI

Protective current transformer มีข้อมูลกำกับที่กำหนดไว้ดังนี้

- C classification เป็นการบอกค่า accuracy ที่ระบุได้จากการคำนวณ
- T classification เป็นการบอกค่า accuracy ที่ระบุได้จากการทดสอบ (test)
- Secondary terminal voltage rating เช่น กรณีพิกัดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส = 5 A

#### ตารางที่ 2.1 เบอร์เดนมตรฐานของหม้อแปลงกระแสสำหรับระบบป้องกัน

Class	burden	resistance	inductance (mH)	impedance ( $\Omega$ )	volt-ampere (at 5 A)	power factor
C100	B-1	0.5	2.3	1.0	25	0.5
C200	B-2	1.0	4.6	2.0	50	0.5
C400	B-4	2.0	9.2	4.0	100	0.5
C800	B-8	4.0	18.4	8.0	200	0.5

เช่น C 100 ความหมายคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านด้านปฐมภูมิ เท่ากับ 20 เท่าของ อัตรากระแส ในขณะที่มี rated burden 1  $\Omega$  ต่ออยู่ด้าน ทุติยภูมิ จะเกิดแรงดันที่ secondary terminal เท่ากับ 100 โวลต์ (rated burden x (20 x 5) = secondary volt) และมี ratio error จากการคำนวณไม่เกิน 10%

#### 2.1.5.2 ตามมาตรฐาน IEC Standard (International Electrotechnical Commission)

Relaying (protective core)

- ALF : accuracy limit factor คือ ค่าจำนวนเท่าของกระแสที่ ratio error ไม่เกินมาตรฐาน
- Class มี 5P, 10P

เช่น ALF = 20. In = 5 A. class 5P

ความหมาย คือ ที่  $20 \times 5 = 100$  A, % ratio error ไม่เกิน 5.0%

- continuous-thermal-current rating factor ที่ ambient temperature เท่ากับ 30  $^{\circ}$ C ค่า rating factor นี้กำหนดไว้ 6 ค่า คือ 1.0, 1.33, 1.5, 2.0, 3.0 และ 4.0

- shot-time current rating คือ ค่ากระแสสูงที่มีผลด้านแรงทางกล และความร้อน

- mechanical current rating ( $I_{dyn}$ ) คือ ค่ากระแส ลัดวงจร สูงสุดที่ไหลผ่านขดลวด โดยขดลวดสามารถทนแรงกล (mechanical force) ที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งกำหนดเป็นค่า RMS ของ AC component ของรูปคลื่น symmetrical primary current เมื่อเกิดลัดวงจรทางด้าน วงจรปฐมภูมิ

- short-time thermal current rating ( $I_{th}$ ) คือ ค่ากระแส short circuit สูงสุดที่ไหลผ่าน ขดลวด ด้าน ปฐมภูมิ โดยที่ขดลวดสามารถทนความร้อนที่เกิดขึ้น โดยมีอุณหภูมิไม่เกินจากค่ากำหนด ซึ่งกำหนดค่าเป็น RMS ของ symmetrical primary current

อุณหภูมิที่หม้อแปลงกระแสสามารถทนได้ตามชนิดของฉนวนคือ กรณีฉนวนชนิด temperaturerise 55 °C มีอุณหภูมิไม่เกิน 250 °C และกรณีชนิด 80 °C มีอุณหภูมิไม่เกิน 350 °C ใช้เวลาทดสอบนาน 1 วินาที

## 2.1.6 การเลือกหม้อแปลงกระแส

### 2.1.6.1 การเลือก primary rated current

ต้องคำนึงถึงขณะที่กระแสมีปริมาณต่ำ ๆ minimum current ที่ไหลผ่านขณะใช้งานด้วยเพราะ primary ampere-turn จะมีผลต่อคุณสมบัติเรื่อง ratio error และ phase error

อีกประการหนึ่งเรื่องของ dynamic force และ thermal stress ที่เกิดขึ้นในขณะที่มีกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นไหลผ่านด้านขดลวดปฐมภูมิ

ถ้ามี ขดลวดปฐมภูมิ หนึ่งรอบ หรือเป็น bar-type จะมีราคาถูกกว่าชนิดหลายรอบ wound-type primary winding

บางกรณีอาจมีความจำเป็นต้องใช้ชนิด multi-ratio ซึ่งทำได้โดย

- ให้รอบด้านทุติยภูมิคงที่ไว้และต่อรอบด้าน ปฐมภูมิ ให้ขนาน หรืออนุกรมกัน
- ให้รอบปฐมภูมิคงที่ไว้แล้วใช้วิธี tap รอบ ออกมาตามต้องการ หรือต่อขนาน หรือ อนุกรม ด้าน ทุติยภูมิ
- ออกแบบโดยใช้สองวิธีรวมกัน

### 2.1.6.2 การเลือก secondary rated current

ในปัจจุบัน secondary current rating มีอยู่ 2 ชนิด คือ 1 A และ 5 A อาจมีข้อคำถามว่าจะเลือกชนิดไหนมาใช้งานดี

ลองพิจารณาแปลงกระแสสองตัวที่มีกระแส 5 A และ 1 A ถ้ามี flux density เท่ากัน มีค่า rated primary current เท่ากัน มีขนาด core ที่กำหนดเท่ากัน และ secondary ampere-turn มี mean length เท่ากัน ขณะที่ทดสอบกับ rated burden ที่ primary rated current จะมีค่า error เท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติสายที่ใช้ต่อระหว่าง terminal กับ เบอร์เดน หรือ รีเลย์ มีความ

ยาวมาก ทำให้มี lead resistance ไม่เท่ากัน จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญ ถ้า lead ที่ใช้ค้อมีขนาดเดียวกัน จะพบว่าชนิด 1 A. มีเบอร์เดน (VA) น้อยกว่า 5 A. ถึง 1/25

อีกประการหนึ่งชนิด 1 A. สามารถปรับค่า error ได้ง่ายกว่า โดยปรับรอบด้านทุติยภูมิ เพื่อชดเชยกับ primary ampere-turn :  $N_p I_p = N_s I_s$  เช่น ปรับรอบ 1 รอบของหม้อแปลงกระแส 100 : 5 จะส่งผลถึง 5% แต่มีผลกับ หม้อแปลงกระแส 100/1 เพียง 1%

ชนิด 1 A มีข้อด้อยเรื่องราคา คือ ราคาจะแพงกว่าชนิด 5 A แต่ผู้ผลิตอาจจะปรับขนาดของ core ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อลดค่า material เนื่องจากเบอร์เดนน้อยกว่า 5 A

ข้อด้อยอีกอย่างหนึ่งของชนิด 1 A คือ จะเกิดแรงดันสูงกว่า 5 A ขณะเกิด open circuit ที่ทุติยภูมิเนื่องจากมีจำนวนรอบของขดทุติยภูมิมากกว่า

สรุป ไม่มีข้อกำหนดตายตัวว่าชนิดไหนดีกว่า แต่สามารถกล่าวได้ว่า ควรเลือกขนาด 5 A. ก่อน ยกเว้นว่าจะมีความจำเป็นบางประการ เช่น ระบบทั้งหมดถูกออกแบบไว้เป็นชนิด 1 A. มีปัญหาเรื่อง spare unit หรือ ระยะทางระหว่าง หม้อแปลงกระแส กับอุปกรณ์ป้องกันอยู่ห่างกันมาก เป็นต้น

### 2.1.6.3 การเลือก secondary rated burden

การพิจารณาหา rated burden ต้องคำนึงถึงสาย lead ที่ใช้ต่อระหว่าง หม้อแปลงกระแส กับอุปกรณ์ต่าง ๆ standard burden มีค่าตามมาตรฐานกำหนดไว้ดังกล่าวมาแล้ว เวลาใช้งาน เบอร์เดนอาจมี power factor ไม่เหมือนกับมาตรฐานที่กำหนดไว้ทำให้มี error เกิดขึ้นไม่เหมือนกับตอนที่ทดสอบอีกประการหนึ่งปกติค่า error ที่ เบอร์เดนต่ำ ๆ มักจะเป็นด้านบวก (positive) มากกว่า เมื่อเพิ่ม burden มากขึ้นจนถึง rated burden ค่า error จะลดลงและไปอยู่ด้านลบ (negative) ถ้าเลือกใช้ หม้อแปลงกระแส ที่มี rated burden สูงเกินไปมาใช้งานเวลาที่นำเบอร์เดนที่ต่ำกว่ามาต่อ อาจทำให้ error อยู่ด้านที่เป็น positive ซึ่งอาจมีค่าสูงกว่าด้าน negative และจะมีผลมากถ้าการออกแบบใช้ turn correction ปรับ error เพื่อให้ขณะที่มี rated burden มี error ไม่ให้เกิดค่ากำหนด การเพิ่ม turn ทำให้ error เป็น positive มากขึ้น

### 2.1.7 การใช้งาน overload

ปกติ หม้อแปลงกระแส จะสามารถใช้งานในสภาพ overload 120% ได้นานระยะเวลาหนึ่ง โดยมีข้อจำกัดที่ต้องคำนึงถึงคือ temperature rise ของขดลวดและน้ำมัน นอกจากหม้อแปลงกระแสจะกำหนด current factor ไว้เพื่อให้สามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่องโดยการออกแบบ current density และ temperature rise ไว้ให้เหมาะสม อย่างไรก็ตามที่ออกระดับความแม่นยำแบบไว้จะดีที่สุดที่ current factor สูงสุดแต่นำไปใช้งานที่ 100% อาจจะมีระดับความแม่นยำด้อยลง และที่กระแสต่ำอาจไม่เหมาะสมจะนั้นควรเลือก rated primary current เท่ากับกระแสที่ไหลผ่านจริง หรือ เลือกจากค่ามาตรฐานที่สูงกว่าแต่ให้อยู่ใกล้กับค่าใช้งานจริงมากที่สุด

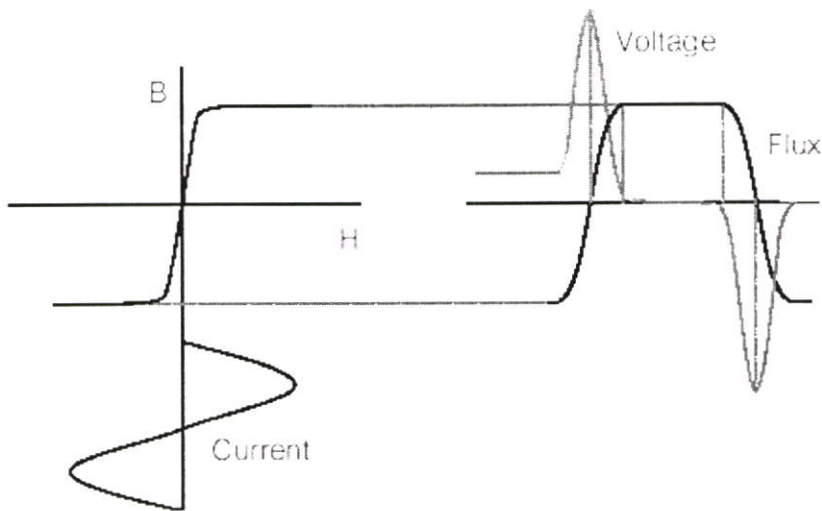
เช่น ถ้าใช้กับกระแส load เท่ากับ 500 A. ให้เลือก rated primary current เท่ากับ 500 A. หรือ 600 A. ตามมาตรฐาน ซึ่งจะดีกว่าเลือกขนาด 400 A. และกำหนด current factor 1.25 เท่า

การทดสอบ หม้อแปลงกระแส ที่มีสภาพ overload เช่นที่ 120% จะมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบ error ของระดับความแม่นยำ แต่ไม่มีวัตถุประสงค์เรื่องการพิจารณาความสามารถใช้ continuous loading ที่ 120%

### 2.1.8. Open circuit voltage ใน หม้อแปลงกระแส

ในขณะที่มีเบอร์เดนต่ออยู่ที่วงจรถูขั้วของ CT จะมีแรงดันคร่อมเบอร์เดนเพียงเล็กน้อยเป็นระดับแรงดัน แต่เมื่อวงจรถูขั้วเกิด open หรือ กรณีที่ปลดสายต่อของเบอร์เดนออกขณะกำลังใช้งาน เมื่อมีกระแสไหลทางปฐมภูมิ จะทำให้เกิดไฟแรงสูงที่มีรูปร่างเป็น pulse ที่มี peak สูง อาจเป็นระดับ kilovolt ที่ secondary winding

หม้อแปลงกระแส ที่มี rated secondary current 5 A. มีเบอร์เดนขนาด 15 VA ต่ออยู่ ขณะที่กระแสไหลทางปฐมภูมิ เป็น rated current จะมีแรงดันที่ secondary terminal ประมาณ 3 volts แต่ถ้า secondary circuit เกิด open จะเกิดแรงดันที่มี peak สูงเป็นระดับ kV เพราะ primary ampere-turn ทั้งหมดจะเป็น exciting ampere-turn ไม่มี ampere-turn ในส่วนของ transferring จึงทำให้ core เกิด การอิ่มตัว (saturation) อย่างมาก



รูปที่ 2.1 แสดงรูปร่างของ flux ที่มี flat-topped shape

แรงดันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของ flux จึงทำให้ขณะที่ flux เปลี่ยนแปลงเป็นรูป flat โดยเร็วก็จะเกิด เป็นแรงดันสูงเฉพาะตรงนั้น (peaky) แรงดันสูงนี้อาจทำให้ฉนวนด้าน secondary เสียหาย (breakdown) และอาจเกิด overheat จาก eddy current losses ได้ด้วย ใน

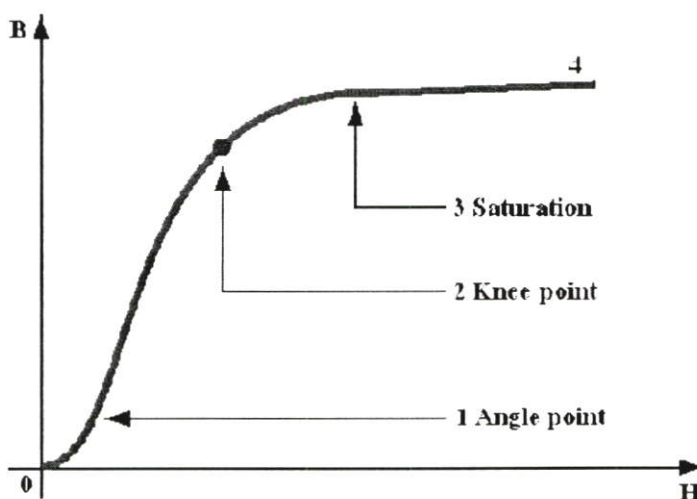
ทางปฏิบัติจึงต้องออกแบบให้มีฉนวนที่ทนแรงดันที่เกิดขึ้นนี้ตลอดเวลาถึงแม้ว่า routine test จะกำหนดให้ทดสอบเพียง 1 นาที

### 2.1.9 สิ่งแตกต่างกันระหว่าง protective และ metering current transformer

มีลักษณะบางประการที่แตกต่างกัน protective CT จะคำนึงเฉพาะ ratio error ส่วน phase error ไม่ค่อยสำคัญเหมือน metering CT ยกเว้นกรณีที่มีการนำไปเปรียบเทียบ phase กัน ระหว่างหม้อแปลงกระแสสองตัว จะพิจารณา error ของ metering CT เฉพาะในกรณีที่ primary current มีปริมาณ 5 -120% ของ rated current แต่ protective CT ต้องคำนึงถึงกระแสที่ระดับหลายเท่าของ rated current ที่เกิดขึ้นขณะวงจรด้านวงจรปฐมภูมิเกิดลัดวงจร การใช้ protective CT กับรีเลย์ผลต่างจำเป็นต้องคำนึงถึง exciting curve ของหม้อแปลงกระแสทั้งสองตัว หรือ มากกว่าสองตัว ที่นำมาต่อกัน หากมีความแตกต่างกันมาก จะทำให้ minimum setting หรือ mismatch setting (ที่คำนึงถึง tap changer compensation) ไม่เพียงพอ กรณี bus differential relay มีคุณลักษณะเป็น high impedance relay ค่าแรงดันที่เกิดจากกระแส mismatch คูณกับ relay impedance ต้องน้อยกว่า voltage setting ของรีเลย์

## 2.2 การอิ่มตัวของวัสดุตัวนำแม่เหล็ก (SATURATION)

การอิ่มตัวของวัสดุตัวนำแม่เหล็ก หมายถึง สภาพที่วัสดุตัวนำแม่เหล็กยอมรับสภาพการเปลี่ยนแปลงเป็นแม่เหล็กเต็มที่แล้ว [1-2]



รูปที่ 2.2 B-H curve (SATURATION)

แม้ว่าวัสดุตัวนำแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวแล้ว แต่ถ้าเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กในวัสดุตัวนำแม่เหล็ก (B) จะเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย

ถ้านำความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (B) กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุตัวนำแม่เหล็กชนิดใดชนิดหนึ่งมาเขียนรูปคลื่น การเกิดสนามแม่เหล็ก (magnetization curve) หรือในบางครั้งเรียกว่า B-H curve จะได้เส้นโค้ง ดังรูป

จะเห็นว่าเมื่อ flux density สูงขึ้น จะต้องใช้กระแสมากขึ้นในการสร้างฟลักซ์ และเมื่อเลยจากจุด knee point กระแสจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วโดยที่ ฟลักซ์ เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือเรียกว่า โลหะมีสภาพอิ่มตัว (saturation) ซึ่งทำให้มี error มากในการ transferring

จาก B-H curve แสดงถึง oriented electrical steel ซึ่งความสัมพันธ์แบ่งได้เป็น 4 ช่วง

1. ช่วง 0-1 เป็นช่วงแรก originated electrical steel ความสัมพันธ์ระหว่าง B-H ไม่ linear ช่วงนี้ flux และ exciting current ยังต่ำมาก
2. ช่วง 1-2 หลังจากจุดที่ 1 จนถึงจุดที่ 2 ที่เรียกว่า knee point ช่วงนี้ความสัมพันธ์เป็น linear เรียกว่าช่วง linear จุด knee point คือจุดที่ flux density เพิ่มขึ้น 10% ขณะที่กระแสเพิ่มขึ้น 50%
3. ช่วง 2-3 หลังจากจุดที่ 2 จนถึง จุดที่ 3 เรียกจุดนี้ว่าจุดอิ่มตัว (saturation) ช่วงนี้ flux density เปลี่ยนเพิ่มขึ้นน้อยมาก แต่ต้องการกระแสมาก
4. ช่วงหลังจากช่วงอิ่มตัว ไปแล้ว ช่วงนี้ flux density แทบไม่เปลี่ยนแปลง แต่ต้องการกระแส มาก เรียกว่าช่วง saturation

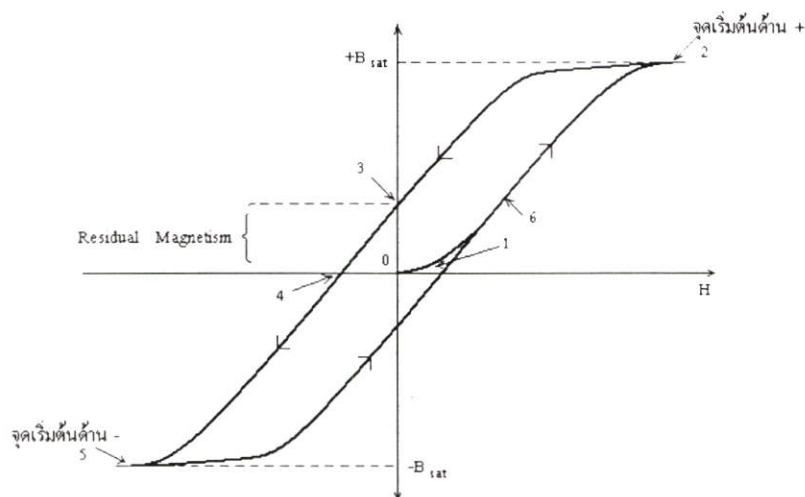
Protective current transformer สามารถใช้ช่วง 0-3 ในขณะที่มีกระแสปกติ แต่ขณะมีกระแสลัดวงจร ไหลผ่านอาจอยู่ช่วงต้น ๆ ของ 4 แต่ metering current transformer จะใช้ช่วง 0-1 เท่านั้น ในทางปฏิบัติอาจใช้ถึงช่วงก่อน knee point ขณะที่ มี full load current ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ เพราะจะใช้ core material น้อยลง

### 2.3 ฮิสเตอร์รีซิส (HYSTERESIS)

ฮิสเตอร์รีซิสเป็นปรากฏการณ์หนึ่งเกิดขึ้นในวัสดุตัวนำแม่เหล็ก อธิบายได้โดยใช้ magnetization curve หรือ B-H Curve ที่แสดงในรูป 2.3

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำที่พันอยู่รอบแกนตัวนำแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงดันแม่เหล็ก (MMF) ถ้า MMF เพิ่ม ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) และความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ย่อมเพิ่มขึ้นด้วย จนกระทั่งแกนตัวนำแม่เหล็กอิ่มตัว (จุด 1 ถึงจุด 2 ของ curve)

ถ้ากระแสไฟฟ้าลดลงถึงศูนย์ MMF กับ H ย่อมมีค่าเป็นศูนย์ด้วยเช่นกัน แต่ B ไม่เป็นศูนย์ (จุด 2 ถึงจุด 3) แสดงว่า B ถ้าหลัง H ทั้งนี้เพราะเกิดสนามแม่เหล็กตกค้าง (Residual Magnetism)



รูปที่ 2.3 B-H curve (HYSTERESIS)

ในแกนตัวนำแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กตกค้างนี้ ถ้าเกิดขึ้นในแกนตัวนำแม่เหล็กที่เป็นเหล็กกล้า ซึ่งรักษาอำนาจการเกิดสนามแม่เหล็กตกค้างได้เป็นเวลานาน เราเรียกว่าแม่เหล็กถาวร (permanent magnetism)

หลังจากนั้น ถ้าเราเพิ่มกระแสไฟฟ้าในทิศทางลบอย่างช้า ๆ ค่า B จะลดลงมาที่ศูนย์ แต่ H ที่ทำให้ B เป็นศูนย์นี้เป็น H ด้านลบ (จุด 4) เมื่อเพิ่มกระแสด้านลบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง B ถึงจุดสูงสุดทางด้านลบ แกนตัวนำแม่เหล็กจึงเกิดการอิ่มตัวอีกครั้งหนึ่ง (จุด 5)

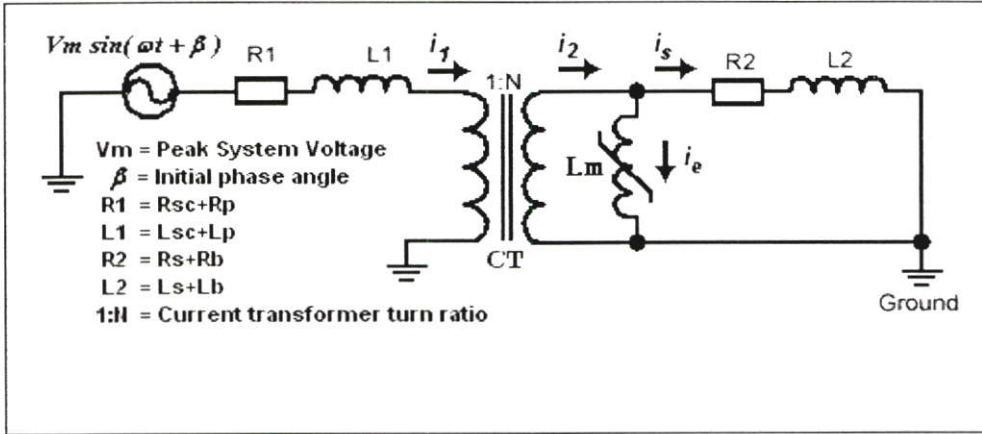
ถ้าลดกระแสด้านลบลงมาที่ศูนย์ (จากจุด 5 ถึง 0) และเพิ่มกระแสด้านบวกอีกครั้งหนึ่ง curve ที่เกิดขึ้นจะกลับไปรวมกับ curve เดิม ทำให้ magnetization curve ครอบ loop ที่จุด 6

การเปลี่ยนแปลงของ magnetization curve จากจุด 2, 3, 4, 5, 6 แล้วกลับมาครอบรอบที่ 2 อีกครั้งหนึ่งนี้ เราเรียกว่า Hysteresis loop และการที่ B ล้าหลัง H หรือ B ไม่กลับไปยังจุดศูนย์พร้อมกับ H เราเรียกว่า ฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis)

## 2.4 การวิเคราะห์กระแส และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงกระแส

ในทางปฏิบัติการคำนวณวิเคราะห์หาค่า และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงกระแส ในสถานะทรานเซียนต์จะพิจารณาจากวงจรสมมูลนี้[11] โดยกระแส ที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.3-2.5)

กระแสที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบที่เป็นกระแสสลับในสภาวะอยู่ตัว (Steady State) และองค์ประกอบที่เป็นกระแสตรงซึ่งเป็นสภาวะทรานเซียนต์ องค์ประกอบกระแสตรงนี้จะมีอิทธิพลต่อเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแส ซึ่งจะนำไปสู่สภาวะการอิ่มตัวของแกนเหล็ก



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลอย่างง่ายของหม้อแปลงกระแส และระบบขณะเกิดลัดวงจร

$$i_1 = \hat{I}_1 \sin(\omega t + \beta - \phi) - \hat{I}_1 \sin(\beta - \phi) e^{-R_1 t / L_1} \quad (2.3)$$

$$\hat{I}_1 = \frac{V_m}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}$$

$$\phi = \tan^{-1}(\omega L_1 / R_1)$$

$$i_2 = \hat{I}_2 \sin(\omega t + \beta - \phi) - \hat{I}_2 \sin(\beta - \phi) e^{-R_2 t / L_2} \quad (2.4)$$

ทำให้กระแสทางดำนทุติยภูมิมีรูปร่างผิดเพี้ยนไป โดยสภาวะทรานเซียนต์ จะมีขนาดสูงสุด (fully DC offset) เมื่อ  $\sin(\beta - \phi)$  มีค่าเท่ากับ  $-\pi/2$  โดยสามารถคำนวณเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\Psi$ ) ที่เกิดขึ้นได้ดังสมการนี้

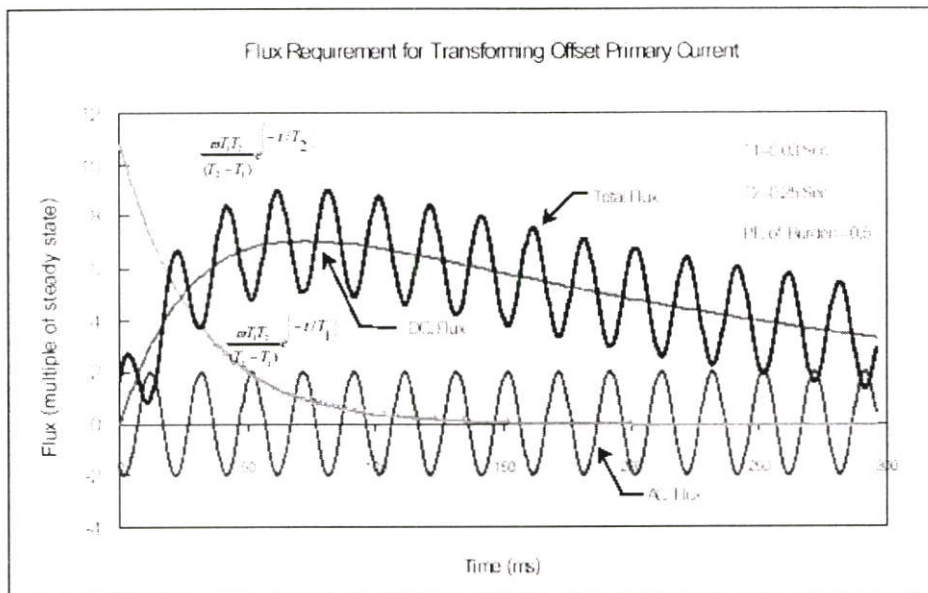
$$\Psi = \frac{\hat{I}_2 R_2}{\omega N} \left[ \frac{\omega T_1 T_2}{(T_2 - T_1)} (e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1}) - \frac{I}{\cos(\theta)} \sin(\omega t + \theta) \right] \quad (2.5)$$

$$\theta = \tan^{-1}(\omega L_2 / R_2)$$

$$T_2 = \frac{L_2 L_M}{R_2}$$

$$T_1 = L_1 / R_1$$

เส้นแรงแม่เหล็ก ที่คำนวณได้นี้ จะใช้ในการแปลงกระแสจากด้านปฐมภูมิไปยังด้านทุติยภูมิ หากค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่คำนวณได้นี้มีค่าสูงกว่าค่าเส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัวของแกนเหล็ก จะทำให้กระแสทางด้านทุติยภูมิมีขนาดลดลงและมีรูปร่างผิดเพี้ยน เส้นแรงแม่เหล็กที่คำนวณได้มีองค์ประกอบที่เป็นกระแสสลับซึ่งเป็นสภาวะอยู่ตัว และกระแสตรงซึ่งเป็นสภาวะทรานเซียนต์ ขนาดขององค์ประกอบกระแสตรง จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่เวลา  $T_1$  และ  $T_2$  โดย  $T_1$  จะมีขนาดแปรผันตรงกับค่า  $X/R$  ของระบบที่ต่ออยู่ทางด้านปฐมภูมินั้น หมายความว่า ในระบบที่มีค่า  $X/R$  สูง ก็จะมีผลทำให้ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กในสภาวะทรานเซียนต์ ที่มีขนาดสูงมากขึ้นตามไปด้วย [11] ส่วนขนาดขององค์ประกอบกระแสสลับแปรผันกลับกับค่าตัวประกอบกำลัง (PF หรือ  $\cos\theta$ ) ของเบอร์เดน ยิ่งค่า PF ของเบอร์เดนมีค่าต่ำเท่าใดก็จะมีผลทำให้ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กในสภาวะอยู่ตัวมีค่าสูงขึ้น



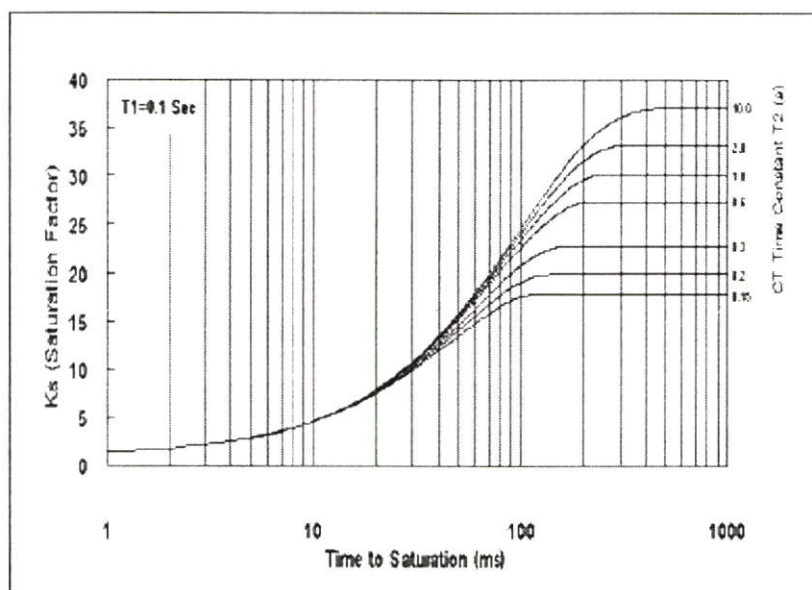
รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการใช้ในการสร้างกระแสด้านทุติยภูมิ เมื่อกระแสด้านปฐมภูมิ มีอเฟเซตกระแสตรง 100%

## 2.5 ปัจจัยการเกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก

ปัจจัยการเกิดการอิ่มตัว หรือ KS เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันจุดเข้า  $V_x$  (Knee point voltage) ของหม้อแปลงกระแส เทียบกับค่าแรงดันทางด้านทุติยภูมิที่เกิดขึ้นในขณะเกิดฟอลต์ ค่า KS สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$KS = \frac{V_x}{T_2 R_2} = \left[ \frac{\omega T_1 T_2}{(T_2 - T_1)} (e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1}) - \frac{I}{\cos(\theta)} \sin(\omega t + \theta) \right] \quad (2.6)$$

จากสมการที่ นำไปเขียนกราฟโดยกำหนดให้ค่าของ  $\sin(\omega t + \theta)$  มีค่าเท่ากับ -1 และ  $\cos(\theta)$  มีค่าเท่ากับ 1 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า KS กับเวลาที่จะเกิดการอิ่มตัว

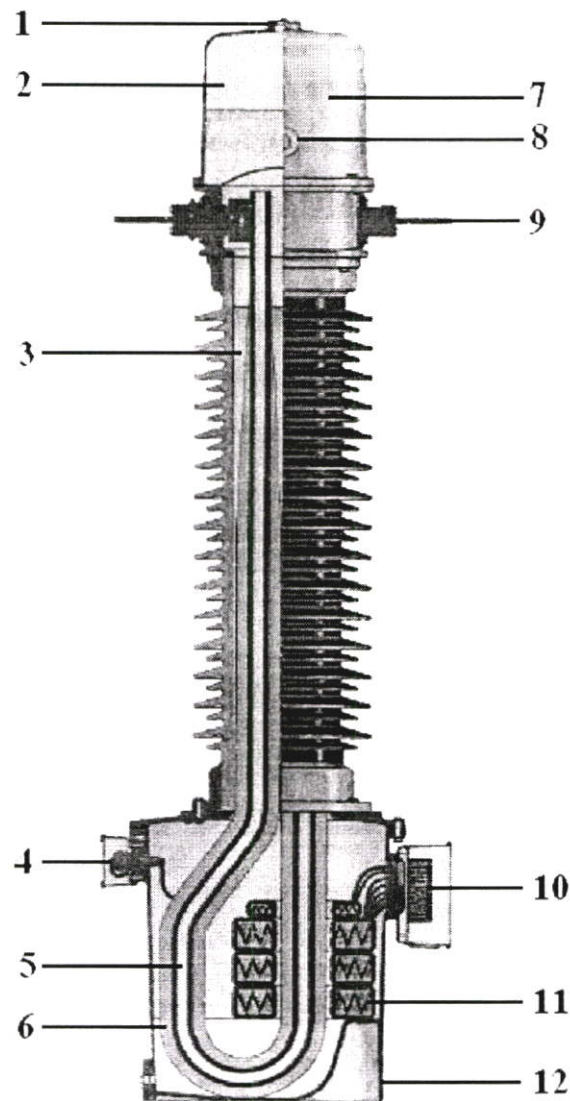


รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง KS และเวลาที่จะเกิดการอิ่มตัวเมื่อ T1 คงที่และ T2 ที่ค่าต่าง ๆ ที่ค่า PF ของเบอร์เด็น = 1

## 2.6 ลักษณะโครงสร้าง

ประกอบด้วยขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะยาว งอโค้งจาก High Voltage ด้านหนึ่งลงมาด้านล่างแล้วไปออกที่ High Voltage อีกด้านหนึ่งขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) จะอยู่ในโครงสร้างส่วนล่างพันอยู่บนแกนเหล็กซึ่งแกนเหล็ก (Core) มีขดลวดปฐมภูมิร้อยผ่าน อาจจะเป็น 1 รอบ หรือหลายรอบก็ได้ตามแต่ Ratio และ Accuracy ที่ต้องการผลิตขดลวดทุติยภูมิจะถูกดึงออกมาเป็น Terminal ต่าง ๆ อาจจะมีตั้งแต่ 1-6 Cores จำนวนของ Terminal ต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับ Ratio ของหม้อแปลงกระแสที่มีอยู่ ส่วนของ ขดลวดทั้งหมดจะแช่อยู่ใน Insultion Oil

การใช้งานหม้อแปลงกระแส จากขดลวดทุติยภูมิ จะแยกออกมาเป็น Core โดยแบ่งเป็น Ratio ของหม้อแปลงกระแส ซึ่งอาจจะปรับกระแสได้ตั้งแต่ 1-4000 A. โดยกระแสทางด้านทุติยภูมิ เป็น 1 A. หรือ 5 A. แล้วแต่ความต้องการใช้งานของ หม้อแปลงกระแสชนิดนั้น ๆ

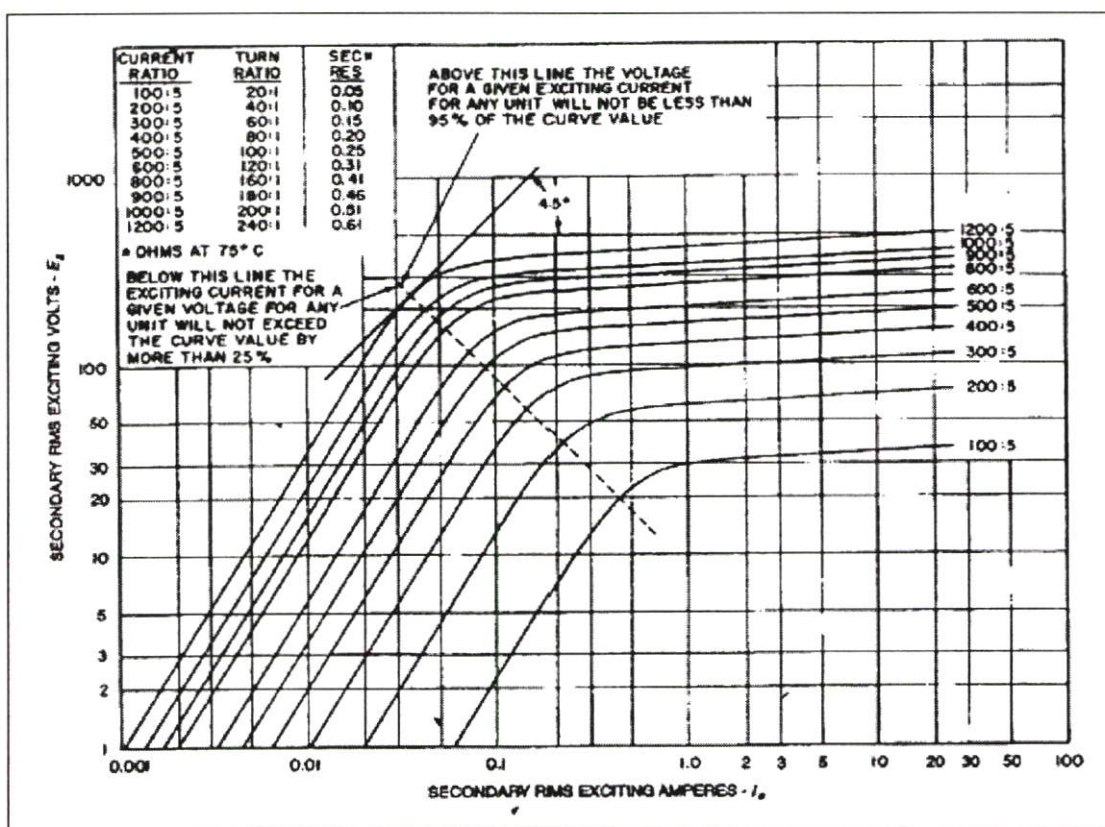


Current Transformer type IBM

- |                               |                             |
|-------------------------------|-----------------------------|
| 1 Oil fitted cap              | 7 Expansion system          |
| 2 Gas cushion                 | 8 Oil Sight glass           |
| 3 Quartz filling              | 9 Primary tap               |
| 4 Capacitive tap (on request) | 10 Terminal box             |
| 5 Primary conductor           | 11 Cores/secondary windings |
| 6 Paper insulator             | 12 Earth connecting         |

รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบและภาคตัดขวางภายในของ Current Transformer แบบ Bottom Core

ตัวอย่างของ Ratio ของ หม้อแปลงกระแส สามารถปรับกระแสให้ใช้ได้ 10 Ratio ตั้งแต่ 100-1200 A. กระแสทางด้านทุติยภูมิออก 5 A. โดยมี Cores ให้เลือกใช้งาน การใช้งานขดลวดปฐมภูมิ จะต่อเข้ากับสายส่ง โดยออกแบบให้กระแสไหลในด้านทุติยภูมิ ได้ไม่เกินขีดจำกัด เฉพาะ หม้อแปลงกระแส รุ่นที่กำหนดค่า  $F_s$  เช่น  $F_s = 5$   $F_s = 10$  นอกนั้นจะไหลได้เกิน 20 เท่าของ กระแสปฐมภูมิ ซึ่งสอดคล้องกับ Fault Current เพียงแต่ เมื่อเพิ่มมากกว่า 20 เท่า Accuracy จะเกินกำหนด ในขณะที่มีกระแสไหลด้านปฐมภูมิ เต็มที่ ผู้ปฏิบัติควรจะรู้ค่า CT Ratio ในขณะที่ใช้งานอยู่ เพื่อจะได้ทราบว่า หม้อแปลงกระแสจะมี Rated Current เกินเมื่อไร โดยดูจาก RF Factor เช่น 1, 1.3, 2 เป็นต้น จะได้เตรียมการแก้ไขได้ทันทั่วทั้ง

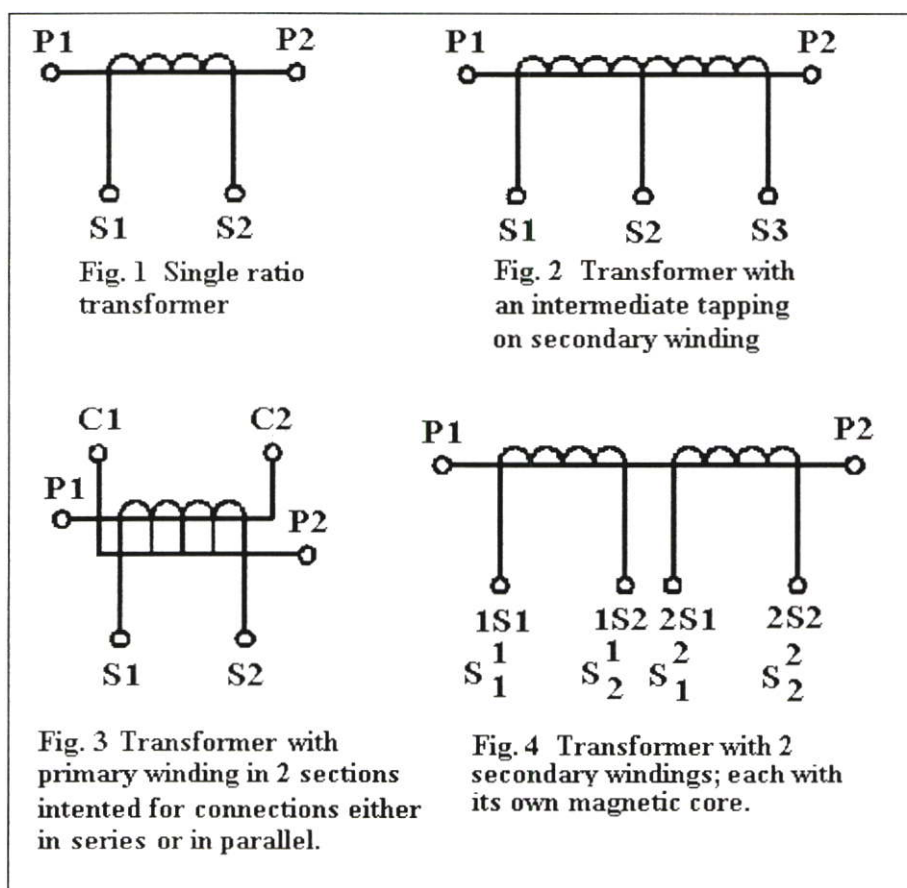


รูปที่ 2.8 ตัวอย่าง Magnetizing Curve ของหม้อแปลงกระแส ที่สามารถปรับกระแสได้ 10 Ratio

โดยปกติ เราจะแทน Core ของขดลวดทุติยภูมิ ด้วยตัวพยัญชนะภาษาอังกฤษ โดยเริ่มจาก Core ที่ 1 เป็น Core X, Core ที่ 2 เป็น Core Y, Core ที่ 3 เป็น Core Z, Core ที่ 4 เป็น Core U, Core ที่ 5 เป็น Core V, Core ที่ 6 เป็น Core W ในการต่อเข้าใช้งาน จะกำหนดโดยมาตรฐานการออกแบบด้าน Protection และ Metering เช่น Core X อาจจะใช้กับ Ammeter Core Y ใช้กับพวก Relay ต่าง ๆ เช่น Overcurrent Relay, Differential Relay หรือ Synchro-Check ซึ่งก็แล้วแต่ชนิดและยี่ห้อ ไม่ระบุเป็นที่แน่นอน

ความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแส ส่วนใหญ่เกิดขึ้นเพราะส่วนหนึ่งของกระแสทางด้านปฐมภูมิ ใช้ไปเป็น Exciting Current เพื่อทำให้เกิด Flux แม่เหล็กขึ้นในแกนเหล็ก เพื่อที่จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนนี้มีค่าต่ำลง แกนเหล็กที่ใช้ จึงต้องเป็นเหล็กที่มีความนำแม่เหล็ก (Permeability) สูง นอกจากนั้นส่วนมากจะต้องลดจำนวนรอบ (จำนวนรอบจะเป็น Ampere Turn, AT ที่ใช้ Exciting Core) ของขดลวดทุติยภูมิลงประมาณ 1% จากค่าที่คำนวณได้จากอัตราส่วนการแปลง การทำเช่นนี้เรียกว่าการถอยรอบ (Back Turn)

สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ ถ้าหากวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส เปิดอยู่ในขณะที่มีกระแสทางด้านปฐมภูมิไหลอยู่ จะไม่มีกระแสไหลทางด้านทุติยภูมิ กระแสทั้งหมดทางด้านปฐมภูมิ จะแปลงเป็น Exciting Current ซึ่งทำให้ Core เกิด Saturate และเกิด Loss สูงมาก แกนเหล็กจะร้อนเกินไป และจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็น Pulse ทางด้านทุติยภูมิ สูงผิดปกติ จนทำให้ฉนวน Breakdown ได้ ดังนั้นจึงห้ามเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิ ของหม้อแปลงกระแส ในขณะที่มีกระแสปฐมภูมิ ไหลอยู่ เช่น ในขณะที่เปลี่ยนเครื่องวัดในวงจรทุติยภูมิ เอาไว้ก่อนเสมอ



รูปที่ 2.9 สัญลักษณ์หม้อแปลงกระแสแบบต่าง ๆ

### บทที่ 3

## หลักการการทำงานของรีเลย์ผลต่าง (Differential Relay)

ในระบบส่งจ่ายกระแสไฟฟ้านั้น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังถือเป็นส่วนสำคัญและจำเป็นในระบบ โดยมีหน้าที่ในการเปลี่ยนระดับแรงดันให้ขึ้นไปตามความเหมาะสมต่อความต้องการ และวัตถุประสงค์นั้น ๆ ซึ่งโดยปกติราคาของหม้อแปลงกำลังจะมีราคาสูง โดยขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลงนั้น ๆ ในกรณีที่เกิดความเสียหายใด ๆ กับตัวหม้อแปลง ย่อมมีผลกระทบไม่เฉพาะแค่ค่าซ่อมหรือค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนหม้อแปลงตัวใหม่เท่านั้น แต่ยังมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในด้านอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญ และการดูแลรักษาที่ดีต่ออุปกรณ์ดังกล่าว

ในการออกแบบระบบป้องกันในระบบส่งจ่าย โดยปกติจะแบ่งขอบเขตการป้องกันในกรณีที่เกิดฟอลต์ขึ้นในส่วนต่าง ๆ อย่างเหมาะสม โดยในการป้องกันระบบไฟฟ้าจะแบ่งเขตป้องกันตามชนิดของอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน อันได้แก่ เขตป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เขตป้องกันหม้อแปลง เขตป้องกันบัส เขตป้องกันสายส่ง หรือสายจำหน่าย และเขตป้องกันโหลดหรือมอเตอร์ โดยในแต่ละส่วนจะมีรีเลย์ป้องกันที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ติดตั้งอยู่ เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการเกิดฟอลต์ภายในขอบเขตที่ถูกกำหนดให้รับผิดชอบ โดยในแต่ละขอบเขตจะถูกกำหนดให้ดูแลพื้นที่แบบซ้อนทับกันกับขอบเขตก่อนและหลังด้วย (Overlap) รีเลย์จะต้องทำการป้องกันอย่างถูกต้องหากเกิดฟอลต์ในขอบเขตที่ถูกกำหนด และจะต้องไม่ส่งปลดวงจรในกรณีที่เกิดฟอลต์ขึ้นนอกพื้นที่ที่กำหนด

หากกล่าวถึงรีเลย์ที่ใช้ในการป้องกันหม้อแปลง ระยะเวลาได้มีการเปลี่ยนรูปแบบการประมวลผล จากการประมวลผลสัญญาณแบบอนาล็อก (Analog) ไปเป็นการประมวลผลสัญญาณที่เป็นแบบดิจิทัล (Digital) จึงได้มีการคิดค้นรีเลย์ที่ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์มาเป็นหัวใจหลักในการประมวลผลสัญญาณหรือเรียกรีเลย์ชนิดนี้ว่า “ดิจิทัลรีเลย์” ซึ่งจะให้ผลดีในเรื่องของความถูกต้องแม่นยำในการตัดสินใจ และให้ผลดีในเรื่องของเวลา

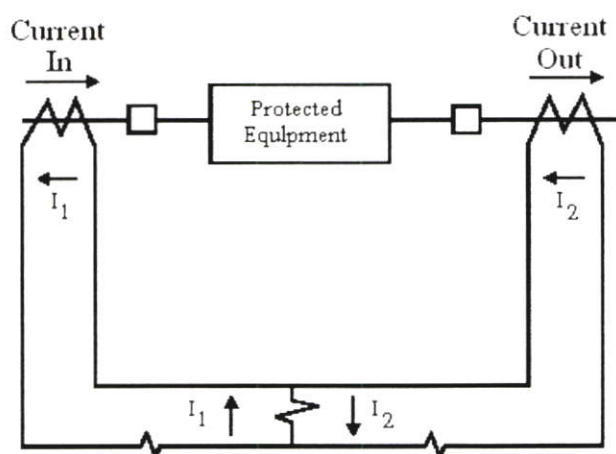
ดังนั้นในปัจจุบันได้มีความนิยมใช้ดิจิทัลรีเลย์มาใช้กับการป้องกันหม้อแปลง ซึ่งการป้องกันหม้อแปลงกำลังถือว่ามีค่าสำคัญและยุ่งยากมาก ทั้งนี้เนื่องจากหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยสนามแม่เหล็ก หรือว่าฟลักซ์ในการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในขดลวดอีกขดหนึ่ง ซึ่งจัดว่าเป็นอุปกรณ์ที่ให้ผลการตอบสนองทั้งที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอาจมีผลของการอิ่มตัวในแกนเหล็ก การตอบสนองของฟลักซ์แม่เหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันในทันทีทันใด จะมีผลทำให้เกิดกระแสทรานเซียนต์ไหลผ่านในตัวหม้อแปลง ซึ่งในระยะหลังดิจิทัลรีเลย์ที่นำมาใช้ป้องกันหม้อแปลงได้มีการออกแบบระบบป้องกันในหม้อแปลงจะใช้หลักการ Percentage Differential Current โดยการหาค่าหาค่าผลต่างของกระแสที่ไหลเข้า และออกจากหม้อแปลง และอีกหลักการ

หนึ่งที่ใช้ก็คือ หลักการ Harmonic Restraint สำหรับป้องกันการสั่นปลดวงจรในกรณีที่เกิดกระแสผลต่างอันเนื่องมาจากผลของกระแสอินรัช (Inrush Current) แต่อย่างไรก็ตามยังพบว่า ยังคงมีการทำงานที่ผิดพลาดหรือยังให้ผลการทำงานในเรื่องของเวลาไม่ดีพอ หรือในบางครั้งมีผลกระทบจากการผิดพลาดของกระแสไฟที่ส่งออกมาจากหม้อแปลงวัดกระแส ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก หรือค่าความผิดพลาดในตัวหม้อแปลงกระแส ซึ่งสาเหตุดังกล่าวยังผลให้รีเลย์ที่ใช้หลักการดังกล่าวมีข้อผิดพลาดในการตัดสินใจในการสั่นปลดวงจร เช่น ไม่สามารถสั่นปลดวงจรได้รวดเร็วหากเกิดฟอลต์ภายในพื้นที่ป้องกัน (Internal Fault) หรือสั่นปลดวงจรในสภาวะกระแสอินรัชในช่วงเริ่มจ่ายไฟให้กับหม้อแปลง หรือสั่นปลดวงจรในกรณีสภาวะที่เกิดฟอลต์ขึ้นภายนอก (External Fault) หรือทำงานได้ไม่รวดเร็วในกรณีที่ฟอลต์ที่เกิดขึ้นเป็นชนิดที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Fault)

รีเลย์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้ในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นรีเลย์ของ ABB, Siemens หรือ SEL จะใช้หลักการ Percentage Differential Current สำหรับตรวจสอบสภาวะฟอลต์ที่เกิดขึ้นว่าเป็นฟอลต์ที่เกิดขึ้นจริงภายใน หรือภายนอกบริเวณที่ป้องกัน และยังคงใช้หลักการ Harmonic Restraint เพื่อป้องกันการสั่นปลดวงจรเนื่องมาจากกระแสอินรัช ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานและข้อผิดพลาดของการใช้หลักการดังกล่าวมาป้องกันหม้อแปลง

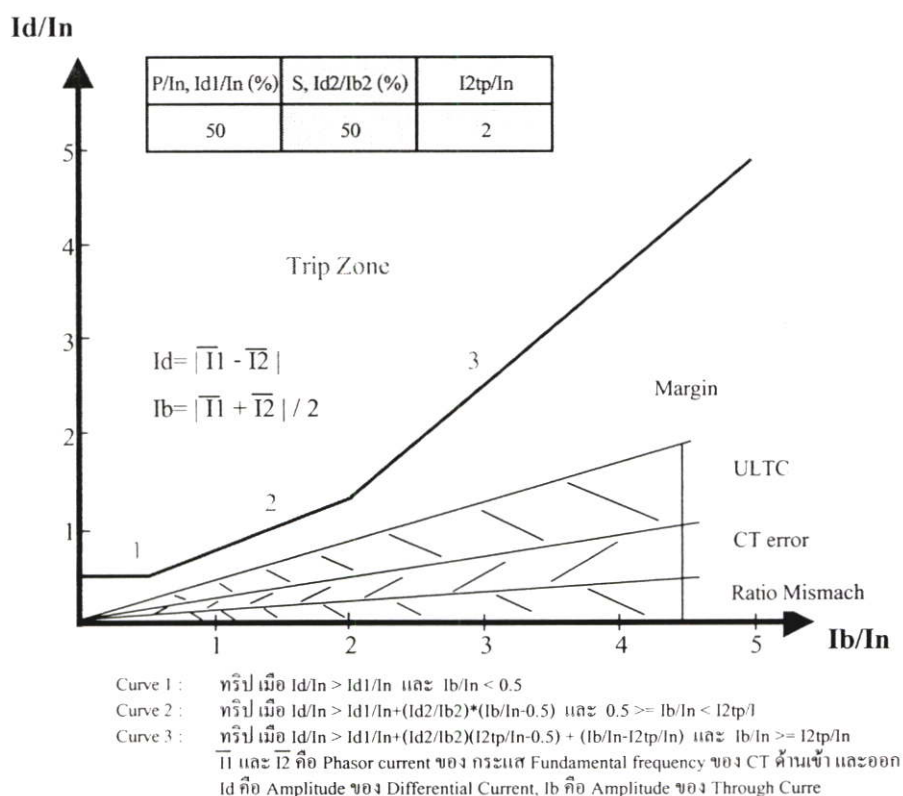
### 3.1 หลักการ Percentage Differential Current

จากรูปที่ 3.1 ในกรณีที่กระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลงมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลออกจาก หม้อแปลงนั้นหมายความว่า กระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสที่ต่อต้านปฐมภูมิ ( $I_1$ ) จะมีค่าเท่ากับกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสด้านทุติยภูมิ ( $I_2$ ) ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์ป้องกันจะมีค่าเป็นศูนย์ หากกำหนดให้ค่ากระแสผลต่างระหว่าง  $I_1$  และ  $I_2$  มีค่าเป็น  $I_d$  นั้นหมายความว่า  $I_d$  มีค่าเป็น 0 ซึ่งในทางทฤษฎีจะหมายความว่าไม่มีฟอลต์ภายในเกิดขึ้น



รูปที่ 3.1 วงจรของรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้หลักการของ Percentage Differential Current

แต่ในความเป็นจริงแล้ว แม้ว่าอยู่ในสภาวะที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ภายในขึ้น ค่ากระแส  $I_d$  อาจมีค่าไม่เท่ากับ 0 ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของค่าความผิดพลาดที่ไม่เท่ากันของหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน (Current Transformer Error) ค่าอัตราส่วนที่ต่างกันของหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน (Current Transformer Mismatch Ratio) และตำแหน่งของ On-Load Tap Changer ซึ่งจะมีผลให้มีกระแสจำนวนหนึ่งไหลผ่านรีเลย์ป้องกัน ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้กันอยู่จะมีการนำค่ากระแสไหลผ่าน (Through Current) หรือกระแสไบอัส (Bias Current) มาเป็นส่วนร่วมในการตัดสินใจในการสั่งปลดวงจร ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ในส่วนของแกนตั้งจะเป็นค่ากระแสผลต่างต่อกระแสพิคคของหม้อแปลงกระแสด้านทุติยภูมิ ( $I_d/I_n$ ) ส่วนในแกนนอนจะเป็นค่าของกระแสไบอัสต่อกระแสพิคคของหม้อแปลงกระแสด้านทุติยภูมิ ( $I_b/I_n$ ) หลักการตัดสินใจสั่งปลดวงจรดังกล่าวต้องอาศัยการตั้งค่าเซตติ้ง (Setting Values) อัตราส่วนระหว่างกระแสผลต่างต่อกระแสไบอัส รีเลย์จะทำงานก็ต่อเมื่อ ค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสผลต่างต่อกระแสไบอัสจริงในขณะนั้นมีค่ามากกว่าค่าที่ได้ตั้งไว้



รูปที่ 3.2 แสดงเส้นคุณลักษณะของรีเลย์ที่ใช้หลักการ Percentage Differential Current

ที่มา : ABB's Relay Manual รุ่น SPAD346C

จากรูปที่ 3.2 ในช่วง Curve ที่ 1 เป็นช่วงที่ตั้งค่าสำหรับการทำงานของหม้อแปลงในช่วงที่ไม่มีโหลด (No-Load) ในการตั้งค่ากระแสในช่วงดังกล่าวจะต้องตั้งค่ากระแสผลต่าง (Differential Current) ให้มีค่ามากกว่ากระแสกระตุ้นของหม้อแปลง (Excitation Current) หรือมีค่ามากกว่ากระแสขณะไม่มีโหลดของหม้อแปลง (No Load current) ดังนั้น รีเลย์จะสั่งปลดวงจรก็ต่อเมื่อ

$$Id/In > Id1/In \text{ และ } Ib/In < 0.5 \quad (3.1)$$

ส่วนในช่วง Curve ที่ 2 เป็นช่วงสถานะการทำงานของหม้อแปลงในการตั้งค่ารีเลย์ช่วงนี้จะต้องเพื่อค่าความผิดพลาดของหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน ค่าอัตราส่วนที่ต่างกันของหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน และตำแหน่งของ On-Load Tap Changer ที่ทำให้กระแสผลต่างมีค่ามากที่สุด ดังนั้น รีเลย์จะสั่งปลดวงจรก็ต่อเมื่อ

$$Id/In > Id1/In + (Id2/Ib2)*(Ib/In-0.5) \text{ และ } 0.5 \geq Ib/In < I2tp/In \quad (3.2)$$

ส่วนในช่วง Curve ที่ 3 เป็นช่วงสถานะของการเกิดฟอลต์ภายนอกพื้นที่ป้องกันซึ่งจะต้องคำนึงค่ากระแสผลต่างที่เกิดจากกระแสฟอลต์สูงสุด ดังนั้น ในช่วงนี้รีเลย์จะสั่งปลดวงจรก็ต่อเมื่อ

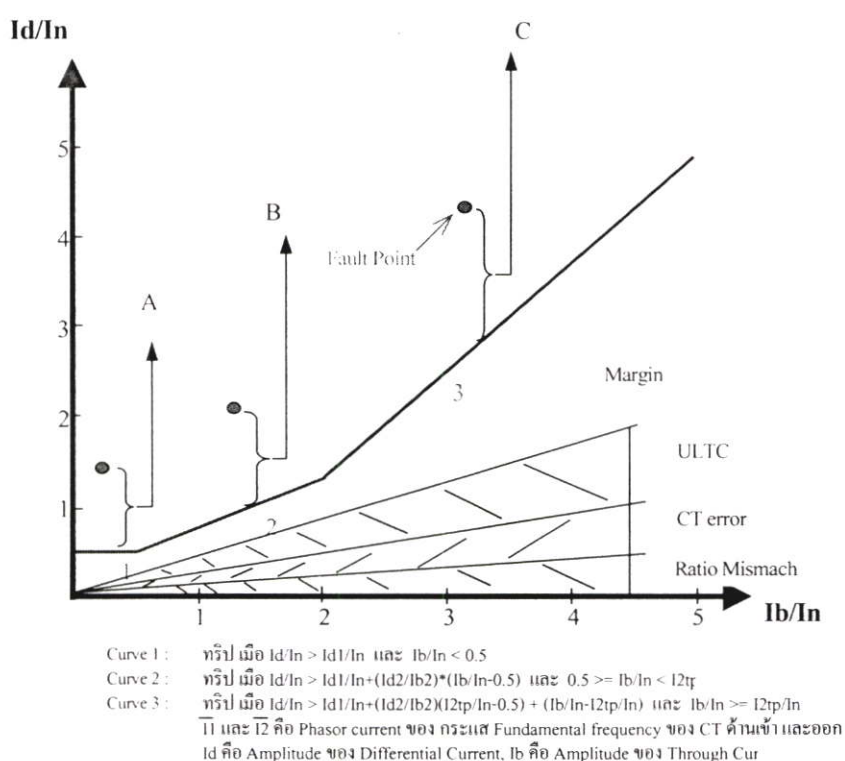
$$Id/In > Id1/In + (Id2/Ib2)(I2tp/In-0.5) + (Ib/In-I2tp/In) \text{ และ } Ib/In \geq I2tp/In \quad (3.3)$$

โดยที่  $I_1$  และ  $I_2$  คือ Phasor current ของ กระแส Fundamental frequency ของ CT ด้านเข้า และ ออก  $I_d$  คือ ขนาดของ Differential Current,  $I_b$  คือ ขนาดของ Through Current และ  $I_d/In$  หรือค่า P,  $I_d2/Ib2$  หรือค่า S และ  $I2tp / In$  เป็นค่าเซตคั้งที่ต้องตั้งไว้ในรีเลย์

### 3.1.1 ส่วนการวิเคราะห์อัตราผลต่างของกระแสกับผลรวมของกระแส (Percentage Differential Current)

หลักการวิเคราะห์อัตราผลต่างของกระแสกับผลรวมของกระแส หรือหลักการ Percentage Differential Current จะยังคงถูกใช้งานอยู่เพื่อเป็นข้อมูลเสริมการตัดสินใจของส่วนประมวลผลสุดท้าย ในการตัดสินใจสั่งปลดวงจรร่วมกับข้อมูลที่ได้จากส่วนประมวลผลสัญญาณเบื้องต้นอื่นๆ ซึ่งจะต้องกำหนดค่าเซตคั้งที่ต้องการให้รีเลย์ในการสั่งปลดวงจร รีเลย์จะทำงานเมื่อไหร่ก็ตามที่อัตราผลต่างของกระแสกับผลรวมของกระแสมากกว่าค่าที่ได้ตั้งไว้ โดยทั่วไปจะกำหนดช่วงการทำงานเป็น 3 ช่วง ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ซึ่งในช่วงแรกจะกำหนดเป็นเส้นตรงที่ไม่มีควมชัน โดยขึ้นกับค่ากระแสผลต่าง ( $I_d$ ) อย่างเดียว ซึ่งในช่วงนี้ต้องตั้งค่าเซตคั้งเพื่อไว้สำหรับค่ากระแสของ

หม้อแปลงแบบไม่มีภาระ (No load Current or Excitation Current) ในช่วงสองและ สามจะกำหนดเป็นเส้นตรงที่มีความชัน โดยจะขึ้นกับค่ากระแสผลต่าง ( $I_d$ ) และกระแสผลรวม หรือ กระแสไปอัสด้วย ( $I_b$ ) ซึ่งต้องตั้งค่าเซตตั้งเผื่อไว้สำหรับสิ่งที่จะทำให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาด อันได้แก่อย่างแรกคือ ค่าความผิดพลาดของหม้อแปลงกระแส (CT Error) อย่างที่สองคือ ค่าอัตราส่วนการแปลงที่ไม่เท่ากันระหว่างหม้อแปลงกระแสที่ต่ออยู่ทั้งด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ (CT Ratio Mismatch) อย่างที่สามคือ ผลของการเปลี่ยนของกระแสด้านปฐมภูมิที่สูงขึ้นหรือต่ำลงอันเนื่องมาจากผลจากการเปลี่ยนแทปของ On-Load Tap Change (OLTC)



รูปที่ 3.3 เส้นคุณลักษณะของหลักการ Percentage Differential Current

ในงานวิจัยนี้อินพุตที่นำไปป้อนให้กับส่วนประมวลผลขั้นสุดท้ายก็คือ เป็นอัตราส่วนจำนวนเท่าของค่ากระแส ณ ขณะนั้นเทียบกับค่าที่ตั้งค่าไว้ โดยที่กำหนดให้เป็นเงื่อนไขที่ C2 (Criteria 2) ซึ่งเรากำหนดค่าเซตตั้งของ  $I_d/I_n$  หรือค่า  $P/I_n$  ไว้ที่ 10%, ส่วนค่า  $I_{d2}/I_{b2}$  หรือค่า  $S$  ไว้ที่ 0.5% และค่า  $I_{2tp}$  ได้ตั้งไว้ที่ 2 ซึ่งค่ากระแส  $I_d$  ที่วัดได้จะถูกชดเชยจากส่วนชดเชยการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นอันเนื่องมาจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก Ifraction ในกรณีที่เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กหม้อแปลงกระแส

C2: คืออัตราส่วนของขนาดของผลต่างกระแส ( $I_d$ ) ซึ่งได้รับการชดเชยกระแสจากส่วนชดเชยกระแสผิดเฟสขึ้นเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ( $I_{fraction}$ ) ต่อ ค่าเซตตั้งที่ได้ตั้งไว้ ได้แก่  $I_{d1}/I_n$ ,  $I_{d2}/I_{b2}$  และ  $I_{2tp}$  ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงดังต่อไปนี้

- ในกรณีที่  $I_d/I_n > I_{d1}/I_n$  และ  $I_b/I_n < 0.5$  ซึ่งก็คือระยะ A ในรูปที่ 3.3

$$C2(n) = \frac{(I_d + I_{fraction})I_n}{I_{d1}/I_n} \quad (3.4)$$

- ในกรณีที่  $I_d/I_n > I_{d1}/I_n + (I_{d2}/I_{b2}) \cdot (I_b/I_n - 0.5)$  และ  $0.5 \geq I_b/I_n < I_{2tp}/I_n$  ซึ่งก็คือระยะ B ในรูปที่ 3.3

$$C2(n) = \frac{(I_d + I_{fraction})/I_n}{(I_{d1}/I_n + ((I_{d2}/I_{b2}) \cdot (I_b/I_n - 0.5)))} \quad (3.5)$$

- ในกรณีที่  $I_d/I_n > I_{d1}/I_n + (I_{d2}/I_{b2})(I_{2tp}/I_n - 0.5) + (I_b/I_n - I_{2tp}/I_n)$  และ  $I_b/I_n \geq I_{2tp}/I_n$  ซึ่งก็คือระยะ C ในรูปที่ 3.3

$$C2(n) = \frac{(I_d + I_{fraction})/I_n}{(I_{d1}/I_n + ((I_{d2}/I_{b2}) \cdot (I_b/I_n - 0.5)) + (I_b/I_n - I_{2tp}/I_n))} \quad (3.6)$$

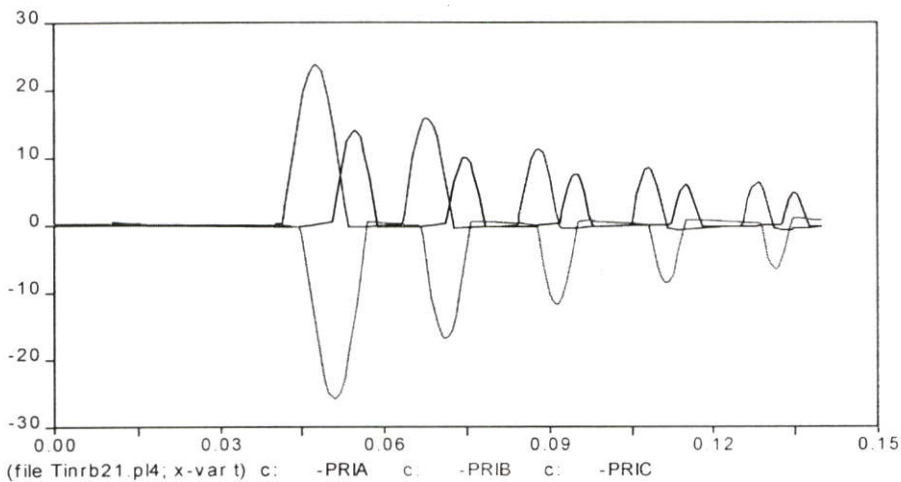
โดยที่  $I_d$  คือ ขนาดของกระแสผลต่าง (Differential Current)  $I_{fraction}$  คือกระแสชดเชยในกรณีของการผิดเฟสขึ้นอันเนื่องมาจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส  $I_b$  คือขนาดของกระแสผลรวม (Through Current) หรือกระแสไปอัส  $I_n$  คือค่าพิคคของกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส ส่วน  $I_{d1}/I_n$ ,  $I_{d2}/I_{b2}$  และ  $I_{2tp}$  เป็นค่าเซตตั้งที่ต้องกำหนดไว้

### 3.2 หลักการ Harmonic Restraint

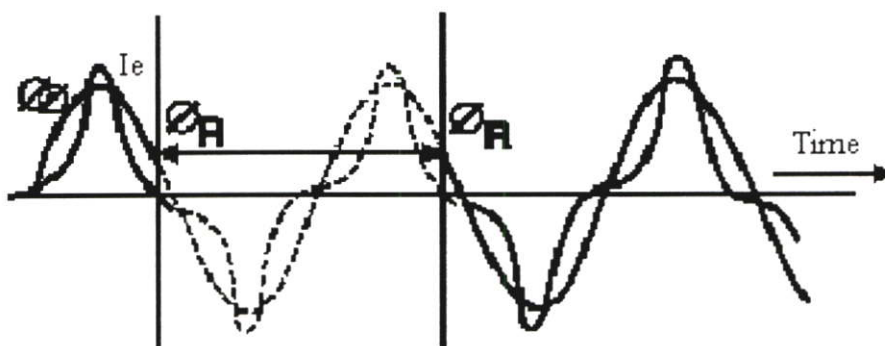
ในระยะหลังรีเลย์ที่ผลิตออกมาจะมีการใช้หลักการหน่วงการสั่งปลดวงจร โดยใช้การวิเคราะห์อัตราส่วนของส่วนประกอบฮาร์โมนิกที่ 2 กับฮาร์โมนิกที่ 1 ( $I_{d2}/I_{d1}$ ) ของกระแสผลต่างระหว่างด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งหลักการดังกล่าวเรียกว่าหลักการ Harmonic Restraint ซึ่งจุดประสงค์ก็เพื่อป้องกันการสั่งปลดวงจรอันเนื่องมาจากกระแสอินรัช (Inrush Current) ซึ่งเป็นกระแส ทรานเซียน (Transient Current) ที่เกิดเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของแรงดันไฟฟ้า (Sudden Voltage Change)

ในรูปที่ 3.4 ได้แสดงถึงกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะเริ่มจ่ายไฟให้กับหม้อแปลง Energizing) (Inrush Current ซึ่งกระแสดังกล่าวอาจจะมีค่าสูงถึง 6-30 เท่าของกระแสโหลด (Full Load Current)

และอาจจะมีระยะเวลาเป็นเศษส่วนของวินาทีจนถึงระดับนาที่ ส่วนในรูปที่ 3.5 ได้แสดงกระแสอินรัชในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก (Residual Flux) จะเห็นได้ว่าการต่อวงจรใหม่ ค่ามูมของสนามแม่เหล็กขณะนั้นได้ต่อเนื่องกับสนามแม่เหล็กตกค้าง จึงไม่มีกระแสทรานเซียนไทล และจะมีแค่กระแสกระตุ้นของหม้อแปลง (Excitation Current) ปกติที่ไหล ในทางกลับกันหากในการต่อวงจรค่าของสนามแม่เหล็กขณะนั้นไม่ต่อเนื่องกับสนามแม่เหล็กตกค้าง ยกตัวอย่างเช่นในรูป 3.6 เป็นกรณีที่ต่อวงจรขณะที่ค่าสนามแม่เหล็กอยู่ในช่วงลบสูงสุด ซึ่งเมื่อรวมกับสนามแม่เหล็กตกค้างที่เป็นค่าบวก ซึ่งจะเป็นสถานะที่ทำให้เกิดกระแสทรานเซียนต์ไทลในหม้อแปลง



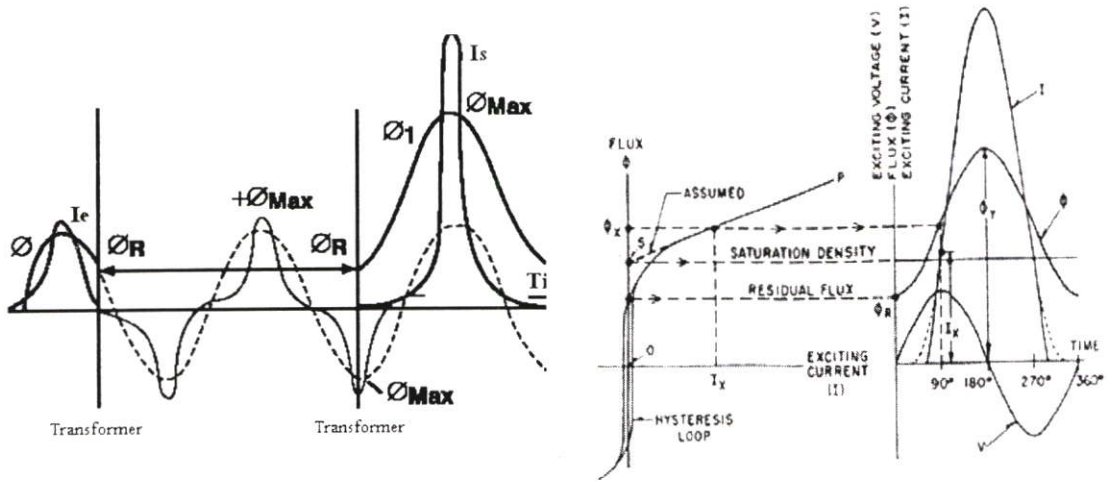
รูปที่ 3.4 กระแสอินรัชขณะเริ่มจ่ายไฟให้กับหม้อแปลง โดยมีมูมของแรงดันเฟส A, B และ C ที่ 90, 330, 210 ตามลำดับ



Transformer  
Deenergized  
at This Point

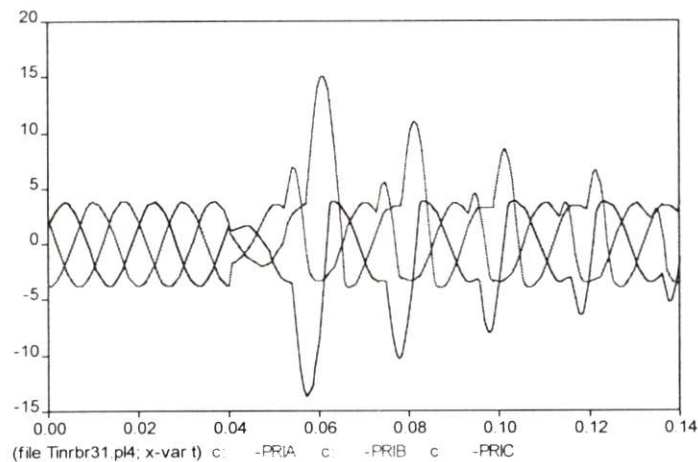
Transformer  
Reenergized  
at This Point

รูปที่ 3.5 ผลของสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กที่มีต่อขนาดของกระแสทรานเซียนต์ขณะที่มีมูมของสนามแม่เหล็กขณะต่อวงจรสอดคล้องกับสนามแม่เหล็กที่ตกค้าง



รูปที่ 3.6 ผลของสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กที่มีต่อขนาดของกระแสทรานเซียนขณะที่มีมุมของสนามแม่เหล็กขณะต่อวงจรไม่สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กที่ตกค้าง

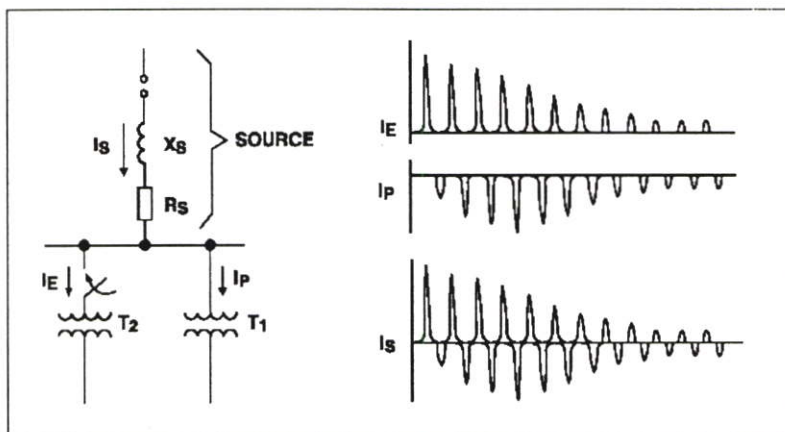
กระแสอินรัชสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะหลังจากเกิดฟลัดภายนอกของอีก Feeder หนึ่งที่อยู่บนบัสเดียวกัน กระแสอินรัชชนิดนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนของแรงดันอย่างทันทีทันใดในช่วงขณะที่ฟลัดภายนอกแล้วกลับเข้าสู่สภาวะแรงดันปกติ จึงทำให้เกิดสภาวะทรานเซียนของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงเกิดกระแสทรานเซียนด้ขึ้นซึ่งสามารถเรียกกระแสอินรัชชนิดนี้ว่า Recovery Inrush Current ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ แต่ว่าการกระแสอินรัชชนิดนี้จะมีค่าไม่สูงเท่ากับกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มจ่ายไฟ



รูปที่ 3.7 กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดการฟลัดภายนอก

อีกสภาวะหนึ่งทำให้เกิดกระแสอินรัชขึ้นได้ก็คือ ในกรณีที่มีหม้อแปลงต่อขนานกันโดยที่หม้อแปลงตัวแรกได้จ่ายไฟแล้ว และตัวที่ 2 อยู่ในช่วงเริ่มจ่ายไฟ กระแสอินรัชประเภทนี้เรียกว่า

Sympathetic Inrush Current ซึ่งในสภาวะที่หม้อแปลงตัวที่ 2 เริ่มจ่ายไฟนั้น จะมีกระแสอินรัชไหลเข้าสู่หม้อแปลงดังกล่าว ดังนั้นจะมีส่วนประกอบของกระแสตรงไหลผ่านในค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ในสายส่ง จึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมในสายส่งทำให้เกิดกระแสไหลผ่านสายส่งดังกล่าวเข้าสู่หม้อแปลงที่จ่ายไฟในสภาวะปกติ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.8 กระแสอินรัชชนิดนี้จะมีค่าไม่สูงเท่ากับ กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มจ่ายไฟ



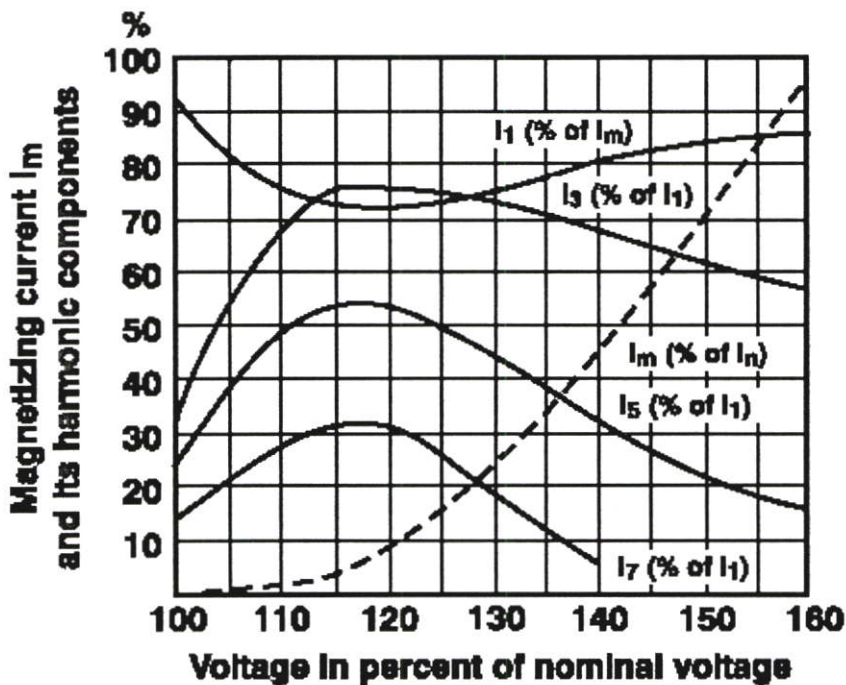
รูปที่ 3.8 กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลงที่เกาะบนบัสเดียวกัน เริ่มจ่ายไฟ (Sympathetic Inrush Current)

ซึ่งขนาดของกระแส (Magnitude) และช่วงระยะเวลาลดลง (Decaying Time) ของกระแสดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับ ขนาด ชนิดของแกนเหล็ก และการออกแบบของหม้อแปลง (Transformer Size, type of core and Design) ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Source Impedance) ค่าสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของรูปคลื่นขณะปลดดวงจร (Interrupting angle) ค่ามุมของรูปคลื่นไซนัสขณะต่อวงจร (Energizing Angle) ชนิดการต่อขอลวดของหม้อแปลง ขนาดและที่ตั้งของระบบไฟฟ้า

จะสังเกตได้ว่ากระแสอินรัชจะเป็นกระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลงอย่างเดียว ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสผลต่างมีค่าๆหนึ่ง ซึ่งอาจทำให้รีเลย์ที่ใช้หลักการ Percentage Differential Current เพียงอย่างเดียวสั่งปลดดวงจรได้ หากเราวิเคราะห์ส่วนประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินรัช จะพบว่ามีส่วนประกอบฮาร์โมนิกอันดับที่ 2 สูง ซึ่งมีค่ามากกว่า 15% ของส่วนประกอบฮาร์โมนิกอันดับที่ 1 ดังนั้นรีเลย์ที่ใช้กันอยู่จะมีการตรวจสอบค่าอัตราส่วนของฮาร์โมนิกที่ 2 ต่อฮาร์โมนิกที่ 1 ของผลต่างกระแสทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในกรณีที่ป้องกันการสั่งปลดดวงจรในกรณีที่กระแสที่ไหลผ่านเป็นกระแสอินรัช

ในรีเลย์บางรุ่น ได้มีการตรวจสอบอัตราส่วนของส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกที่เป็นอันดับที่ 5 ต่อของส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกที่เป็นอันดับที่ 1 สำหรับป้องกันความร้อนที่จะเกิดขึ้นใน

หม้อแปลงในสถานะที่มีการกระตุ้นเกิน (Over-excitation) เป็นผลเนื่องมาจากแรงดันเกิน (Overvoltage) หรือ ค่าความถี่ตก (Under Frequency) ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าสนามแม่เหล็ก (Flux) จะแปรผันตรงกับค่าแรงดัน (Voltage) และแปรผกผันกับค่าความถี่ (Frequency) จากรูปจะเห็นได้ว่าในขณะที่เกิดสถานะแรงดันเกิน ค่าส่วนประกอบกระแสพื้นฐาน (Fundamental Harmonic) จะตกลง ส่วนค่าส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิกที่เป็นอันดับคี่ เช่น 3 และ 5 จะมีค่าสูงขึ้น แต่ในหม้อแปลงที่มีขดลวดปฐมภูมิที่การต่อแบบ Delta ค่าส่วนประกอบฮาร์มอนิกที่เป็น Triple Frequency (อันดับ 3, 9 และอื่นๆ) จะมีค่าอินเฟสกับค่าส่วนประกอบกระแสพื้นฐาน (Fundamental Harmonic) ดังนั้นจะทำให้ส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิกที่เป็นอันดับ 3 ไม่มีผลในขณะเกิดสถานะแรงดันเกิน



รูปที่ 3.9 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน หรือความถี่ที่มีต่อส่วนประกอบฮาร์มอนิก

### 3.3 ข้อผิดพลาดของการใช้หลักการ Percentage Differential Current ในการสั่งปลด

วงจร

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.1 ถึงวิธีการใช้หลักการ Percentage Differential Current ในการตรวจสอบป้องกันการฟลัดภายในหม้อแปลง อย่างไรก็ตามวิธีที่ใช้หลักการดังกล่าวยังมีข้อผิดพลาดในการสั่งปลดวงจรหากรูปคลื่นที่วัดเข้ามาเกิดการผิดเพี้ยน เช่น ในกรณีที่เกิดฟลัดภายนอกพื้นที่ป้องกัน โดยรูปคลื่นด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่ทำการป้องกันเกิดการผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กไม่ว่าจะเป็นการอิ่มตัวจากผลของกระแสสลับ (AC Saturation) หรือ

อิมิตัวจากผลของกระแสตรง (DC Saturation) จนทำให้เกิดค่าอัตราส่วนของกระแสผลต่างต่อกระแสไบอัสเกินกว่าค่าเซตคั้งที่ตั้งไว้จนทำให้รีเลย์สั่งปลดวงจร

อีกกรณีที่สามารถทำให้เกิดการผิดพลาดในการสั่งปลดวงจรก็คือ กรณีเกิดฟอลต์ภายในพื้นที่ป้องกัน ชนิดที่ค่าอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance malInte Fault) หรือการฟอลต์ลงดินของขดลวดภายในหม้อแปลง (Winding to Earth Fault) บริเวณช่วงปลายๆ ของขดลวด หรือการเกิดฟอลต์ระหว่างขดลวด (Turn to Turn Fault) ภายในหม้อแปลง ซึ่งจะมีผลต่างกระแสไม่มากนัก จนมีผลทำให้ไม่สามารถตรวจพบได้ทั้งนี้เนื่องจาก ในการตั้งเซตคั้งของค่าอัตราส่วนของกระแสผลต่างต่อกระแสไบอัส จำเป็นต้องเผื่อค่าของอัตราส่วนการแปลงที่ไม่เท่ากันระหว่างหม้อแปลงกระแสที่ต่ออยู่ทั้งด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ หรือค่า CT Ratio Mismatch และต้องเผื่อค่าความผิดพลาดของหม้อแปลงกระแส หรือค่า CT error รวมทั้งการเปลี่ยนของกระแสด้านปฐมภูมิที่อาจจะสูงขึ้นหรือต่ำลงอันเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลง

ยิ่งไปกว่านั้นหากเกิดกระแสอินรัชไม่ว่าชนิดใดชนิดหนึ่ง รีเลย์ที่ใช้หลักการดังกล่าวมีโอกาสที่จะสั่งปลดวงจร หากขนาดของกระแสผลต่างมีค่าถึงค่าที่ได้ตั้งไว้

### 3.4 ข้อผิดพลาดของการใช้หลักการ Harmonic Restraint ในการสั่งยับยั้งการปลดวงจร

ในหัวข้อที่ 3.2 เราได้กล่าวถึงวิธีการใช้หลักการ Harmonic Restraint ในการตรวจสอบ ป้องกันการสั่งปลดวงจรในกรณีที่กระแสที่ไหลผ่านในหม้อแปลงเป็นกระแสอินรัช ซึ่งจะมีส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับ 2 อยู่สูง อย่างไรก็ตามการใช้หลักการดังกล่าวยังคงมีข้อผิดพลาดในการทำงานอยู่ เช่น อาจจะทำางานไม่ถูกต้องบางสภาวะ เช่น ในกรณีการเกิดฟอลต์ภายในบริเวณที่ ป้องกันที่มีส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับ 2 สูงจึงทำให้รีเลย์ที่ใช้หลักการดังกล่าว จะล่อการสั่งปลดวงจรซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในบางกรณี เช่น ในช่วงรูปคลื่นแรกค่าอัตราส่วนของส่วนประกอบ ฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 ต่อฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ของกระแสผลต่าง ( $I_{d2}/I_{d1}$ ) จะมีค่าค่อนข้างสูงอันเนื่องมาจากรีเลย์โดยทั่วไปจะใช้วงจรแยกส่วนประกอบฮาร์มอนิกชนิดเต็มรูปคลื่น ยกตัวอย่างเช่น วงจรแยกส่วนประกอบฮาร์มอนิกโดยใช้หลักการของฟูเรียร์ชนิดเต็มรูปคลื่น (Full Wave Discrete Fourier Transform) หรือในบางครั้ง การเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง ขณะเริ่มจ่ายไฟซึ่งจะมีผลของกระแสอินรัชมาเกี่ยวข้องทำให้ค่าอัตราส่วนของฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 ต่อฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ของกระแสผลต่าง จะมีค่าค่อนข้างสูง อีกกรณีหนึ่งในบางครั้งการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง ซึ่งอาจมีผลของส่วนประกอบกระแสตรงมาเกี่ยวข้อง (DC Offset) จนทำให้ค่าอัตราส่วนของฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 ต่อฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ของกระแสผลต่างจะมีค่าค่อนข้างสูง หรือในบางระบบส่งจ่ายไฟฟ้าอาจมีค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) อยู่มากจนเพียงพอที่จะทำให้การเกิดฟอลต์ในบางครั้งจะมีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 อยู่มาก

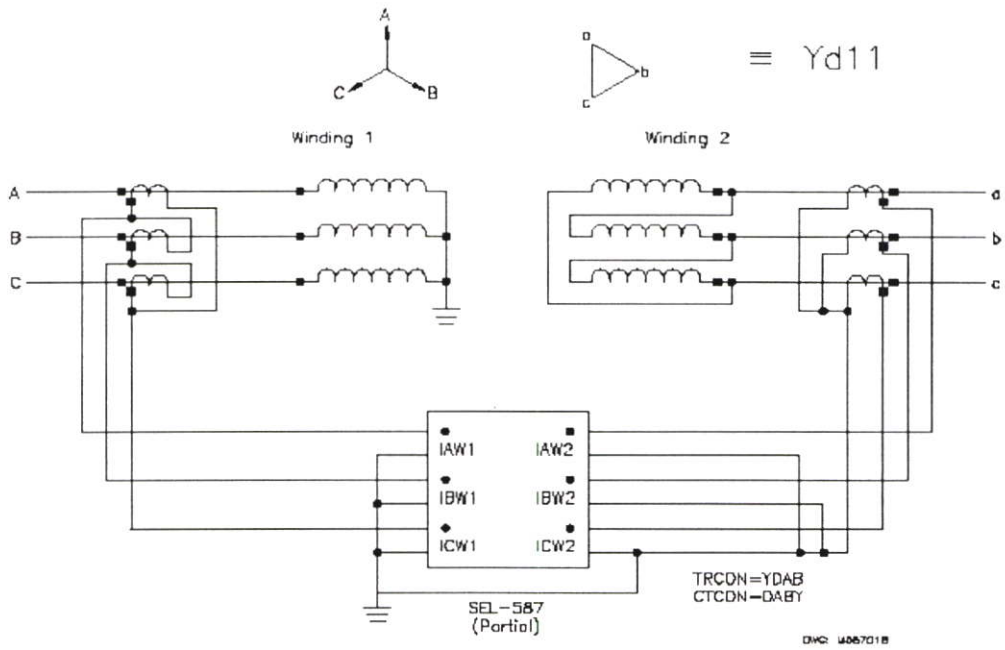
นอกจากนั้นผลของแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแสอิมตัว ก็มีผลทำให้ รีเลย์ที่ใช้หลักการ ดังกล่าวทำงานผิดพลาดได้ เช่น ในบางครั้งในกรณีที่เกิดฟอลต์ภายในพื้นที่ป้องกัน โดยรูปคลื่นด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่จะป้องกันเกิดการผิดพลาด อันเนื่องมาจากการอิมตัวของแกนเหล็ก ไม่ว่าจะ เป็นชนิดอิมตัวเนื่องจากผลของกระแสลับ หรือกระแสตรง จนทำให้ค่าอัตราส่วนของฮาร์โมนิกอันดับที่ 2 ต่อฮาร์โมนิกอันดับที่ 1 ของกระแสผลต่าง จะมีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นรีเลย์ที่ใช้หลักการดังกล่าวไม่สั่งปลดวงจร หรือปลดวงจรซ้ำ

ในหม้อแปลงชนิดที่ต่อแบบ Delta โดยปกติกระแสอินรัลซ์ที่เกิดขึ้น จะมีค่าอัตราส่วนของฮาร์โมนิกอันดับที่ 2 ต่อฮาร์โมนิกอันดับที่ 1 ของกระแสผลต่าง ต่ำกว่า 20% ซึ่งในบางครั้งอาจจะทำให้ รีเลย์ที่ใช้หลักการ Harmonic Restraint ซึ่งได้ถูกตั้งค่าเซตตั้งไว้ที่ 20% จะสั่งปลดวงจรหากค่าอัตราส่วนดังกล่าวต่ำกว่าค่าที่ได้ตั้งไว้

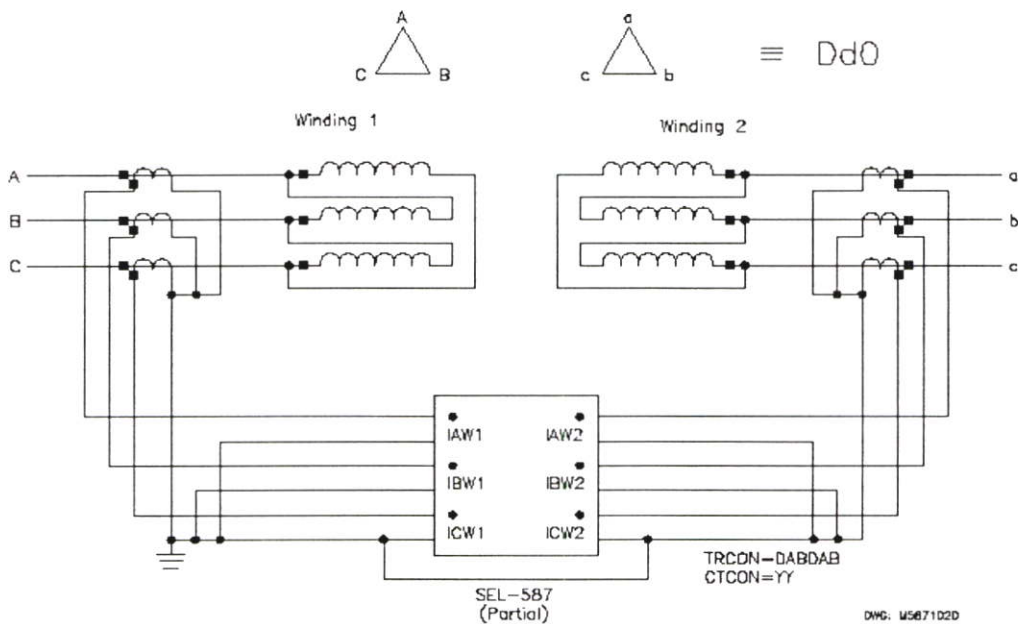
นอกจากนั้นหลักการดังกล่าวจะต้องอาศัยการตั้งค่าเซตตั้งที่เหมาะสม ซึ่งหากการตั้งค่าไม่เหมาะสม จะมีผลทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดในการสั่งปลดวงจร (False Operation)

### 3.5 ลักษณะการต่อใช้งาน

ในการนำรีเลย์ผลต่างมาใช้ในการป้องกันหม้อแปลงกำลังต้องมีเงื่อนไขในการต่อใช้งาน คือ หม้อแปลงที่มีการต่อของขดลวดปฐมภูมิ กับขดลวดทุติยภูมิ แตกต่างกันเช่น Star-Delta หรือ Delta-Star จะมีเฟสของกระแสต่างกันเป็นมุม 30 องศา การป้องกันระบบบกรแสไหลวนจะทำงานได้ถูกต้องก็ต่อเมื่อมีการชดเชยการเลื่อนเฟสนี้ กฎทั่วไปที่ยึดถือคือ สำหรับด้านของหม้อแปลงที่มีขดลวดต่อแบบ Star CT ควรจะต่อแบบ Delta และด้านที่ขดลวดต่อแบบ Delta CT จะต้องต่อแบบ Star การต่อ หม้อแปลงกระแส ตามกฎนี้ยังเป็นการชดเชยเพื่อป้องกันไม่ให้รีเลย์ทำงานเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินนอก Zone เขตป้องกันด้วยเพราะขดลวด Delta ของหม้อแปลงเป็นแหล่งกำเนิดกระแส Zero-Sequence จะมาจากที่จุดต่อลง สามารถแสดงรูปการต่อหม้อแปลงกระแสได้ดังรูปที่ 3.10 และ 3.11



รูปที่ 3.10 หม้อแปลงกำลัง Star-Delta ที่มีการต่อหม้อแปลงกระแสแบบ Delta-Star



รูปที่ 3.11 หม้อแปลงกำลัง Delta-Delta ที่มีการต่อหม้อแปลงกระแสแบบ Star-Star

## บทที่ 4

### แบบจำลองหม้อแปลงกระแส และระบบ

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ATP-EMTP ( Alternative Transient Program - Electromagnetic Program) สำหรับการสร้างแบบจำลองหม้อแปลงกระแสและระบบในสภาวะทรานเซียนต์ความสามารถของโปรแกรมหดงกล่าว คือ สามารถหาผลตอบสนองของระบบในสภาวะทรานเซียนต์ได้ซึ่งในปัจจุบันได้เป็นที่ยอมรับและใช้กันในงานวิจัยอย่างแพร่หลาย โปรแกรม ATP-EMTP จะมีโปรแกรมย่อย (Sub - routine Program) สำหรับช่วยเหลือในการจำลองอุปกรณ์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้า เช่น สำหรับจำลองหม้อแปลงได้แก่ โปรแกรม BCTRAN, Saturable Transformer, SATURA, HYSDAT, Ideal Tranformer เป็นต้น

ในการจำลองหม้อแปลงในช่วงเริ่มแรกนั้นได้มีการนำเสนอวงจรสตาร์ (Star Circuit) ซึ่งแสดงถึงจำนวนหม้อแปลง N ขด ซึ่งต่อมาได้ถูกเรียกว่า “Saturable Transformer Component” ซึ่งเป็นการหาค่าเมตริกซ์  $[R]$  และ  $[L]^{-1}$  สำหรับช่วงทรานเซียนต์ (Transient State)

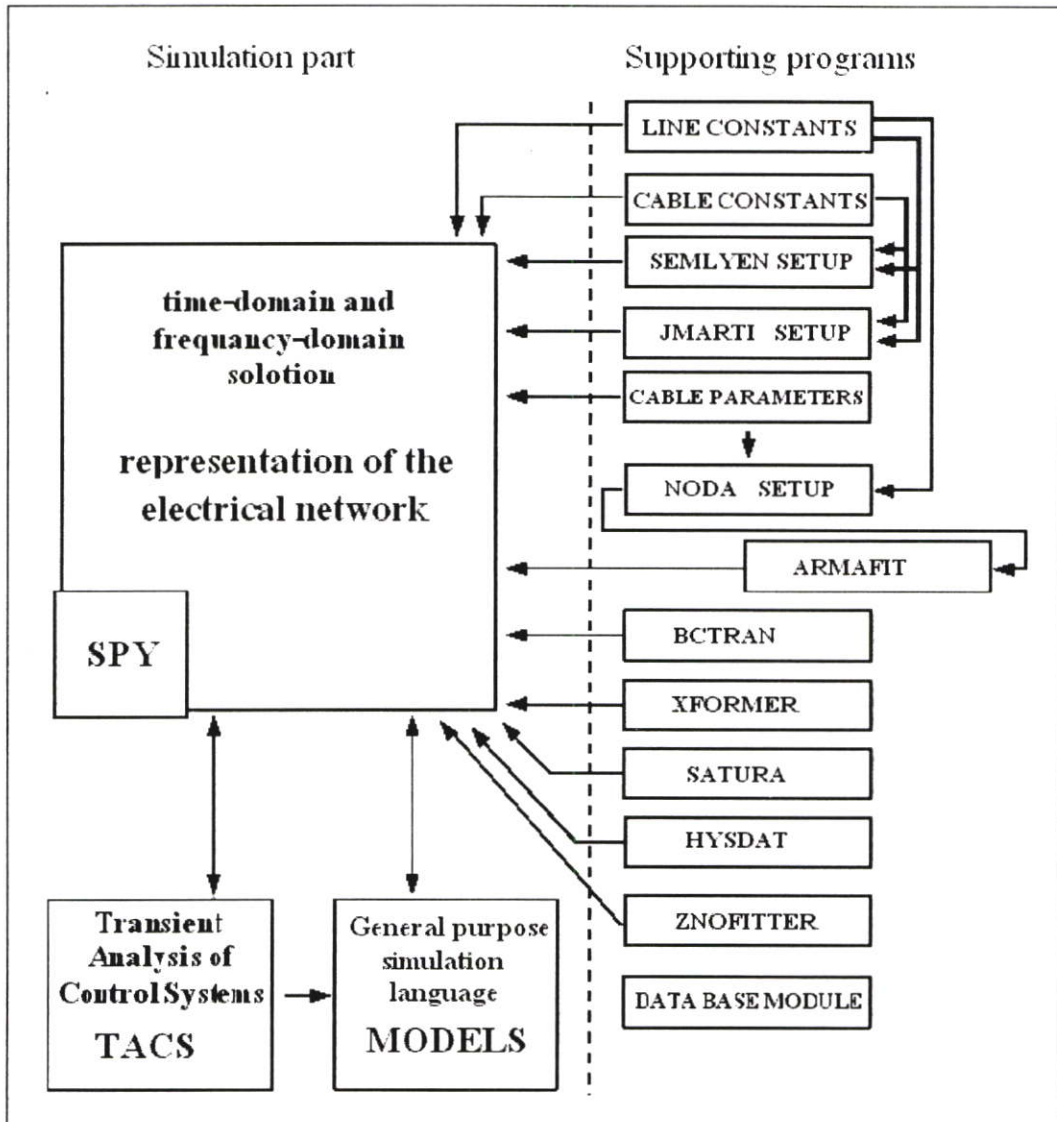
$$[L]^{-1} [V] = [L]^{-1} [R] [I] + [di/dt] \quad (4.1)$$

หากต้องการคำนึงถึงผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ก็สามารถทำได้โดยการต่อตัวเหนี่ยวนำชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Reactance) และหากต้องการให้คำนึงถึงผลของฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis) ก็สามารถทำได้โดยการต่อตัวเหนี่ยวนำที่มีผลของฮิสเตอร์รีซิสที่เรียกว่า “Pseudo - Nonlinear Hysteritic inductor”[4-5]

ในการวิเคราะห์ทรานเซียนต์จะต้องคำนึงถึงการสร้างแบบจำลองต่าง ๆ ที่นอกเหนือไปจากแบบจำลองในระบบไฟฟ้าแรงสูงด้วย เช่น แบบจำลองสำหรับองค์ประกอบในระบบเครื่องกล เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ ระบบของไหล และระบบควบคุม แบบจำลองที่มีจำนวนมากมายนี้จึงทำให้ EMTP เป็นโปรแกรมขนาดใหญ่ที่สามารถทำการวิเคราะห์ทั้งแบบการคำนวณหนึ่งครั้งและแบบคำนวณหลาย ๆ ครั้งอย่างต่อเนื่อง เช่น การวิเคราะห์แบบการจำลอง (simulation) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถแสดงด้วยตารางตัวเลข และการวาดกราฟ การใช้งานสามารถจำแนกออกได้เป็นหัวข้อใหญ่ ๆ ดังนี้

- การวิเคราะห์ทรานเซียนต์สำหรับเวลาช่วงสั้น ๆ ไม่เกินครึ่งวินาทีและที่ยาวเกินกว่าตัวอย่างของการวิเคราะห์ในช่วงเวลาสั้น ๆ ที่สำคัญคือการการวิเคราะห์แรงดันเกินฟ้าผ่า (lightning overvoltage) แรงดันเกินสวิตชิ่ง เป็นต้น ส่วนการวิเคราะห์ในช่วงเวลาที่ยาวกว่าแบบแรกที่สำคัญ

คือ การวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วคราว (temporary overvoltage) ซึ่งมีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่กำลัง (power frequency) หรือเป็นฮาร์โมนิกของความถี่กำลัง กรณีที่ศึกษาได้แก่ การละโหลด (load rejection) ผลของสภาวะอ้อมตัวของแกนเหล็กในหม้อแปลง รวมทั้งการวิเคราะห์เกี่ยวกับเสถียรภาพของเครื่องกลไฟฟ้าด้านต่าง ๆ เป็นต้น



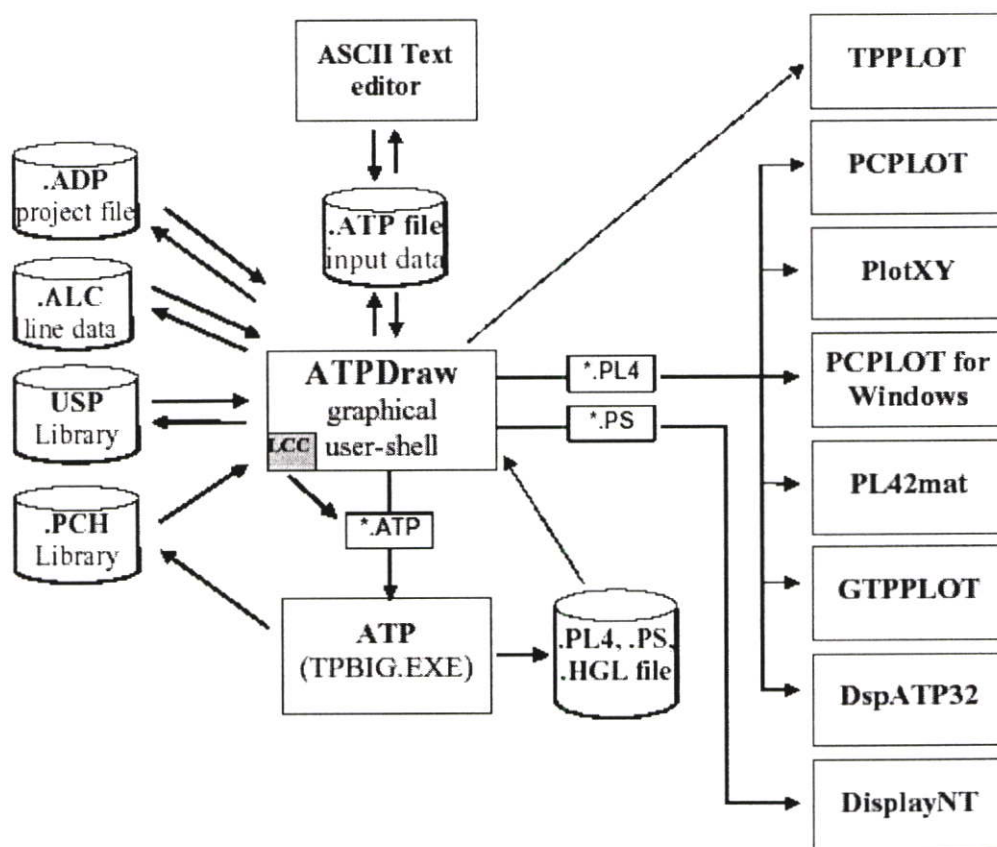
รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของโปรแกรม ATP-EMTP [5]

- การวิเคราะห์ในสถานะอยู่ตัว ซึ่งใช้เป็นสถานะเริ่มต้นก่อนการวิเคราะห์ทรานเซียนต์นั้น สามารถนำผลออกมาใช้ได้โดยตรง เช่น กรณีการวิเคราะห์การไหลของโหลด (load flow) ใน EMTP ได้ใช้การวิเคราะห์ในข้อนี้แบบเฟสเซอร์ และไม่พิจารณาองค์ประกอบแบบไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากเห็นว่าในสถานะอยู่ตัว องค์ประกอบของระบบที่สำคัญส่วนใหญ่เป็นแบบเชิงเส้นผลการ

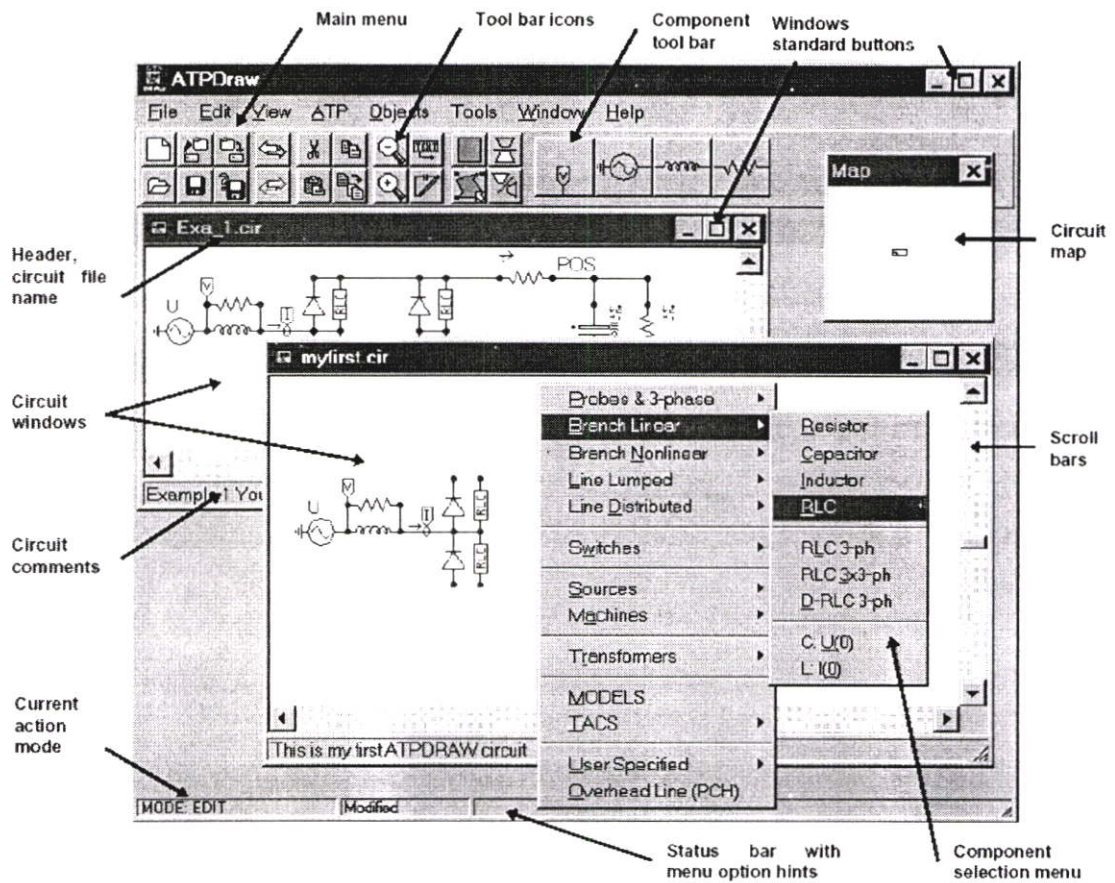
คำนวณค่ากระแสและกำลังงานที่ไหลเข้าสู่แขนงใด ๆ และค่าแรงดันปมถูกรวบรวมไว้ในตารางเดียวกัน

- การวิเคราะห์ทรานเซียนต์และไดนามิคระบบควบคุม เป็นการวิเคราะห์ที่เทียบได้กับการวิเคราะห์โดยแอนาลอกคอมพิวเตอร์ที่เริ่มใช้กันมาก่อน ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดย TACS จะสามารถเชื่อมการติดต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงสามารถนำ TACS มาใช้ในงานการควบคุม HVDC converter, excitation source ของเครื่องกลไฟฟ้า, ระบบและใช้เป็นแบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้เช่น แบบจำลองของ อาร์ค, แหล่งจ่ายกำลัง, โหลด สวิตช์ และอุปกรณ์ที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น เช่น รีแอกเตอร์แบบอิ่มตัวได้ (saturated-core reactor)

- การวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลอง และหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ EMTP มีโครงสร้างที่ทำให้โปรแกรมส่วนย่อยที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของระบบ สามารถทำการวิเคราะห์โดยอิสระได้ ดังเช่น แบบจำลองของสายส่ง ซึ่งให้ค่าพารามิเตอร์ได้ทั้งแบบที่ขึ้นและไม่ขึ้นกับความถี่ ค่าความต้านทาน ค่าตัวเหนี่ยวนำตัวเก็บประจุอิมพีแดนซ์เสิร์จ และ transformation matrix เป็นผลที่ได้รับในการคำนวณสำหรับความถี่ใดค่าหนึ่งที่กำหนดให้



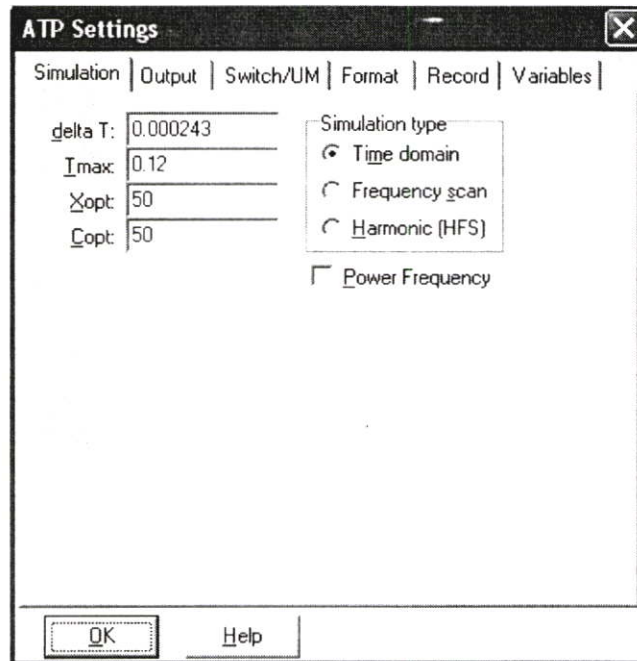
รูปที่ 4.2 โปรแกรมกราฟิกที่สามารถนำมาใช้งาน และชนิดของไฟล์ต่าง ๆ



รูปที่ 4.3 ส่วนต่างๆ ของหน้าต่างหลักของโปรแกรม ATPDraw

โปรแกรม ATPDraw เป็นโปรแกรมกราฟิกสำหรับใช้บนระบบปฏิบัติการ Windows เป็นเวอร์ชันของโปรแกรม EMTP ซึ่งจะเป็นโปรแกรมที่จะช่วยให้การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า ทำได้ง่ายขึ้นในการใช้งาน

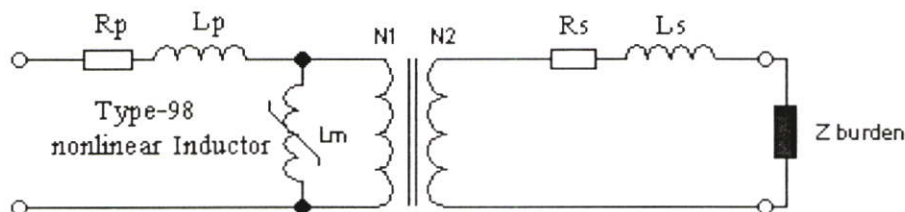
ตั้งค่าโปรแกรม ATPDraw ถือเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในงานวิจัยนี้ เพราะการตั้งค่า T: (Time step of simulation in seconds.) จะต้องสัมพันธ์กับ เงื่อนไขข้อจำกัดของเครื่องทดสอบบริเลย์ ในการทดสอบบริเลย์ป้องกันซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป Tmax: คือการตั้งเวลาสิ้นสุดของการเลียนแบบ (simulation) , Xopt: เป็นส่วนของการตั้งรูปแบบหน่วยของ อินดักแตนซ์ ถ้าเติม ศูนย์ หน่วยจะเป็น[mH] แต่ถ้าเติมค่าเท่ากับค่าที่ใช้งาน หน่วยจะเป็น [Ohm] และ Copt: เป็นส่วนของการตั้งรูปแบบหน่วยของ คาปาซิแตนซ์ ถ้าเติม ศูนย์ หน่วยจะเป็น[micro-Farad] แต่ถ้าเติมค่าเท่ากับค่าที่ใช้งาน หน่วยจะเป็น [micro-mho]



รูปที่ 4.4 หน้าต่างตั้งค่าโปรแกรม

#### 4.1 แบบจำลองของหม้อแปลงกระแส

การศึกษาสภาวะทรานเซียนต์ ของหม้อแปลงกระแสด้วยโปรแกรม EMTP สามารถสร้างแบบจำลอง 3 แบบ โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณลักษณะที่ต่างกัน 2 ชนิด คือ Type - 98 Pseudo - Nonlinear Reactor และ Type-96 Pseudo- Nonlinear Hysteretic Inductor นำมาต่อขนานกับแบบจำลองหม้อแปลงกระแส ซึ่งสร้างด้วยโปรแกรมย่อยที่ชื่อว่า Saturable Transformer



$R_p$  : Transformer primary resistance

$L_p$  : Transformer primary leakage inductance

$R_s$  : Transformer secondary resistance

$L_s$  : Transformer secondary leakage inductance

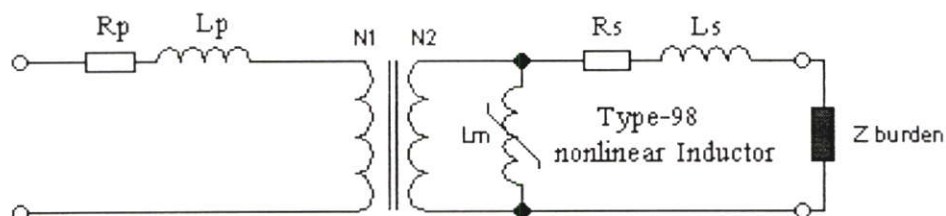
$L_m$  : Transformer magnetizing inductance (Type-98 Pseudo nonlinear Inductor)

$Z_b$  : Relay burden + lead impedance

$N_1$ :  $N_2$  Transformer turn ratio

รูปที่ 4.5 แบบจำลองที่ 1 ของหม้อแปลงกระแส

แบบจำลองที่ 1 มีการต่อ magnetizing branch เข้ากับทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น Type 98 Pseudo-Nonlinear Reactor ซึ่งสามารถกำหนดคุณลักษณะการอิ่มตัวในแกนเหล็ก โดยการป้อนข้อมูลเส้นแรงแม่เหล็กและกระแส ซึ่งอาจได้มาจากบริษัทผู้ผลิตโดยตรง แต่ถ้าเป็นข้อมูลแรงดันและกระแสที่ได้มาจากการทดสอบ จะไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรงต้องทำการแปลงข้อมูล  $V-I$  ให้เป็น  $\lambda - I$  เสียก่อนโดยใช้โปรแกรมย่อยที่ชื่อ “SATURA” ชื่อเสียของแบบจำลองนี้ คือข้อมูลแรงดันและกระแสที่ได้มาจากการทดสอบ ด้านปฐมภูมิจะหายากเพราะการทดสอบตามมาตรฐาน ANSI C57.13 ได้กำหนดให้ทำการทดสอบด้านทุติยภูมิซึ่งในทางปฏิบัติจะทำได้ง่ายและสะดวกกว่า



$R_p$  : Transformer primary resistance

$L_p$  : Transformer primary leakage inductance

$R_s$  : Transformer secondary resistance

$L_s$  : Transformer secondary leakage inductance

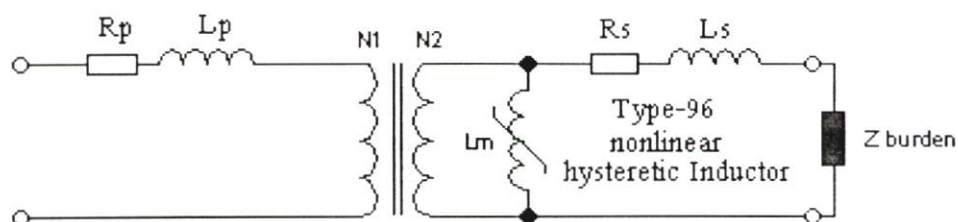
$L_m$  : Transformer magnetizing inductance (Type-98 Pseudo nonlinear Inductor)

$Z_b$  : Relay burden + lead impedance

$N_1 : N_2$  Transformer turn ratio

#### รูปที่ 4.6 แบบจำลองที่ 2 ของหม้อแปลงกระแส

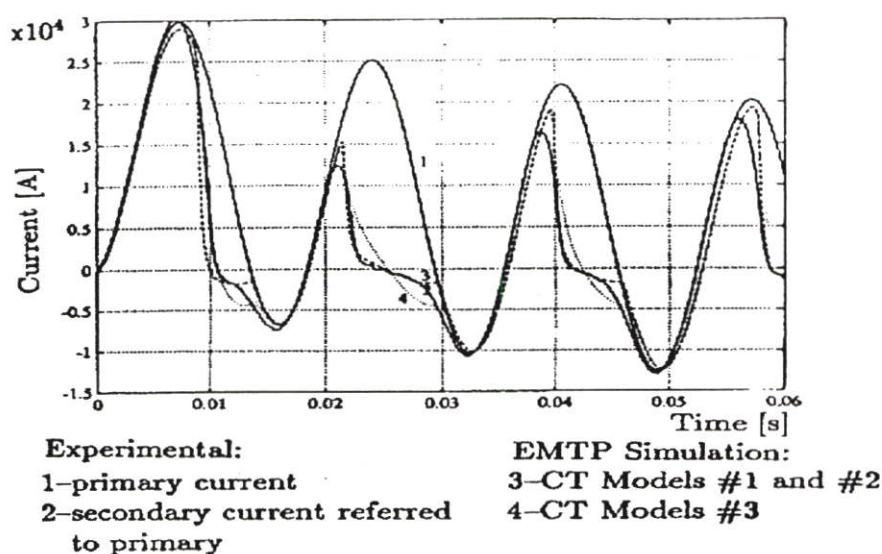
แบบจำลองที่ 2 จะต่างจากแบบจำลองที่ 1 คือทำการย้ายตัวเหนี่ยวนำ Type 98 จากด้านปฐมภูมิมาต่อทางด้านทุติยภูมิ แบบจำลองที่ 1 และ 2 ให้ผลตอบสนองเท่ากัน แต่แบบจำลองที่ 2 จะมีข้อดีอยู่ที่การหาข้อมูล  $V-I$  ของหม้อแปลงกระแสทำได้ง่ายกว่า



- $R_p$  : Transformer primary resistance  
 $L_p$  : Transformer primary leakage inductance  
 $R_s$  : Transformer secondary resistance  
 $L_s$  : Transformer secondary leakage inductance  
 $L_m$  : Transformer magnetizing inductance  
 (Type-96 Pseudo nonlinear hysteretic Inductor)  
 $Z_b$  : Relay burden + lead impedance  
 $N_1 : N_2$  Transformer turn ratio

รูปที่ 4.7 แบบจำลองที่ 3 ของหม้อแปลงกระแส

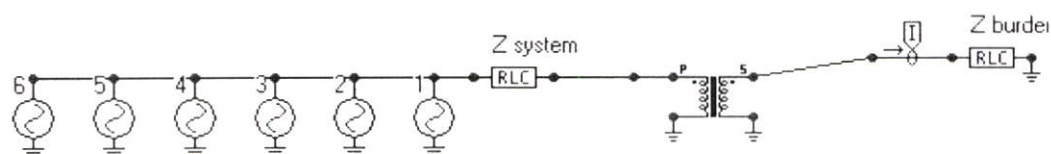
แบบจำลองที่ 3 นั้นมีความใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ 2 แตกต่างตรงส่วนของ magnetizing ที่มีการเลือกใช้ ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น Type-96 pseudo non-linear hysteretic inductor สามารถกำหนดคุณลักษณะทางด้านการอิ่มตัวในแกนเหล็ก, ฮิสเตอร์ซิส และเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (remanence flux) ในแกนเหล็กได้ [6-7] ส่วนการคำนวณหาคุณลักษณะทางด้าน ฮิสเตอร์ซิส จะเรียกใช้โปรแกรมย่อยที่มีชื่อว่า “HYSDAT”



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับแบบจำลองต่างๆ ในกรณี CT 2000:5 A, Fault 12050 A, Burden 8 ohm [6]

## 4.2 การทดสอบความถูกต้องของวงจร ใน ATPDraw

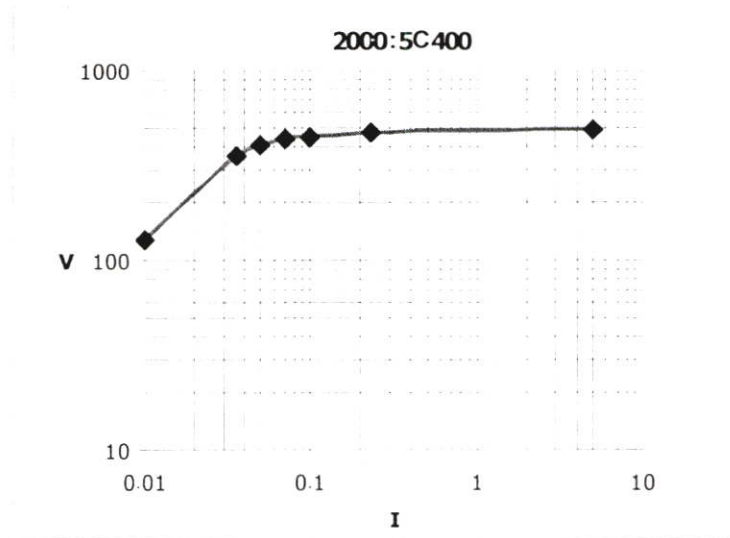
ตัวอย่างการทดสอบความถูกต้องของวงจร โดยใช้แบบจำลอง CT 2000:5 C400 ในการทดสอบ ระบุ Burden 4  $\Omega$  ใช้แหล่งจ่ายกระแส 6 ชุดความถี่ใช้งาน 50 Hz และ มุมเฟส 0 degrees



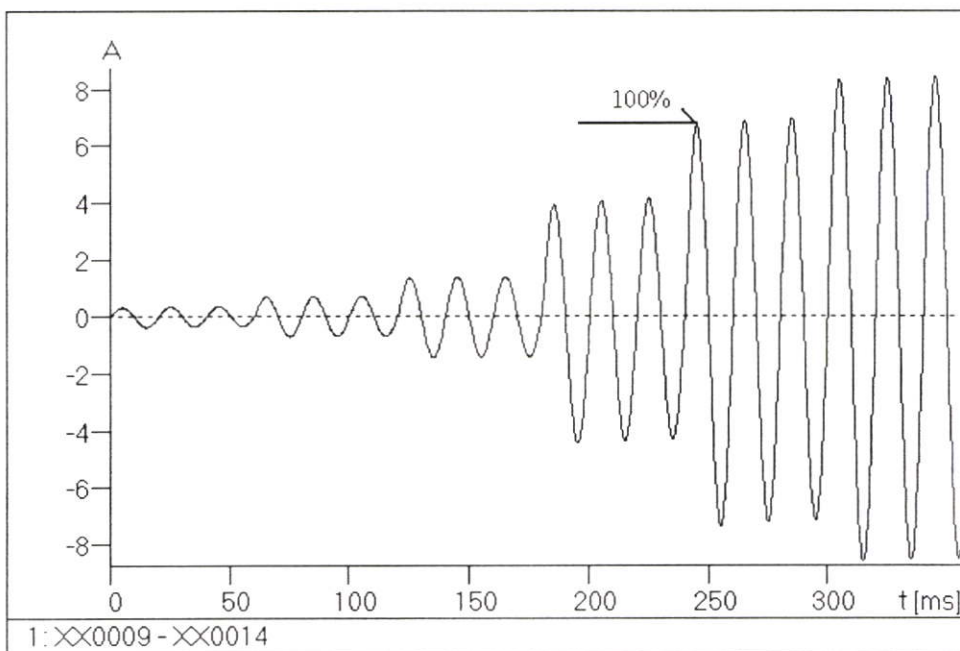
รูปที่ 4.9 วงจรทดสอบความถูกต้องใน ATPDraw

ตารางที่ 4.1 แสดงลำดับของแหล่งจ่ายกระแสในการทดสอบความถูกต้องของวงจร

Current Source	Percent Full Load	RMS Primary Current	Peak Primary Current	Source Start Time	Source End Time
1	5%	100	141.42	0.0	0.06
2	10%	200	282.84	0.06	0.12
3	20%	400	565.69	0.12	0.18
4	60%	1200	1697.06	0.18	0.24
5	100%	2000	2828.43	0.24	0.3
6	120%	2400	3394.11	0.3	0.36



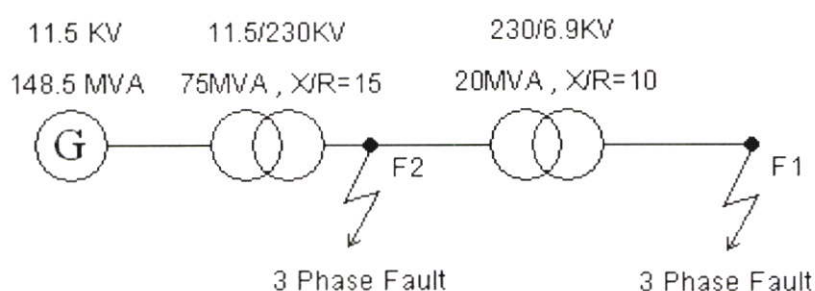
รูปที่ 4.10 ข้อมูล Excitation Test ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสนัด 2000:5 C400 50 Hz



รูปที่ 4.11 กระแสด้านทุติยภูมิที่ได้จากวงจรทดสอบความถูกต้องใน ATPDraw

### 4.3 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ

การสร้างแบบจำลองเฟสเดียวด้วยโปรแกรม ATPDraw อ้างอิงข้อมูลจากระบบป้องกันหม้อแปลงกำลังด้วยรีเลย์ผลต่าง ในโรงผลิตไฟฟ้าขนาด โดยจะมีหม้อแปลงที่เกี่ยวข้องหลายตัว ทั้งหม้อแปลงกำลัง (Power Transformer) และหม้อแปลงกระแสโดยจะมีรายละเอียด คือหม้อแปลงกระแสขนาด 2000:5 ที่ต่ออยู่ด้านแรงต่ำของหม้อแปลงกำลังขนาด 20MVA 230/6.9kV และหม้อแปลงกระแสขนาด 400:5 ที่ต่ออยู่ด้านแรงสูงของหม้อแปลงกำลังขนาด 75MVA 11.5/230kV โดยในการศึกษาได้คำนวณกระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสฟอลต์ ในโซนป้องกัน 2 จุดคือ F1 ด้านแรงต่ำของหม้อแปลงกำลัง 20 MVA และ F2 ด้านแรงสูงของหม้อแปลงกำลังขนาด 75 MVA ดังรูปที่

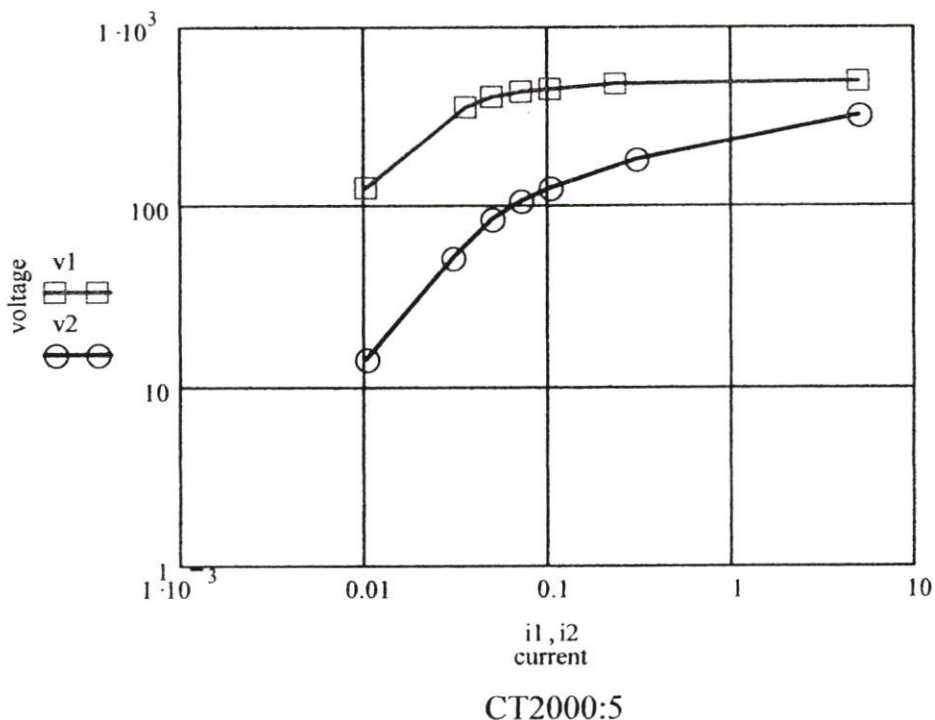


รูปที่ 4.12 ข้อมูลส่วนหนึ่งของระบบในโรงผลิตไฟฟ้าขนาด

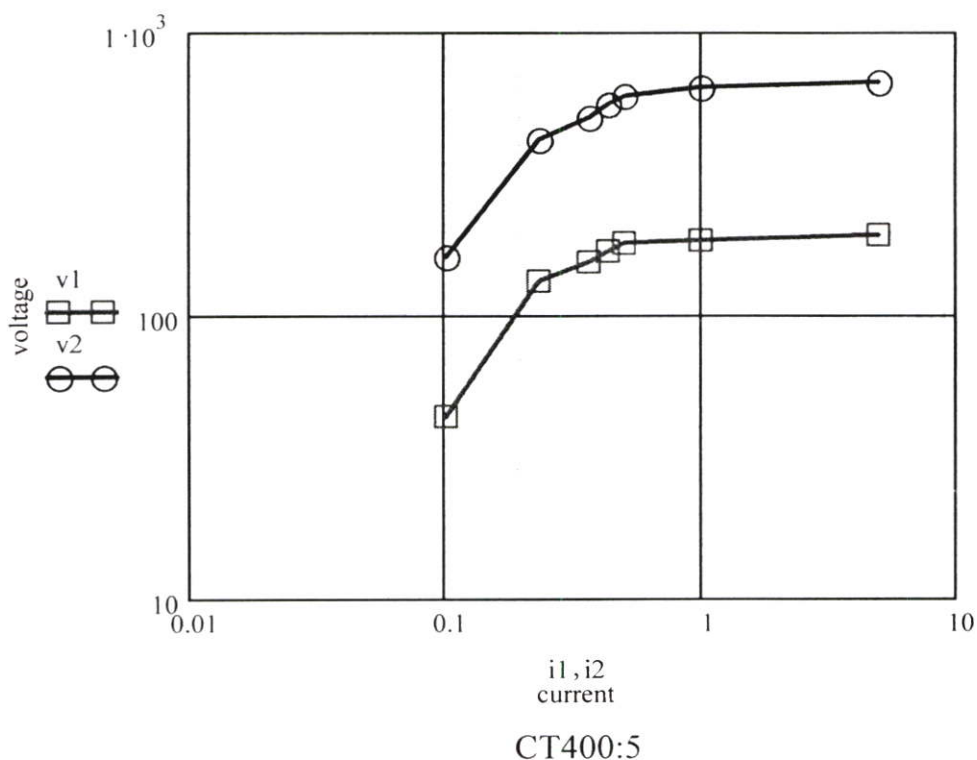
ตารางที่ 4.2 ขนาดหม้อแปลงกระแสที่ใช้ในการทดสอบ

CT Ratio	Accuracy Class
2000:5	C400
2000:5	C800
400:5	C200
400:5	C800

ข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการสร้างแบบจำลองหม้อแปลงกระแส คือข้อมูลการทดสอบกระแสและแรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสตามมาตรฐาน ANSI C57.13 ข้อมูลการทดสอบที่ได้จะเป็นลักษณะของ  $V_{rms}-I_{rms}$  ซึ่งจะไม่สามารถนำไปใช้ในแบบจำลองได้โดยตรง จะต้องทำการแปลงข้อมูล  $V_{rms}-I_{rms}$  ให้เป็น  $\lambda$ -Ipeak (flux-current peak) เสียก่อนซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



**รูปที่ 4.13** v1- i1 ข้อมูลการทดสอบ  $V_{rms}-I_{rms}$  ของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 50Hz  
 v2 - i2 ข้อมูลการทดสอบ  $V_{rms}-I_{rms}$  ของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 50Hz



**รูปที่ 4.14** v1- i1 ข้อมูลการทดสอบ  $V_{rms}$ - $I_{rms}$  ของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 50Hz  
v2 - i2 ข้อมูลการทดสอบ  $V_{rms}$ - $I_{rms}$  ของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 50Hz

#### 4.4 การกำหนดขอบเขตกรณีศึกษา

การศึกษาพฤติกรรมและการตอบสนองของหม้อแปลงกระแสในสถานะทรานเซียนต์ ในงานวิจัยนี้ ใช้ข้อมูลของหม้อแปลงกระแส 4 ตัว ตามตารางที่ 4.2 เพื่อเปรียบเทียบผลของ Accuracy Class และจำลอง 3 เฟส ฟอล์ด 2 จุด ตามรูปที่ ซึ่งแต่ละจุดมีค่าอัตราส่วน X/R ทางด้านปฐมภูมิต่างกัน เพื่อศึกษาผลของออฟเซตกระแสตรงที่มีต่อการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส ซึ่งค่าที่ใช้ก็คือ 10 และ 15 สำหรับขนาดของเบอร์เดนจะใช้ตามมาตรฐาน IEEE C57.13 (1993) เป็นเกณฑ์ โดยเลือกค่าเบอร์เดน ที่ PF = 1 และ PF = 0.5 โดยการศึกษาจะมีทั้งหมด 16 กรณี แบ่งเป็นกรณีที่ใช้หม้อแปลงกระแสขนาด 2000:5 8 กรณี และหม้อแปลงกระแสขนาด 400:5 8 กรณี

ตารางที่ 4.3 ชื่อและขอบเขตของกรณีศึกษาสำหรับหม้อแปลงกระแสขนาด 2000 : 5 50Hz

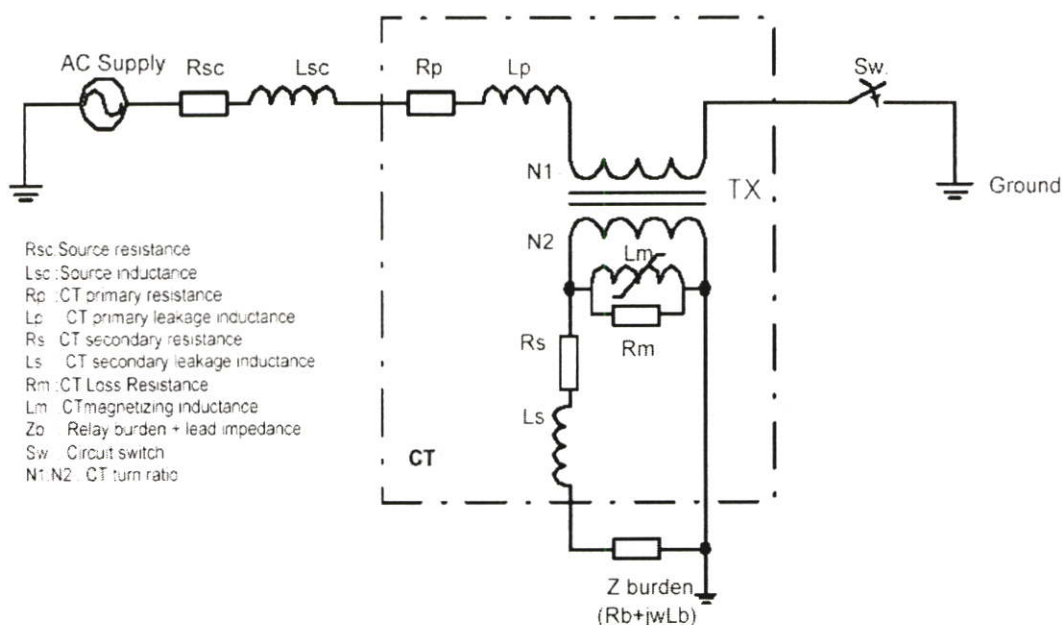
$I_{F1}$ sym (Arms)	X/R	Burden ( $\Omega$ )	50Hz	
			C400	C800
12885	10	4	A154	A158
		8	A254	A258
		4+j7	A354	A358
		8+j14	A454	A458

ตารางที่ 4.4 ชื่อและขอบเขตของกรณีศึกษาสำหรับหม้อแปลงกระแสขนาด 400 : 5 50Hz

$I_{F2}$ sym (Arms)	X/R	Burden ( $\Omega$ )	50Hz	
			C200	C800
913	15	4	B152	B158
		8	B252	B258
		4+j7	B352	B358
		8+j14	B452	B458

## 4.5 การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงกระแส และระบบ

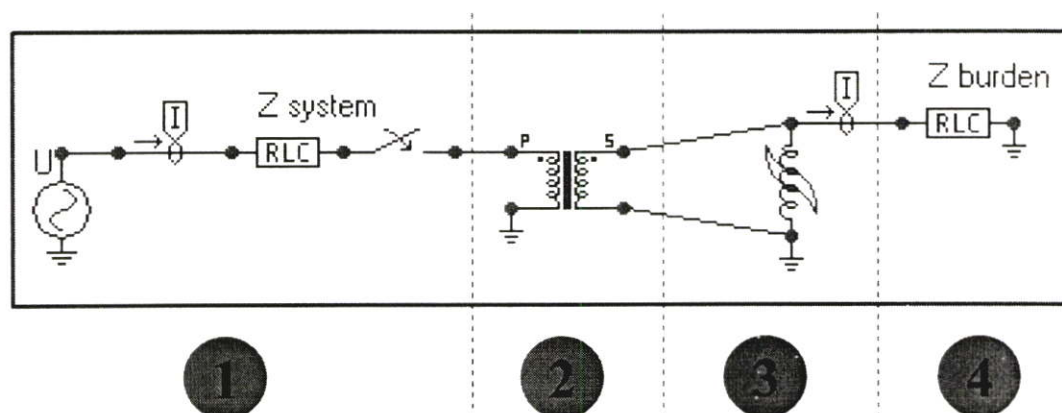
การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงกระแส และระบบ ในงานวิจัยนี้ สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูล เพื่อเป็นแนวทาง ในการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP



รูปที่ 4.15 วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแสและระบบ ขณะเกิดการลัดวงจร

การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงกระแส และระบบด้วยโปรแกรม ATPDraw ได้ถูกจัดทำขึ้น โดยจำลองจากระบบป้องกันหม้อแปลงกำลังขนาด 75 MVA และ 20 MVA ของโรงผลิตไฟฟ้า ขนอมซึ่งเป็นส่วนของการป้องกันหม้อแปลงกำลังด้วยรีเลย์ผลต่าง (87T) โดยในการใช้โปรแกรม ATPDraw สามารถเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น คือ Type Type-96 pseudo non-linear hysteristic inductor สามารถกำหนดคุณลักษณะการอิ่มตัว , ฮีสเทอรีซิส และเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (remanence flux) ในแกนเหล็ก

แบบจำลองได้ถูกสร้างขึ้นโดยเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำ Type-96 pseudo non-linear hysteristic inductor มาต่อขนานกับหม้อแปลงกระแสด้านทุติยภูมิ จากนั้นนำข้อมูลไปสร้างแบบจำลอง ใน ATPDraw โดยจะพิจารณาเพียงเฟสเดียว ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แบบจำลองของหม้อแปลงกระแสและระบบใน ATPDraw

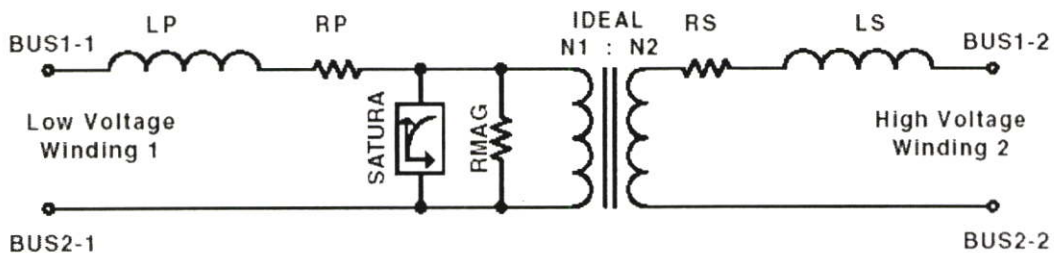
- ส่วนที่ 1 ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแส จะมีแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งในที่นี้ จำลองให้เป็นกระแส ผิดพร้อมเฟสเดียวแบบสมมาตร ส่วน Z system คือตัวบ่งชี้ค่า X/R ของด้านปฐมภูมิ
- ส่วนที่ 2 ส่วนของหม้อแปลงกระแส ที่ใช้โปรแกรมย่อย Saturable Transformer
- ส่วนที่ 3 ตัวเหนี่ยวนำ Type-96 pseudo non-linear hysteretic inductor มาต่อขนานกับหม้อแปลง กระแสด้านทุติยภูมิสามารถกำหนดคุณลักษณะทางด้านการอิ่มตัวในแกนเหล็ก, ฮีสเตอร์ี ซีส และเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (remanence flux)
- ส่วนที่ 4 Z burden คือภาระของหม้อแปลงกระแสในที่นี้คือ ค่าอิมพีแดนซ์ ของรีเลย์ป้องกัน

ตารางที่ 4.5 แสดงรายละเอียดของส่วนประกอบที่ใช้ในแบบจำลอง

Selection	Object name	Icon	ATP card	Description
AC type 14	AC1PH		SOURCE	AC source. Current or voltage.
RLC	RLC		BRANCH type 0	R, L and C in series.
Switch time controlled	SWTCHTC		SWITCH type 0	Single phase time controlled switch.
Saturable 1 phase	TRAFO_S		BRANCH TRANSFORMER	Single-phase saturable transformer.
I(n) Type 96	NLIND96		BRANCH type 96	Pseudo-nonlinear hysteretic inductor.

#### 4.6 โครงสร้างของแบบจำลองของหม้อแปลงกระแสที่ใช้ ATP

ในส่วนนี้จะแสดงการสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงกระแสที่ใช้ ATP โดยใช้โปรแกรมย่อยที่เรียกว่า Saturable Transformer โดยมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ส่วนประกอบของ ATP Saturable Transformer

แบบจำลองของหม้อแปลงกระแสจะต้องใช้ข้อมูล Excitation Curve, อัตราส่วนและระดับความถูกต้องของหม้อแปลงกระแส ในส่วนของ SATURA หมายถึงการใช้โปรแกรมย่อย SATURA ในการจัดการกับข้อมูล การทดสอบ (Excitation Test) ก่อนที่จะจะนำมาใช้กับแบบจำลอง และในส่วนของ RMAG หมายถึง เส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (remanence flux)

ตารางที่ 4.6 แสดงรายละเอียดของข้อมูลที่จะต้องป้อนให้ Saturable Transformer

Data	Description
I0	Current [A] through magnetizing branch (MB) at steady state.
F0	Flux [Wb-turn] in MB at steady state.
RMAG	Resistance in magnetizing branch in Ohm. 0 = infinite resistance.
RP	Resistance in primary winding in Ohm.
LP	Inductance in primary winding in Ohm if $X_{opt} = \text{power freq.}$
VRP	Rated voltage [kV] in primary winding (N1).
RS	Resistance in secondary winding in Ohm.
LS	Inductance in secondary winding in Ohm if $X_{opt} = \text{power freq.}$
VRS	Rated voltage [kV] in secondary winding (N2).
RMS	Nonlinear characteristic flag. Current/Flux characteristic must be entered.

#### 4.7 การใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น Type-96 pseudo non-linear hysteristic inductor

ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น Type-96 pseudo non-linear hysteristic inductor เป็นส่วนประกอบที่ต่อขนานอยู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง สามารถกำหนดคุณลักษณะทางด้านการอิ่มตัวในแกนเหล็ก, ฮิสเตอร์รีซิส และเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (remanence flux) ในการใช้งานจะต้องป้อนข้อมูล  $\lambda$ -Ipeak คือ Attributes และ Characteristic

Attributes ส่วนนี้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นเช่นการตั้งชื่อ ,ชื่อจุดต่อ ที่สำคัญคือค่า  $\lambda$ -Ipeak ในสภาวะอยู่ตัว (steady-state) ในรูปที่ 4.18 ช่อง CURR จะต้องป้อนกระแสในสภาวะอยู่ตัว แต่สามารถป้อน 8888 เพื่อให้ตัวโปรแกรมคำนวณค่า  $\lambda$ -Ipeak สภาวะอยู่ตัวเองได้

Component: NLIND96

Attributes | Characteristic

DATA	VALUE
CURR	8888
FLUX	0
RESID	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	
To	1	

Group No: 0 Label: \_\_\_\_\_

Comment: \_\_\_\_\_

Output:   Hide  Lock

OK Cancel Help

รูปที่ 4.18 แสดงตัวอย่างการป้อน Attributes ของตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น Type-96 pseudo non-linear hysteristic inductor

Characteristic คือส่วนที่จะต้องป้อนข้อมูล  $\lambda$ - Ipeak ที่ได้มาจากโปรแกรมย่อย SATURA และ HYSDAT เพื่อให้แสดงคุณลักษณะการอิ่มตัวในแกนเหล็ก (Saturation) และฮีสเตอร์รีซิส ในส่วนนี้ จะต้องใช้โปรแกรมย่อย SATURA และโปรแกรม HYSDAT ช่วยในการจัดการกับข้อมูล Vrms-Irms ก่อนจะป้อนค่าให้กับโปรแกรม

#### 4.8 การใช้โปรแกรมย่อย SATURA

โปรแกรมย่อย SATURA เป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม EMTP มีหน้าที่แปลงข้อมูล Vrms-Irms ให้เป็น  $\lambda$ - Ipeak เพื่อนำไปเป็นข้อมูลป้อนให้กับตัวเหนี่ยวนำ Type96 ในการใช้งานต้องเลือกข้อมูล Vrms-Irms อย่างน้อย 7 จุด การเลือกจุดใช้ลักษณะประมาณแบบ piecewise linear

การใช้โปรแกรมย่อย SATURA ต้องป้อนโปรแกรมในลักษณะ .txt File ในการป้อนข้อมูลแต่ละบรรทัดจะมีลักษณะคล้ายกับการเจาะบัตร (Card) เพื่อใช้สั่งให้เครื่องคอมพิวเตอร์ทำงาน โดยในหนึ่งบรรทัดของบัตรจะมี 80 คอลัมน์ ช่องว่างถือเป็นตัวอักษร 1 ตัว 9999 คือการจบข้อมูล บรรทัดที่ขึ้นต้นด้วยตัว C จะไม่มีการนำไปประมวลผล ในการพิมพ์ข้อมูลจะต้องระมัดระวังเรื่องตำแหน่ง ซึ่งจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไข EMTP Rule Book โดยจะแสดงตัวอย่างการป้อนข้อมูล เพื่อแปลงข้อมูล Vrms-Irms ให้เป็น  $\lambda$ - Ipeak ดังรูปที่ 4.19

```

sat25400.txt - Notepad
File Edit Format View Help
BEGIN NEW DATA CASE
C Input data for supporting routine SATURA of ct2000:5 50Hz
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
SATURATION
$ERASE
C FREQ >< VBASE>< SBASE><IPUNCH><KTHIRD>
      50. 1.0E-3 1.0E-6
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

C      Irms ><      Vrms >
          0.01      126.67
          0.03      353.3
          0.05      406.63
          0.07      433.3
          0.1       446.63
          0.3       473.29
           5        486.62
          9999

$PUNCH,c:\satura\sat25c400.pch
BLANK card ending all "SATURATION" data cases
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
  
```

รูปที่ 4.19 แสดงตัวอย่างการป้อนข้อมูลเพื่อแปลง ข้อมูล Vrms-Irms ให้เป็น  $\lambda$ - Ipeak โดยใช้ข้อมูลของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 50Hz

หลังจากรันโปรแกรมแล้วไฟล์เอาต์พุตที่ได้ จะไปอยู่ใน โฟลเดอร์ ที่ตั้งไว้ในบรรทัด PUNCH โดยจะมีนามสกุลเป็น .pch File

```

SAT25C400.PCH - Notepad
File Edit Format View Help
C <++++++> Cards punched by support routine on 26-Oct-04
C SATURATION
C $ERASE
C C FREQ >< VBASE>< SBASE><IPUNCH><KTHIRD>
C      50.  1.0E-3  1.0E-6
C C      1      2      3      4      5
C C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678
C C      Irms ><      Vrms >
C      0.01      126.67
C      0.03      353.3
C      0.05      406.63
C      0.07      433.3
C      0.1      446.63
C      0.3      473.29
C      5      486.62
C      9999
1.41421356E-02  5.70215339E-01
4.28933940E-02  1.59040877E+00
9.42706485E-02  1.83047812E+00
1.41946468E-01  1.95053530E+00
2.47162997E-01  2.01054138E+00
7.94471324E-01  2.13055355E+00
1.75086349E+01  2.19055963E+00
9999
  
```

รูปที่ 4.20 แสดงตัวอย่างไฟล์เอาต์พุตที่ได้จากการแปลงข้อมูล Vrms-Irms ให้เป็น  $\lambda$ -Ipeak โดยใช้ข้อมูล ของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 50Hz

ตารางที่ 4.7 สรุปข้อมูลการแปลง Vrms-Irms ให้เป็น  $\lambda$ -Ipeak ของหม้อแปลงกระแส 2000:5C400

จุดที่	ข้อมูลอินพุต		ข้อมูลเอาต์พุต	
	Irms	Vrms	Ipeak	$\lambda$
1	0.01	126.67	1.414E-02	5.702E-01
2	0.03	353.3	4.289E-02	1.590E+00
3	0.05	406.63	9.427E-02	1.830E+00
4	0.07	433.3	1.419E-01	1.950E+00
5	0.1	446.63	2.471E-01	2.010E+00
6	0.3	473.29	7.944E-01	2.130E+00
7	5	486.62	1.750+01	2.190E+00

ตารางที่ 4.8 สรุปข้อมูลการแปลง Vrms-Irms ให้เป็น  $\lambda$ -Ipeak ของหม้อแปลงกระแส 2000:5C800

จุดที่	ข้อมูลอินพุต		ข้อมูลเอาต์พุต	
	Irms	Vrms	Ipeak	$\lambda$
1	0.01	14	1.414E-02	6.302E-02
2	0.03	52	4.132E-02	2.340E-01
3	0.05	85	7.156E-02	3.826E-01
4	0.07	106.66	1.075E-01	4.801E-01
5	0.1	126.67	1.644E-01	5.702E-01
6	0.3	180	5.238E-01	8.102E-01
7	5	313.31	8.719E+00	1.410E+00

ตารางที่ 4.9 สรุปข้อมูลการแปลง Vrms-Irms ให้เป็น  $\lambda$ - Ipeak ของหม้อแปลงกระแส 400:5C200

จุดที่	ข้อมูลอินพุต		ข้อมูลเอาต์พุต	
	Irms	Vrms	Ipeak	$\lambda$
1	0.1	43.33	1.414E-01	1.950E-01
2	0.232	133.33	3.124E-01	6.001E-01
3	0.364	153.33	6.690E-01	6.902E-01
4	0.43	166.66	6.884E-01	7.502E-01
5	0.5	180	8.209E-01	8.102E-01
6	1	185	2.998E+00	8.327E-01
7	5	193.32	1.487E+01	8.702E-01

ตารางที่ 4.10 สรุปข้อมูลการแปลง Vrms-Irms ให้เป็น  $\lambda$ - Ipeak ของหม้อแปลงกระแส 400:5C800

จุดที่	ข้อมูลอินพุต		ข้อมูลเอาต์พุต	
	Irms	Vrms	Ipeak	$\lambda$
1	0.1	159.98	1.414E-01	7.201E-01
2	0.232	413.39	3.212E-01	1.860E+00
3	0.364	500	6.231E-01	2.250E+00
4	0.43	560	6.480E-01	2.520E+00
5	0.5	590	8.828E-01	2.655E+00
6	1	630	2.396E+00	2.835E+00
7	5	660	1.481E+01	2.971E+00

## 4.9 การใช้โปรแกรมย่อย HYSDAT

โปรแกรมย่อย HYSDAT ก็เป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม EMTP ใช้ในการแปลงข้อมูล  $\lambda - I_{peak}$  ให้เป็นข้อมูลที่แสดงคุณลักษณะด้าน ฮีสเตอร์รีซิสแล้วนำไปใช้ร่วมกับตัวหนีขวนำ Type-96

```

hys400c200.txt - Notepad
File Edit Format View Help
BEGIN NEW DATA CASE
C Input data for supporting routine HYSDAT
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
HYSTERESIS
$ERASE
C ITYPE>< LEVEL><
      1      4
C CURSA><FLXSAT><
      14.87  0.87
$PUNCH,c:\hysdat\hys400c200.lib
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
  
```

รูปที่ 4.21 แสดงตัวอย่างการป้อนข้อมูลเพื่อแปลง ข้อมูล  $\lambda - I_{peak}$  ให้แสดงข้อมูลคุณลักษณะด้าน ฮีสเตอร์รีซิสโดยใช้ข้อมูลของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 50Hz

เงื่อนไขการป้อน .txt File จะต่างกับการใช้โปรแกรมย่อย SATURA โดยในการใช้งาน โปรแกรมย่อย HYSDAT จะใช้ข้อมูลเส้นแรงแม่เหล็ก และกระแส ( $\lambda - I_{peak}$ ) ที่ได้มาจาก โปรแกรม SATURA ณ จุดอิมตัวสูงสุดมา 1 จุด เพื่อป้อนให้กับโปรแกรมย่อย HYSDAT และป้อน ตัวเลขที่บ่งบอกถึงชนิดของคุณลักษณะของแกนเหล็ก ถ้าเป็นเลข 1 คือแกนเหล็กชนิด ARMO M4 oriented silicon steel พร้อมระบุตัวเลขที่จะแสดงถึงความละเอียดของข้อมูลเอาต์พุตที่ต้องการ เช่น ถ้าป้อนเลข 4 ก็จะได้เอาต์พุต 22 ข้อมูล ตามเงื่อนไขจาก EMTP Rule Book ดังตัวอย่างที่แสดง การป้อนข้อมูลในรูปที่ 4.21 หลังจากรันโปรแกรมแล้วไฟล์เอาต์พุตที่ได้ จะไปอยู่ในโฟลเดอร์ ที่ตั้ง ไว้ในบรรทัด PUNCHโดยจะมีนามสกุลเป็น .lib File ดังรูปที่ 4.22

```

HYS400C200.LIB - Notepad
File Edit Format View Help
C <++++++> Cards punched by support 12.30.18 <++++++>
C HYSTERESIS
C $ERASE
C C ITYPE<> LEVEL<>
C      1      4
C C CURSA<> FLXSAT<>
C      14.87    0.87
-5.57625000E+00 -8.49529412E-01
-3.71750000E+00 -8.44411765E-01
-1.67287500E+00 -8.26500000E-01
-7.43500000E-01 -8.08588235E-01
-2.78812500E-01 -7.93235294E-01
 9.29375000E-02 -7.62529412E-01
 3.25281250E-01 -7.26705882E-01
 5.39037500E-01 -6.65294118E-01
 6.50562500E-01 -5.62941176E-01
 7.43500000E-01 -4.09411765E-01
 9.29375000E-01  2.73794118E-01
 1.02231250E+00  3.78705882E-01
 1.30112500E+00  5.11764706E-01
 1.67287500E+00  6.14117647E-01
 2.02603750E+00  6.65294118E-01
 2.64871875E+00  7.16470588E-01
 3.62456250E+00  7.62529412E-01
 4.97215625E+00  7.98352941E-01
 6.50562500E+00  8.23941176E-01
 9.29375000E+00  8.49529412E-01
 1.48700000E+01  8.70000000E-01
 2.04462500E+01  8.75117647E-01
          9999.

```

รูปที่ 4.22 แสดงตัวอย่างไฟล์เข้าที่พุดที่แสดงข้อมูลคุณลักษณะด้าน ฮิสเตอร์รีซิส โดยใช้ข้อมูลของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 50Hz

ตารางที่ 4.11 สรุปข้อมูลคุณลักษณะด้าน ฮีสเตอร์รีซิส ที่ได้จากโปรแกรม HYSDAT โดยใช้ข้อมูล ณ จุดอิ่มตัวสูงสุด  $I_{peak} = 17.508$  Ampere  $\lambda = 2.19$  Volts-sec ของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 50Hz

<b>Ipeak</b>	<b><math>\lambda</math></b>
-6.56550000E+00	-2.13847059E+00
-4.37700000E+00	-2.12558824E+00
-1.96965000E+00	-2.08050000E+00
-8.75400000E-01	-2.03541176E+00
-3.28275000E-01	-1.99676471E+00
1.09425000E-01	-1.91947059E+00
3.82987500E-01	-1.82929412E+00
6.34665000E-01	-1.67470588E+00
7.65975000E-01	-1.41705882E+00
8.75400000E-01	-1.03058824E+00
1.09425000E+00	6.89205882E-01
1.20367500E+00	9.53294118E-01
1.53195000E+00	1.28823529E+00
1.96965000E+00	1.54588235E+00
2.38546500E+00	1.67470588E+00
3.11861250E+00	1.80352941E+00
4.26757500E+00	1.91947059E+00
5.85423750E+00	2.00964706E+00
7.65975000E+00	2.07405882E+00
1.09425000E+01	2.13847059E+00
1.75080000E+01	2.19000000E+00
2.40735000E+01	2.20288235E+00

ตารางที่ 4.12 สรุปข้อมูลคุณลักษณะด้าน ฮีตเตอร์รีซิส ที่ได้จากโปรแกรม HYSDAT โดยใช้ข้อมูล ณ จุดอิ่มตัวสูงสุด  $I_{peak} = 8.719$  Ampere  $\lambda = 1.41$  Volts-sec ของหม้อแปลง กระแส 2000:5 C800 50Hz

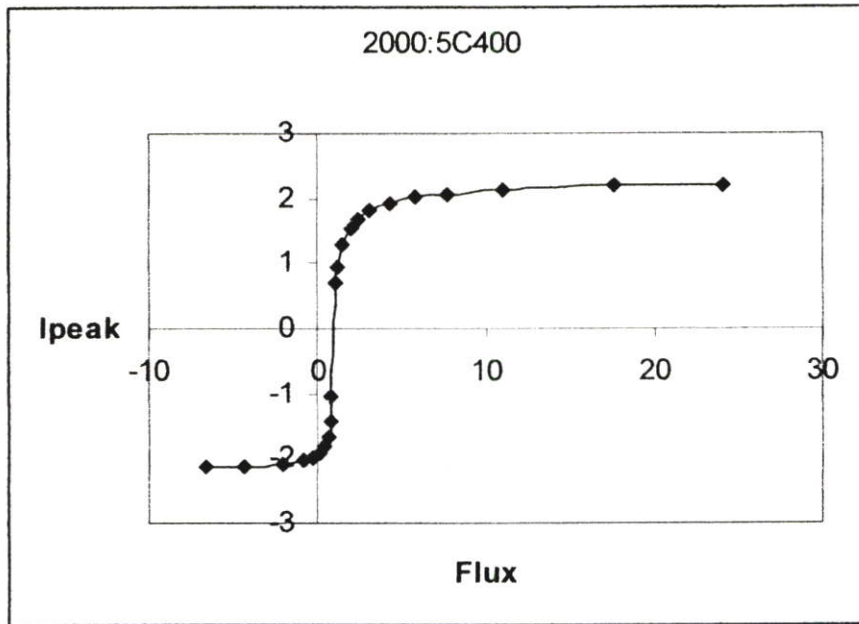
$I_{peak}$	$\lambda$
-3.26962500E+00	-1.37682353E+00
-2.17975000E+00	-1.36852941E+00
-9.80887500E-01	-1.33950000E+00
-4.35950000E-01	-1.31047059E+00
-1.63481250E-01	-1.28558824E+00
5.44937500E-02	-1.23582353E+00
1.90728125E-01	-1.17776471E+00
3.16063750E-01	-1.07823529E+00
3.81456250E-01	-9.12352941E-01
4.35950000E-01	-6.63529412E-01
5.44937500E-01	4.43735294E-01
5.99431250E-01	6.13764706E-01
7.62912500E-01	8.29411765E-01
9.80887500E-01	9.95294118E-01
1.18796375E+00	1.07823529E+00
1.55307187E+00	1.16117647E+00
2.12525625E+00	1.23582353E+00
2.91541562E+00	1.29388235E+00
3.81456250E+00	1.33535294E+00
5.44937500E+00	1.37682353E+00
8.71900000E+00	1.41000000E+00
1.19886250E+01	1.41829412E+00

ตารางที่ 4.13 สรุปข้อมูลคุณลักษณะด้าน ฮีสเทอรีซิส ที่ได้จากโปรแกรม HYSDAT โดยใช้ข้อมูล ณ จุดอิ่มตัวสูงสุด  $I_{peak} = 14.87$  Ampere  $\lambda = 0.87$  Volts-sec ของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 50Hz

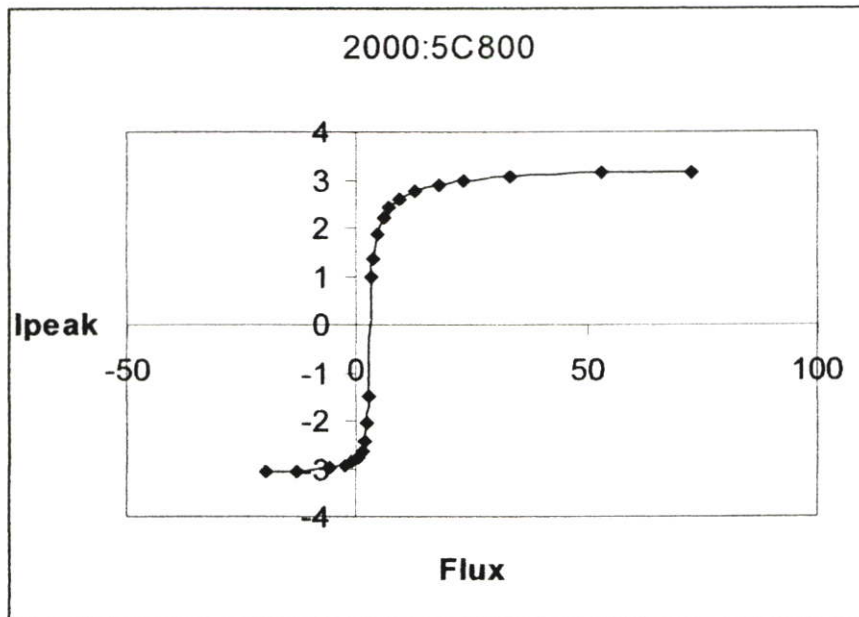
<b>Ipeak</b>	<b><math>\lambda</math></b>
-5.57625000E+00	-8.49529412E-01
-3.71750000E+00	-8.44411765E-01
-1.67287500E+00	-8.26500000E-01
-7.43500000E-01	-8.08588235E-01
-2.78812500E-01	-7.93235294E-01
9.29375000E-02	-7.62529412E-01
3.25281250E-01	-7.26705882E-01
5.39037500E-01	-6.65294118E-01
6.50562500E-01	-5.62941176E-01
7.43500000E-01	-4.09411765E-01
9.29375000E-01	2.73794118E-01
1.02231250E+00	3.78705882E-01
1.30112500E+00	5.11764706E-01
1.67287500E+00	6.14117647E-01
2.02603750E+00	6.65294118E-01
2.64871875E+00	7.16470588E-01
3.62456250E+00	7.62529412E-01
4.97215625E+00	7.98352941E-01
6.50562500E+00	8.23941176E-01
9.29375000E+00	8.49529412E-01
1.48700000E+01	8.70000000E-01
2.04462500E+01	8.75117647E-01

ตารางที่ 4.14 สรุปข้อมูลคุณลักษณะด้าน ฮีสเทอริซิส ที่ได้จากโปรแกรม HYSDAT โดยใช้ข้อมูล ณ จุดอิ่มตัวสูงสุด  $I_{peak} = 14.81 \text{ Ampere}$   $\lambda = 2.97 \text{ Volts-sec}$  ของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 50Hz

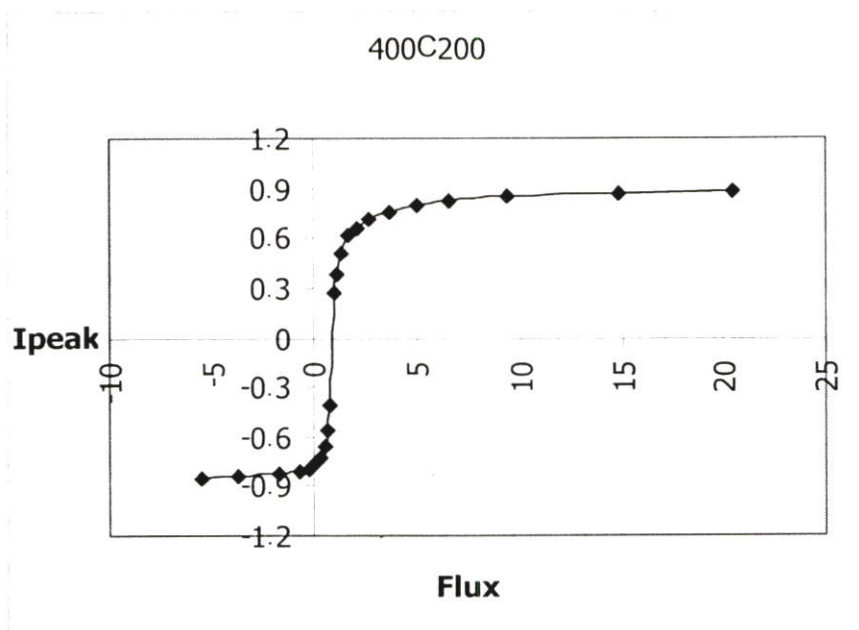
<b>Ipeak</b>	<b><math>\lambda</math></b>
-5.55375000E+00	-2.90011765E+00
-3.70250000E+00	-2.88264706E+00
-1.66612500E+00	-2.82150000E+00
-7.40500000E-01	-2.76035294E+00
-2.77687500E-01	-2.70794118E+00
9.25625000E-02	-2.60311765E+00
3.23968750E-01	-2.48082353E+00
5.36862500E-01	-2.27117647E+00
6.47937500E-01	-1.92176471E+00
7.40500000E-01	-1.39764706E+00
9.25625000E-01	9.34676471E-01
1.01818750E+00	1.29282353E+00
1.29587500E+00	1.74705882E+00
1.66612500E+00	2.09647059E+00
2.01786250E+00	2.27117647E+00
2.63803125E+00	2.44588235E+00
3.60993750E+00	2.60311765E+00
4.95209375E+00	2.72541176E+00
6.47937500E+00	2.81276471E+00
9.25625000E+00	2.90011765E+00
1.48100000E+01	2.97000000E+00
2.03637500E+01	2.98747059E+00



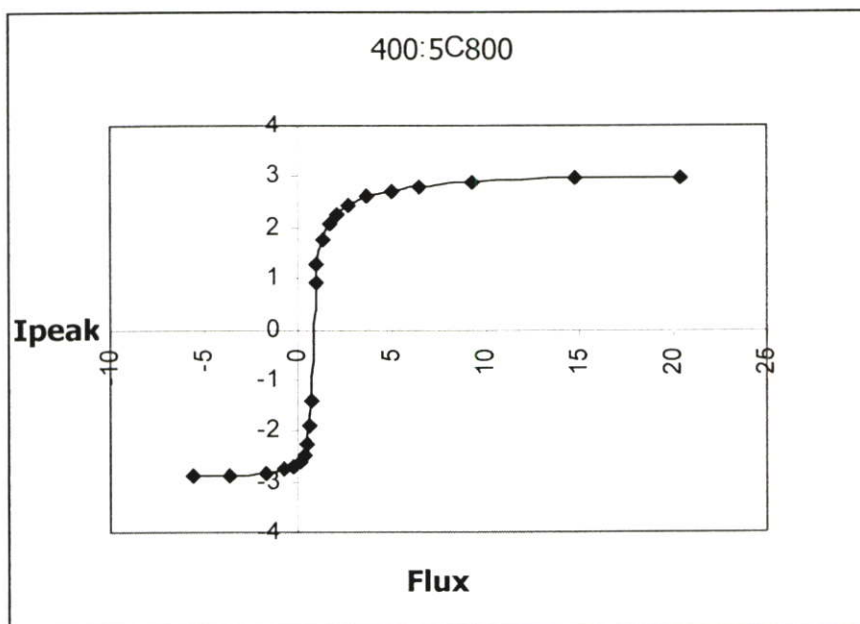
รูปที่ 4.23 แสดงเส้นโค้ง ฮิสเตอร์รีซิส ที่ได้จาก โปรแกรมย่อย HYSDAT ของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 50Hz



รูปที่ 4.24 แสดงเส้นโค้ง ฮิสเตอร์รีซิส ที่ได้จาก โปรแกรมย่อย HYSDAT ของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 50Hz



รูปที่ 4.25 แสดงเส้นโค้ง ฮิสเตอร์รีซิส ที่ได้จากโปรแกรมย่อย HYSDAT ของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 50Hz



รูปที่ 4.26 แสดงเส้นโค้ง ฮิสเตอร์รีซิส ที่ได้จากโปรแกรมย่อย HYSDAT ของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 50Hz

#### 4.10 การใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น Type-96 pseudo non-linear hysteristic inductor

ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น Type-96 pseudo non-linear hysteristic inductor เป็นส่วนประกอบที่ต่อขนานอยู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง สามารถกำหนดคุณลักษณะทางด้านการอิ่มตัวในแกนเหล็ก, ฮีสเตอร์รีซิส และเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (remanence flux) ในการใช้งาน จะต้องป้อนข้อมูล  $\lambda$ -Ipeak คือ Attributes และ Characteristic

Attributes ส่วนนี้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นเช่นการตั้งชื่อ, ชื่อจุดต่อ ที่สำคัญคือค่า  $\lambda$ -Ipeak ในสภาวะอยู่ตัว (steady-state) ในรูปที่ 4.27 ช่อง CURR จะต้องป้อนกระแสในสภาวะอยู่ตัว แต่สามารถป้อน 8888 เพื่อให้ตัวโปรแกรมคำนวณค่า  $\lambda$ -Ipeak สภาวะอยู่ตัวเองได้

Component: NLIND96

Attributes | Characteristic

DATA	VALUE
CURR	8888
FLUX	0
RESID	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	
To	1	

Group No: 0 Label: \_\_\_\_\_

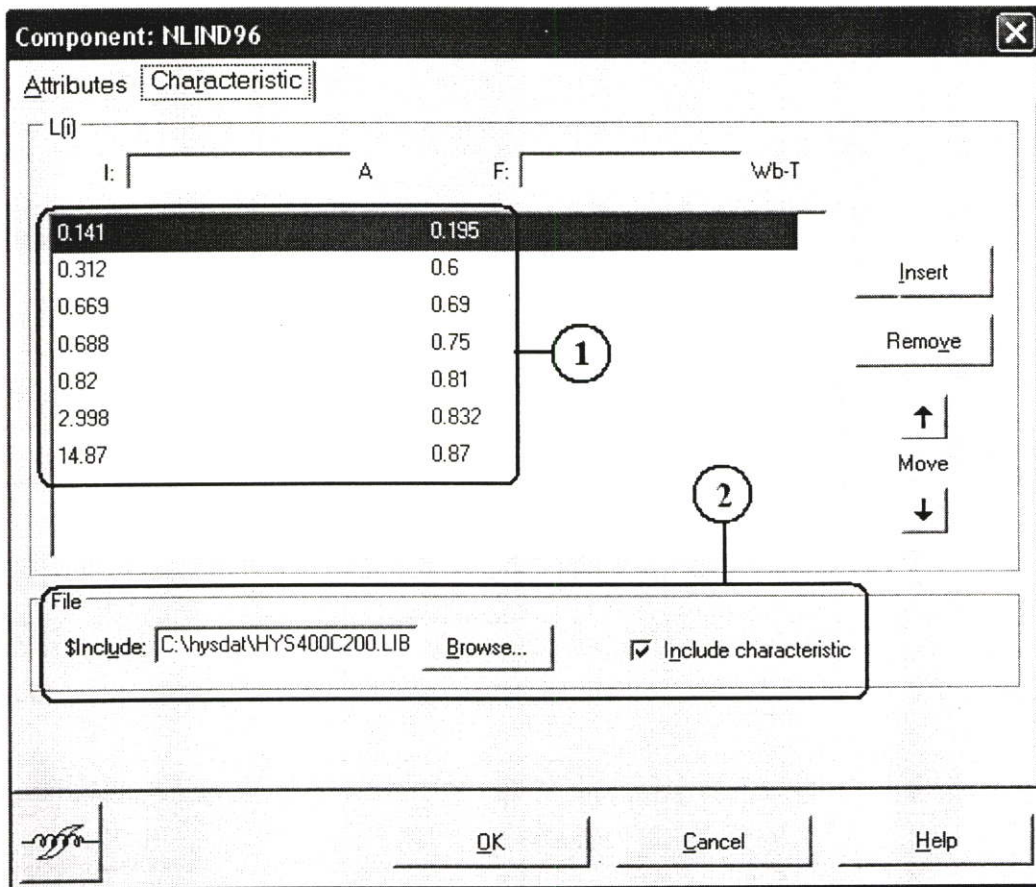
Comment: \_\_\_\_\_

Output: None  Hide  Lock

OK Cancel Help

รูปที่ 4.27 แสดงตัวอย่างการป้อน Attributes ของตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น Type-96 pseudo non-linear hysteristic inductor Card : BRANCH

Characteristic คือส่วนที่ต้องป้อนข้อมูล  $\lambda$ - Ipeak ที่ได้มาจากโปรแกรมย่อย SATURA และ HYSDAT เพื่อให้แสดงคุณลักษณะการอิ่มตัวในแกนเหล็ก (Saturation) และฮิสเตอร์รีซิส



รูปที่ 4.28 แสดงตัวอย่างการป้อน Characteristic ของตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น  
Type-96 pseudo non-linear hysteristic inductor Card : BRANCH

จากรูปที่ 4.28 แสดงตัวอย่างการป้อนข้อมูลให้กับ Type-96 pseudo non-linear hysteristic inductor ในส่วนที่เป็น Characteristic ในส่วนที่ 1 คือ ข้อมูล  $\lambda$ - Ipeak ที่แสดงคุณลักษณะของการอิ่มตัวในแกนเหล็ก ที่ได้มาจากโปรแกรมย่อย SATURA ในส่วนที่ 2 คือข้อมูล  $\lambda$ - Ipeak ที่แสดงคุณลักษณะด้าน ฮิสเตอร์รีซิส ที่ได้มาจากโปรแกรมย่อย HYSDAT ในส่วนนี้จะป้อนลักษณะการดึงไฟล์มาร่วม ไม่ต้องพิมพ์ข้อมูลที่ละข้อมูลเหมือนกับส่วนที่ 1

Component: AC1PH

Attributes

DATA	VALUE
U/I	0
Amp.	1292
f	50
Pha	-90
A1	0
TSta	-1
TSto	0.5

NODE	PHASE	NAME
AC	1	

Group No: 0 Label: U

Comment:

Hide  
 Lock

⏏ OK Cancel Help

รูปที่ 4.29 แสดงตัวอย่างการป้อนข้อมูลกระแส ซึ่งเป็น Card : SOURCE

Component: RLC

Attributes

DATA	VALUE
R	0.066
L	0.992
C	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	
To	1	

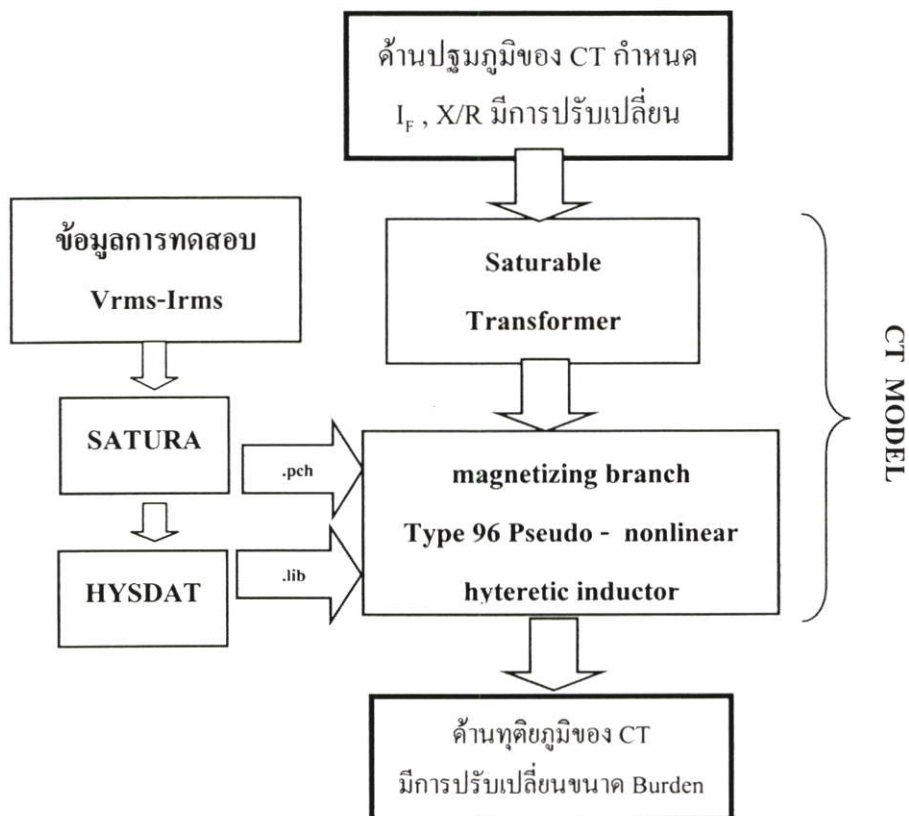
Group No: 0 Label: Z system

Comment:

Output: None  Hide  
 Lock  
 \$Vintage.1

⏏ RLC OK Cancel Help

รูปที่ 4.30 แสดงตัวอย่างการป้อนข้อมูล RLC ซึ่งเป็น Card : BRANCH



รูปที่ 4.31 แผนผังแสดง โครงสร้างของแบบจำลอง

## บทที่ 5

### การทดสอบรีเลย์ผลต่าง

การทดสอบรีเลย์ป้องกันจัดเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในระบบป้องกัน เพื่อให้ทราบว่ารหัสป้องกันยังพร้อมที่จะทำงาน การนำโปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transients Program) มาใช้เพื่อการวิเคราะห์หาสมรรถนะการทำงานของหม้อแปลงกระแสและรีเลย์ ในสถานะทรานเซียนต์ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะเริ่มจะนิยมใช้กันในกลุ่มของวิศวกรที่ทำงานเกี่ยวข้องกับรีเลย์ระบบป้องกัน โดยสามารถนำข้อมูลของกระแสที่ได้จากการจำลอง (simulate) ด้วยโปรแกรม EMTP นำไปทำการทดสอบรีเลย์โดยการป้อนข้อมูลให้กับเครื่องทดสอบรีเลย์ ซึ่งมีความสามารถในการแปลงข้อมูลจากโปรแกรม EMTP เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก สร้างสัญญาณกระแสให้มีรูปร่างเหมือนกับรูปร่างของกระแสที่ได้จากการจำลอง จะทำให้การศึกษาหรือการตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ในสถานะการเปลี่ยนแปลงชั่วคราว หรือสถานะทรานเซียนต์ ซึ่งสามารถทำให้สะดวกมากยิ่งขึ้น สามารถลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบ โดยไม่จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองย่อส่วนระบบไฟฟ้า

การทดสอบรีเลย์สามารถแบ่งได้เป็น 5 ลักษณะคือ การในสถานะคงตัว (steady-state test) , การทดสอบในสถานะไดนามิก (dynamic-state test), การทดสอบด้วยการจำลองสถานะทรานเซียนต์ (transient simulation test), การทดสอบความสมบูรณ์ (integrity test) และการทดสอบความเหมาะสมในการใช้งาน (application test)

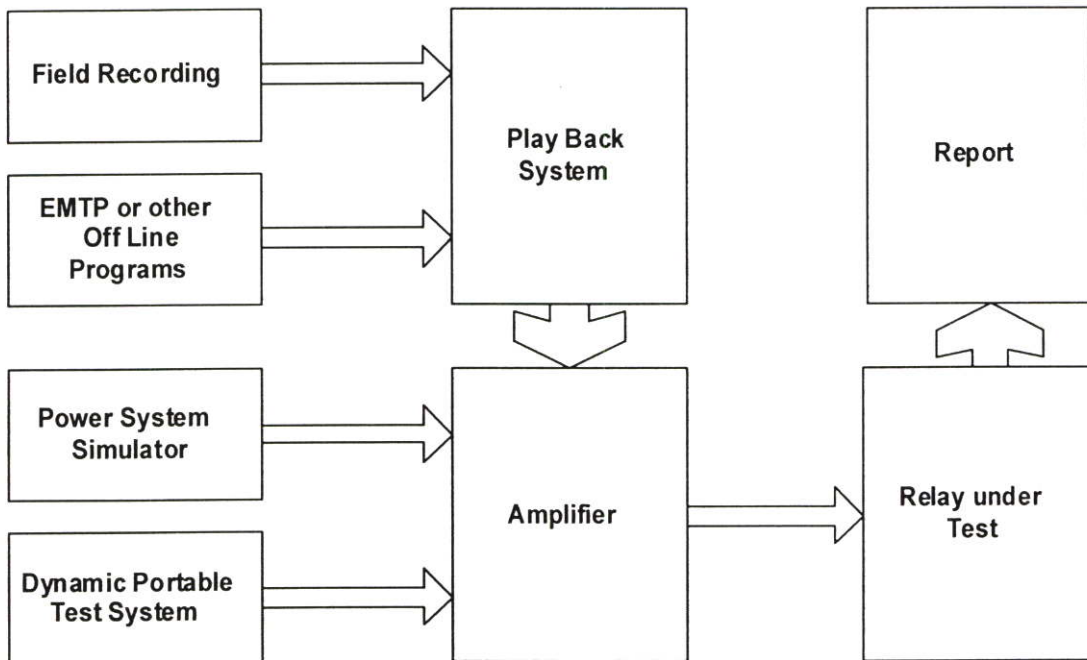
การจำลองสถานะทรานเซียนต์ (transient simulation) ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบการทำงานของรีเลย์ป้องกันสามารถแบ่งออกมาได้ 3 วิธีคือ

#### 1. การจำลองแบบอนาล็อก (analog simulator หรือ Model Power System : MPS)

เป็นการจำลองขนาดย่อส่วนของระบบไฟฟ้าที่ต้องการจะศึกษา กำหนดชนิดและตำแหน่งของฟอลต์ มีวงจรขยายสัญญาณเพื่อปรับขนาดสัญญาณให้มีความเหมาะสมกับรีเลย์ที่จะทำการทดสอบ การทดสอบด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และต้องการพื้นที่ ส่วนมากการจำลองด้วยวิธีนี้จะถูกใช้โดยการไฟฟ้าขนาดใหญ่ บริษัทผู้ผลิต หรืองานวิจัยในห้องปฏิบัติการ

2. การจำลองแบบดิจิทัลในลักษณะเวลาจริง (real time digital simulator) เป็นการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม เช่น EMTP ทำการประมวลผลเพื่อแก้สมการสมรรถนะของระบบ (system performance equation) ในแต่ละรอบของการคำนวณจะมีการเพิ่มเวลาเป็นไมโครวินาที มีการสร้างสัญญาณผ่านวงจรขยายเพื่อปรับขนาดของสัญญาณให้มีความเหมาะสมก่อนที่จะป้อนเข้ารีเลย์ เพื่อทำการทดสอบในขั้นต่อไป

3. การจำลองโดยใช้ข้อมูลดิจิทัลที่ได้บันทึกไว้ (playback digital simulator) เป็นการจำลองโดยใช้ข้อมูลที่เก็บบันทึกไว้ในอุปกรณ์ดิจิทัล เช่น เครื่องบันทึกความผิดปกติ (fault recorder) หรือให้ข้อมูลตัวเลข (numerical) ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP นำมาแปลงให้เป็นสัญญาณแอนะล็อกด้วยเครื่องทดสอบบริเลย์ โดยสัญญาณที่ได้จะต้องถูกนำไปขยายเพื่อให้ได้ขนาดที่มีความเหมาะสม ก่อนที่จะนำไปป้อนเข้ารีเลย์ เพื่อทำการทดสอบต่อไป รูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงภาพรวมของการทดสอบรีเลย์ด้วยวิธีต่าง ๆ [12-15]

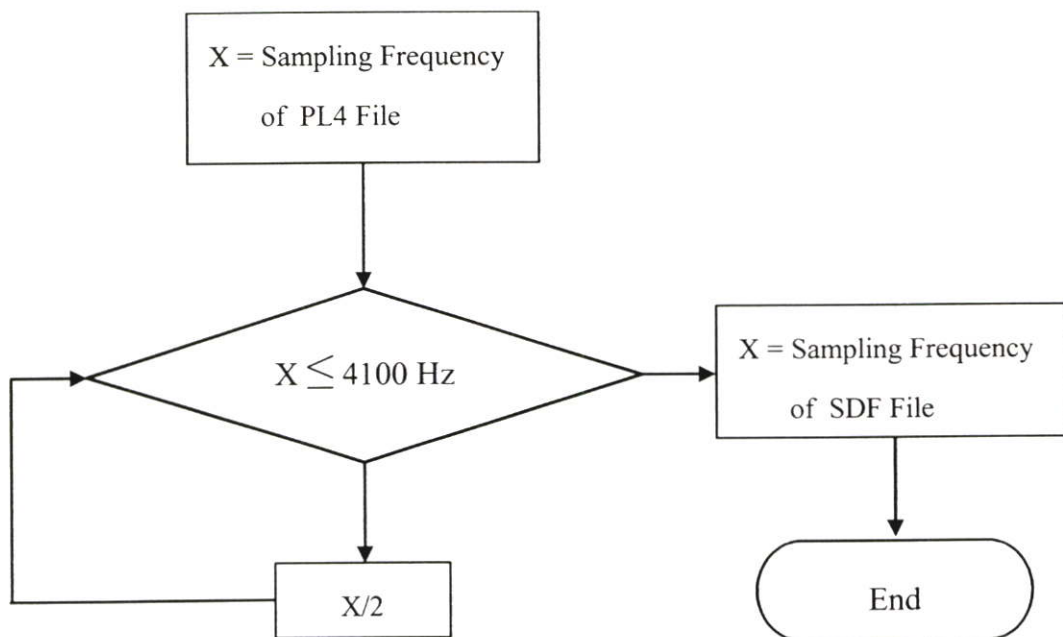


รูปที่ 5.1 แผนผังการทดสอบรีเลย์ป้องกันด้วยวิธีต่าง ๆ

ไฟล์เข้าที่พูดที่ได้มาจากแบบจำลองที่ใช้โปรแกรม ATP-EMTP จะมีนามสกุลเป็น .PL4 จะไม่สามารถนำไปใช้กับเครื่องทดสอบรีเลย์ได้โดยตรง จะต้องทำการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้งานกับเครื่องทดสอบ Programma รุ่น Freja-300 ได้ซึ่งจะต้องมีนามสกุลเป็น .SDF (Simple Data File) โดยใช้โปรแกรม Freja Sim300 Disturbance Simulator Version 2.15

จากการศึกษาการใช้โปรแกรม Freja Sim300 พบว่าการที่จำไฟล์เข้าที่พุดจากโปรแกรม EMTP-ATP ซึ่งมีนามสกุลเป็น .PL4 ไปแปลงให้เป็นไฟล์นามสกุล .SDF เพื่อนำไปใช้กับเครื่องทดสอบรีเลย์นั้นมีเงื่อนไขหลักอยู่ 2 ประการ คือ

- ไฟล์ .PL4 มี 3 ชนิดคือ FORMATTED, UNFORMATED และ C-like ชนิดที่สามารถนำไปใช้กับโปรแกรม Freja Sim300 ได้คือ FORMATTED ซึ่งรูปแบบเป็น ASCII File โดยการกำหนดชนิดของไฟล์ .PL4 จะต้องทำใน Startup File ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก.
- การตั้งค่าความถี่ในการสุ่ม (Simpling Frequency) ในโปรแกรม ATP -EMTP จะต้องมีความสัมพันธ์กับข้อจำกัดของโปรแกรม Freja Sim300 ซึ่งสามารถรองรับความถี่ในการสุ่มได้ไม่เกิน 4,100 Hz ดังรูปที่ 5.2

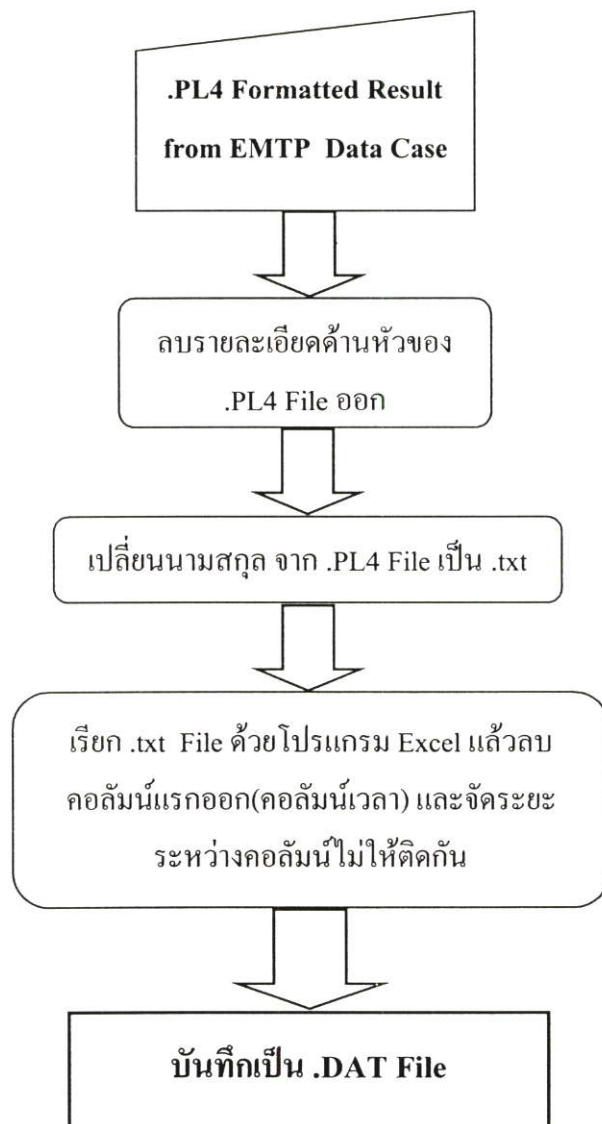


รูปที่ 5.2 แผนผังการปรับความถี่ในการสุ่ม (Sampling Frequency) ที่จะนำไปใช้กับโปรแกรม Freja Sim300 Disturbance Simulator

### 5.1. ในการเตรียมไฟล์ .PL4 เพื่อนำไปใช้กับโปรแกรม Freja Sim300

การเตรียมไฟล์ .PL4 นั้นจะต้องเริ่มด้วยการลบรายละเอียดส่วนหัวของไฟล์ออกเสียก่อน เพราะเป็นข้อมูลที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทดสอบ แล้วทำการเปลี่ยนนามสกุลจากไฟล์ .PL4 ให้เป็น .txt เพื่อให้สามารถเรียกไฟล์ .txt ขึ้นมาด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อทำการลบคอลัมน์แรกออกซึ่งเป็นคอลัมน์เวลาและจัดระยะห่างระหว่างคอลัมน์ไม่ให้ติดกัน และ

บันทึกเป็นนามสกุล .DAT ซึ่งมีรูปแบบเป็น ASCII File พร้อมสำหรับนำไปใช้กับโปรแกรม Freja Sim300 เพื่อแปลงเป็นไฟล์ .SDF ที่สามารถนำไปใช้กับเครื่องทดสอบรีเลย์ได้



รูปที่ 5.3 แสดงขั้นตอนการเตรียมไฟล์ .PL4 เพื่อนำไปใช้กับโปรแกรม Freja Sim300

```

A154.pl4 - Notepad
File Edit Format View Help
03-Jun-05 14.03.30 16 0 6 25 0 50E8.2
PHASOR LINO01 LINO02 LINO03 LINO04 LINO05 LINO06 LINO07 LINO08 LINO09
LINO10 LINO11 LINO12 LINO13 LINO14 LINO15 NLNO01 SWTO01 SWTO02 SWTO03 SWTO04
SWTO05 TACS MODELS
XX0035 XX0030 TX0003 XX0033 XX0023 XX0016 TX0002 XX0014 XX0021 XX0008
XX0003 TX0001 XX0001 XX0006 XX0032

12 11 7 6 3 2
0.0 0.0 0.0 -45.33
.243E-3 .13209 .132775 -44.853
.486E-3 .525223 .529319 -44.114
.729E-3 1.1724 1.18531 -43.118
.972E-3 2.06522 2.09492 -41.872
.001215 3.19389 3.25088 -40.381
.001458 4.54734 4.64449 -38.656
.001701 6.11321 6.26568 -36.705
.001944 7.93154 8.10306 -34.541
.002187 9.92286 10.144 -32.176
.00243 12.0924 12.3747 -29.623
.002673 14.4243 14.7803 -26.898

```

รูปที่ 5.4 ตัวอย่างไฟล์ .PL4 ที่ได้มาจากแบบจำลองที่ใช้โปรแกรม ATP - EMTP ที่มี Probe Current 1 Phases 3 จุด

## 5.2 การใช้งานโปรแกรม Freja Sim300

1. เริ่มต้นด้วยการพิมพ์คำสั่ง Edit ใน DOS เพื่อเข้าไปตรวจสอบไฟล์ .DAT อีกครั้ง ต้องตรวจสอบให้แต่ละคอลัมน์ตรงกัน และคอลัมน์แรกห้ามขีดของด้านซ้ายแล้วทำการบันทึกซ้ำอีกครั้ง

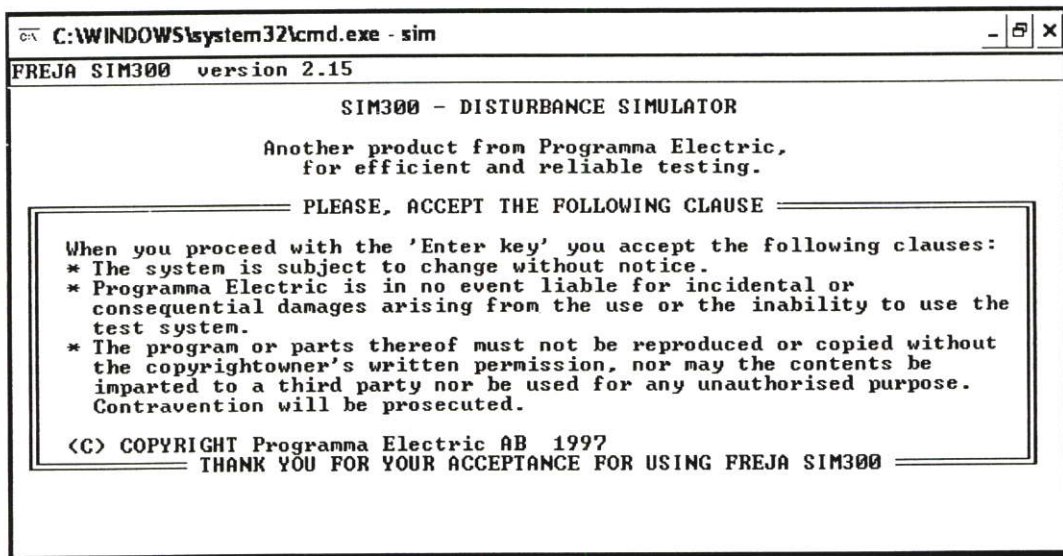
```

C:\WINDOWS\system32\cmd.
File Edit Search View Options Help
C:\DATA2000\A158.dat
0 0 -45.33
0.133565 0.133758 -44.85
0.532072 0.533226 -44.108
1.19038 1.19402 -43.106
2.10186 2.11026 -41.851
3.25841 3.27454 -40.352
4.6505 4.67806 -38.615
6.26728 6.3106 -36.652
8.09656 8.16063 -34.474
10.145 10.2153 -32.094
12.373 12.4608 -29.525
14.773 14.8818 -26.784
17.3287 17.4623 -23.885
20.0228 20.1853 -20.846
22.8372 23.0329 -17.685
25.7848 25.9866 -14.421
28.8027 29.0272 -11.072
31.8852 32.1349 -7.6577
35.0124 35.2899 -4.199
38.187 38.4717 -0.71567
41.3649 41.6598 2.77171

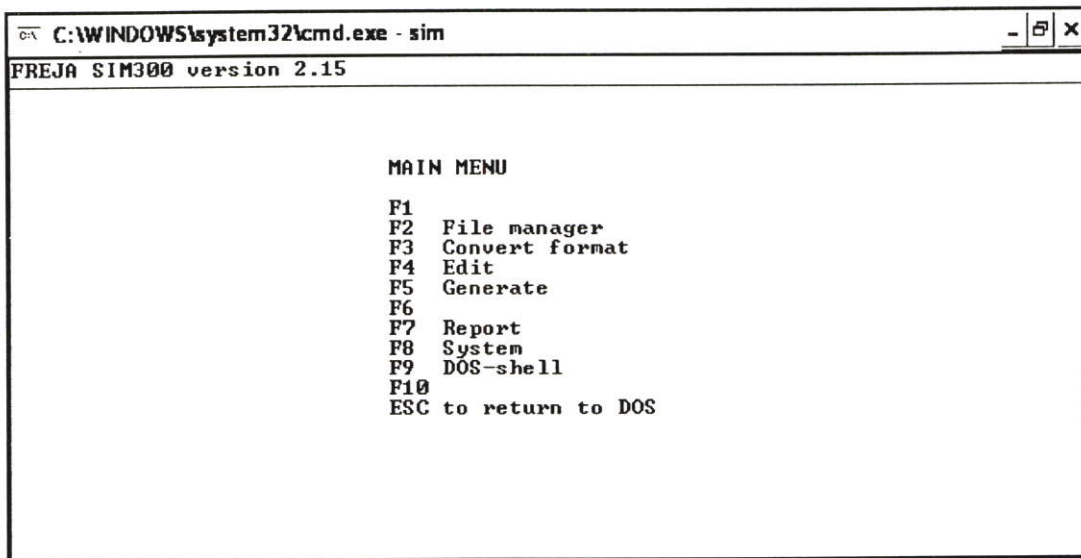
```

รูปที่ 5.5 แสดงไฟล์ .DAT ที่พร้อมสำหรับการแปลงเป็นไฟล์ .SDF

## 2. เปิดโปรแกรม Freja Sim300 ใน DOS ด้วยการพิมพ์ CD Sim และ Sim



รูปที่ 5.6 ข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิต



รูปที่ 5.7 เมนูหลักของโปรแกรม Freja Sim300

3. กด F2 File Manager จากเมนูหลัก
4. เลือก F1/Add จากหน้า File Manager เพื่อเพิ่มไฟล์ .DAT เข้ามาในโปรแกรม Freja Sim300

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe - sim				
FREJA SIM300 File Manager		Operate		
Directory: C:\SIM\FM\ File type: DAT List order: Filename				
Filename	Source		Date/Time	
A154		DATA2000	2005- 6- 5	11:59:34.29
A158		DATA2000	2005- 6- 5	12:18:16.36
A254		DATA2000	2005- 6- 5	12:21:49.36
A258		DATA2000	2005- 6- 5	13:16:16.22
A354		DATA2000	2005- 6- 5	13:17:28.83
A358		DATA2000	2005- 6- 5	13:19:20.72
A454		DATA2000	2005- 6- 5	13:20:43.93
A458		DATA2000	2005- 6- 5	13:21:47.31
B152		DATB400	2005- 6- 5	13:23: 2.45
B158		DATB400	2005- 6- 5	13:34:10.67
B252		DATB400	2005- 6- 5	13:35:36.91
B258		DATB400	2005- 6- 5	13:36:44.47
B352		DATB400	2005- 6- 5	13:37:42.85
B358		DATB400	2005- 6- 5	13:39:54.67
SOURCE: C:				
F1/Add	F3/Move (all)	F5/File type	F7/List order	F9/DOS-shell
F2/Remove	F4/Copy (all)	F6/Directory	F8/Rename	F10/Exit S

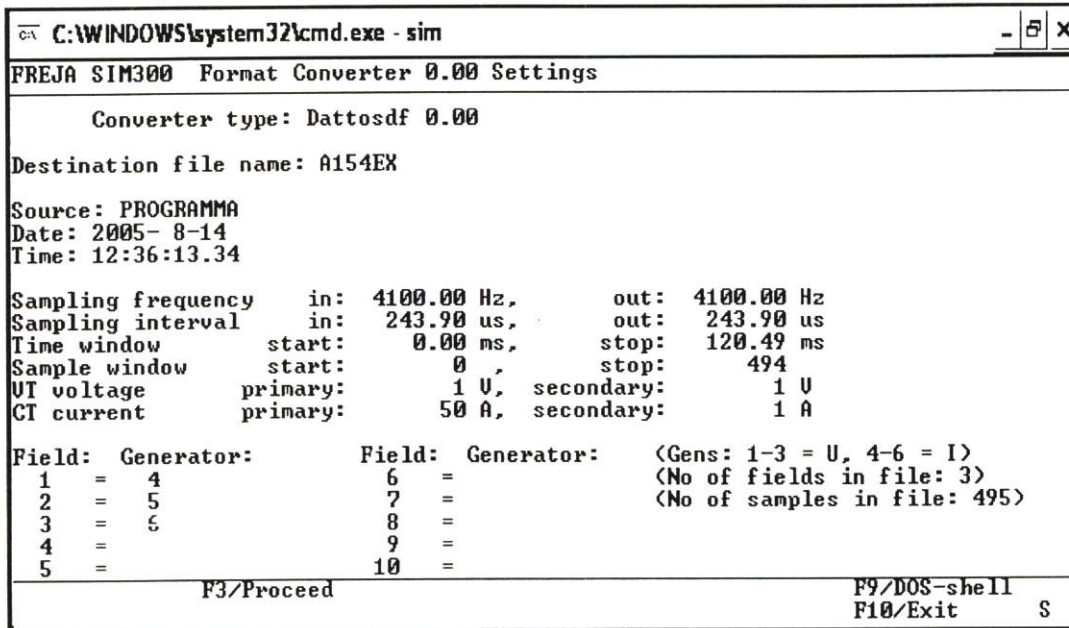
รูปที่ 5.8 การเพิ่มไฟล์ .DAT

- เลือก F10/Exit เพื่อกลับสู่เมนูหลัก
- กด F3 Convert Format จากหน้าเมนูหลักโดยการเลือกรูปแบบเป็น DATTOSDF ดังรูปที่ 5.9

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe - sim			
FREJA SIM300 Convert Format 2.15		Select converter	
Converter	Comment		Work on ext
COMTOSDF		COMTRADE TO SDF CONVERTER	DAT
IPAC		TISPAC TO SDF CONVERTER	IPC
EMPTY		EMPTY TO SDF CONVERTER	SDF
RESTOSDF		RES TO SDF CONVERTER	RES
TOTISPAC		SDF TO TISPAC CONVERTER	SDF
REOR		REOR TO SDF CONVERTER	REO
SDF2ODAT		SDF TO STANDARD MATRIX CONVERTER	SDF
DATTOSDF		STANDARD MATRIX TO SDF CONVERTER	DAT
EMTP		EMTP (UAX FORMAT) TO SDF CONVERTER	PL4
EMTP3		EMTP PC FORMAI TO SDF CONVERTER	PL4
IDAC		INDUCTIC 65C (ABB) TO SDF CONVERTER	I65
F1/Add F3/Proceed F8/Rename F9/DOS-shell			
F2/Remove F10/Exit S			

รูปที่ 5.9 เมนูเลือกรูปแบบในการแปลงไฟล์

7. เลือกไฟล์ .DAT ที่ต้องการที่จะแปลง แล้วป้อนข้อมูล เช่น File name, Sampling frequency และการกำหนดช่องสัญญาณที่จะส่งไปทดสอบได้เลย



รูปที่ 5.10 การตั้งค่าเพื่อแปลงไฟล์ .DAT เป็น .SDF

จากรูปที่ 5.10 สิ่งที่จะต้องป้อน file name เพื่อตั้งชื่อ .SDF แล้วป้อนค่า Sampling frequency in: ซึ่งจะต้องตรงกับค่าที่ใช้ในโปรแกรม ATPDraw ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ค่า 4100 Hz เพื่อให้ตรงกับความถี่ของโปรแกรม Freja Sim300 ดังรูปที่ 5.2 ในส่วนของ CT current จะเป็นส่วนช่วยในการลดทอนขนาดของกระแส ให้เป็นไปตามเงื่อนไขของเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja 300 ซึ่งจ่ายกระแสได้ไม่เกินชั่วละ 15 A ถ้าหากต้องการใช้มากกว่านี้ ก็ทำได้โดยการขนานทั้ง 3 ชั่วรวมกัน จะทำให้สามารถจ่ายกระแสได้ถึง 45 A แต่จะไม่สามารถนำไปใช้กับการทดสอบรีเลย์ผลต่าง ซึ่งจะต้องใช้กระแสจากเครื่องทดสอบรีเลย์ 2 ชั่ว เพื่อทำการเปรียบเทียบกระแส และส่วนของ Generator จะต้องระบุ 4, 5, 6 เพราะต้องการข้อมูลในส่วนที่เป็นกระแสไปใช้งานเท่านั้น

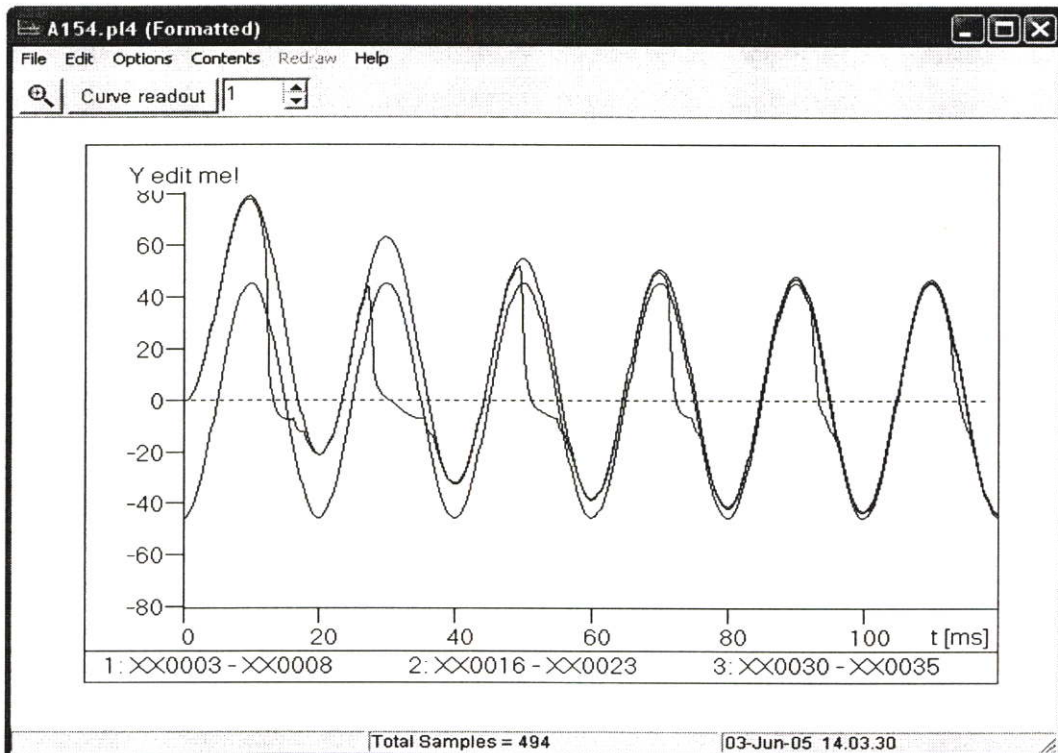
8. เลือก F3/Proceed เพื่อดำเนินการแปลงไฟล์ .DAT เป็น .SDF

**A454.SDF - Notepad**

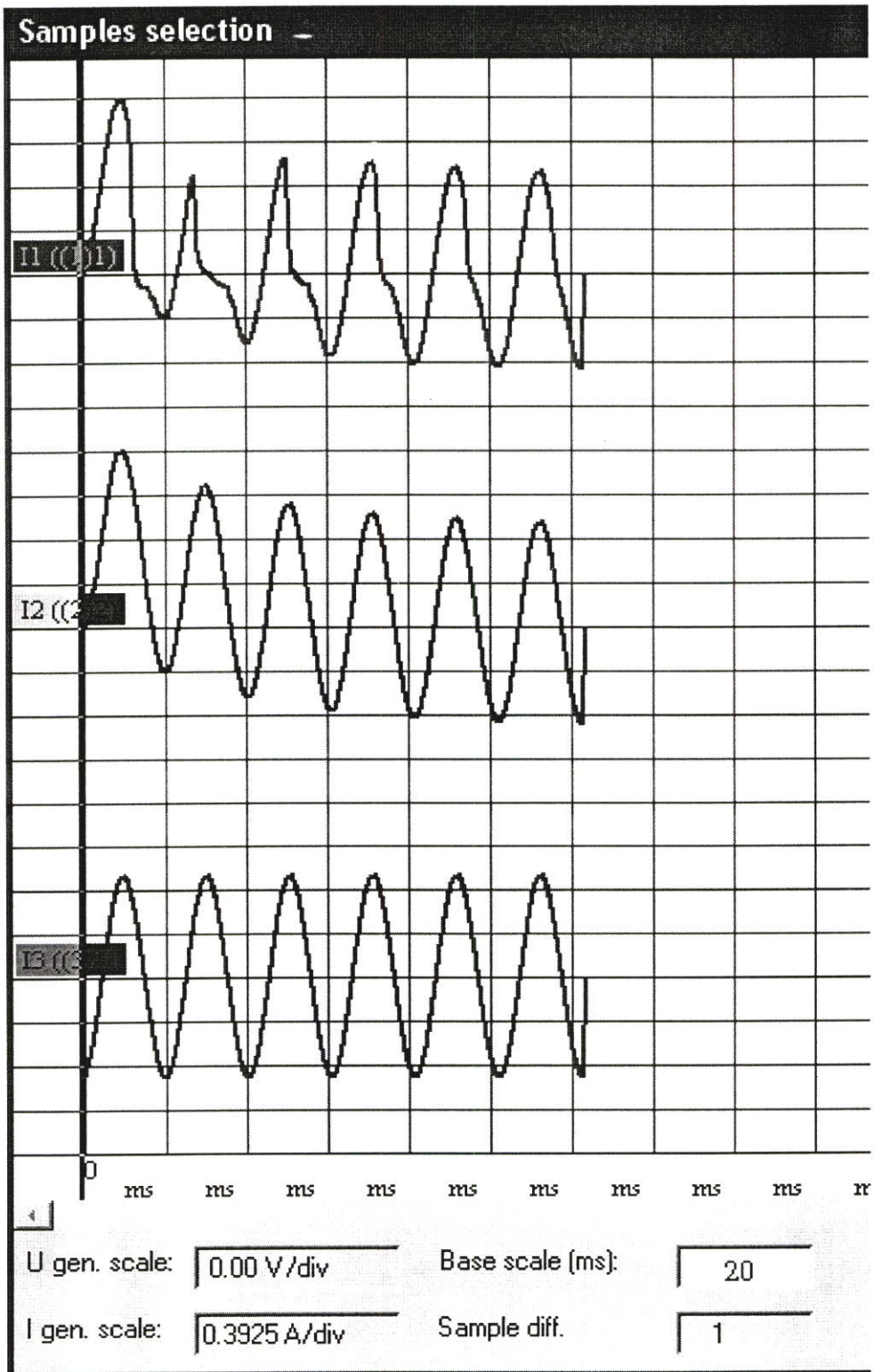
File Edit Format View Help

1:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.91
2:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.90
3:	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	-0.88
4:	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	-0.86
5:	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	-0.84
6:	0.00	0.00	0.00	0.05	0.07	-0.81
7:	0.00	0.00	0.00	0.08	0.09	-0.77
8:	0.00	0.00	0.00	0.11	0.13	-0.73
9:	0.00	0.00	0.00	0.15	0.16	-0.69
10:	0.00	0.00	0.00	0.19	0.20	-0.64
11:	0.00	0.00	0.00	0.23	0.25	-0.59
12:	0.00	0.00	0.00	0.28	0.30	-0.54
13:	0.00	0.00	0.00	0.33	0.35	-0.48
14:	0.00	0.00	0.00	0.38	0.40	-0.42
15:	0.00	0.00	0.00	0.44	0.46	-0.35
16:	0.00	0.00	0.00	0.50	0.52	-0.29
17:	0.00	0.00	0.00	0.56	0.58	-0.22
18:	0.00	0.00	0.00	0.61	0.64	-0.15
19:	0.00	0.00	0.00	0.66	0.71	-0.08
20:	0.00	0.00	0.00	0.70	0.77	-0.01

รูปที่ 5.11 แสดงลักษณะของไฟล์ .SDF ที่ได้จากการ โปรแกรม Freja Sim300



รูปที่ 5.12 แสดงรูปคลื่นไฟล์ .PL4 ก่อนการแปลงเป็นไฟล์ .SDF



รูปที่ 5.13 แสดงรูปคลื่นที่ได้มาจากการแปลงไฟล์ .SDF

จากรูปที่ 5.11 ลักษณะของไฟล์ .SDF จะมีทั้งหมด 6 คอลัมน์ ซึ่งจะอ้างอิงตามขั้วของเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 คอลัมน์ 1-3 จะเป็นข้อมูลของแรงดัน ส่วนคอลัมน์ 4-6 จะเป็นข้อมูลของกระแส จากแบบจำลองที่ใช้โปรแกรม ATPDraw ที่มี Probe Current 1 Phases 3 จุด

คอลัมน์ที่ 1 คือขั้ว L1U ของเครื่องทดสอบ เป็นขั้วแรงดัน ไม่ได้ใช้งาน

คอลัมน์ที่ 2 คือขั้ว L2U ของเครื่องทดสอบ เป็นขั้วแรงดัน ไม่ได้ใช้งาน

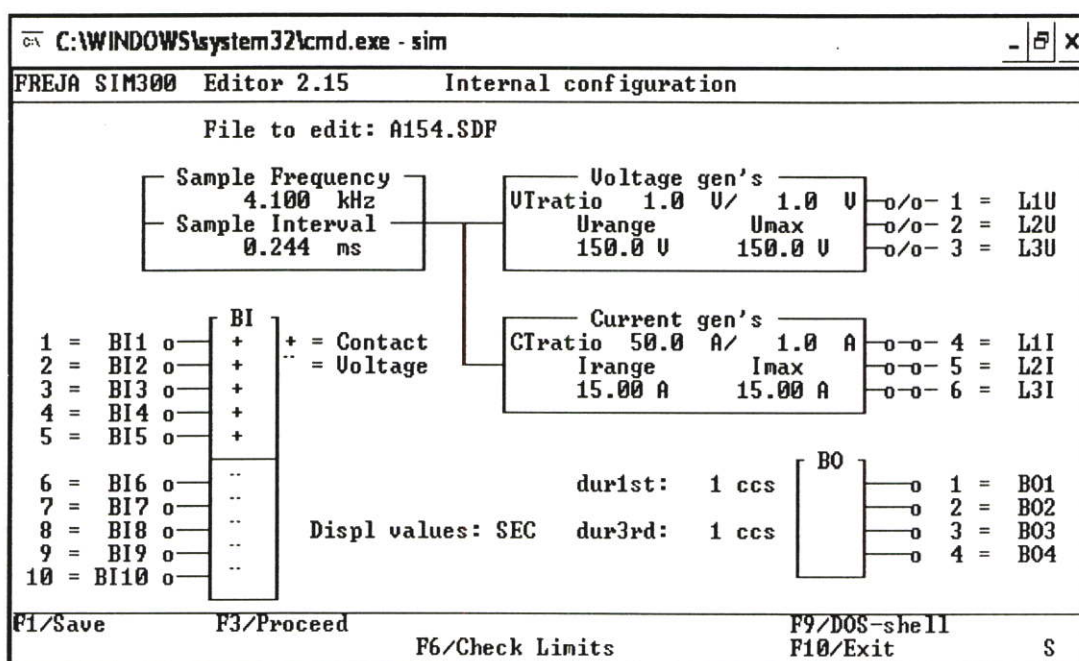
คอลัมน์ที่ 3 คือขั้ว L3U ของเครื่องทดสอบ เป็นขั้วแรงดัน ไม่ได้ใช้งาน

คอลัมน์ที่ 4 คือขั้ว L1I ของเครื่องทดสอบ เป็นรูปกระแสทรานเซียนต์ มีการอิมิต์ที่ห้มอแปลงกระแส

คอลัมน์ที่ 5 คือขั้ว L2I ของเครื่องทดสอบ เป็นรูปกระแสทรานเซียนต์ ไม่มีการอิมิต์ที่ห้มอแปลงกระแส

คอลัมน์ที่ 6 คือขั้ว L3I ของเครื่องทดสอบ เป็นรูปกระแสในสภาวะอยู่ตัว

9. กด F4 Edit จากหน้าเมนูหลัก เพื่อแก้ไของค์ประกอบภายในของไฟล์ .SDF เพื่อให้สัมพันธ์กับการนำไปใช้ทดสอบ รีเลย์ เช่น Current gen's จะต้องกดเครื่องหมาย (+) หรือ (-) บนคีย์บอร์ดในการเปลี่ยนตำแหน่งสวิทช์เพื่อระบุว่าจะให้มีสัญญาณออกที่ขั้วใดบ้าง การกำหนด CTratio จะต้องระบุ Irang=15A Imax=15A ซึ่งเป็นพิกัดกระแสสูงสุด, BI(Contact)จะต้องระบุเครื่องหมาย + เพื่อให้ขั้ว Binary inputs เครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 ทำหน้าที่เป็น Contact รับสัญญาณจากรีเลย์ป้องกันเพื่อนำไปแสดงผลเวลาในการทำงานของรีเลย์



รูปที่ 5.14 แสดงการแก้ไของค์ประกอบภายในของไฟล์ .SDF

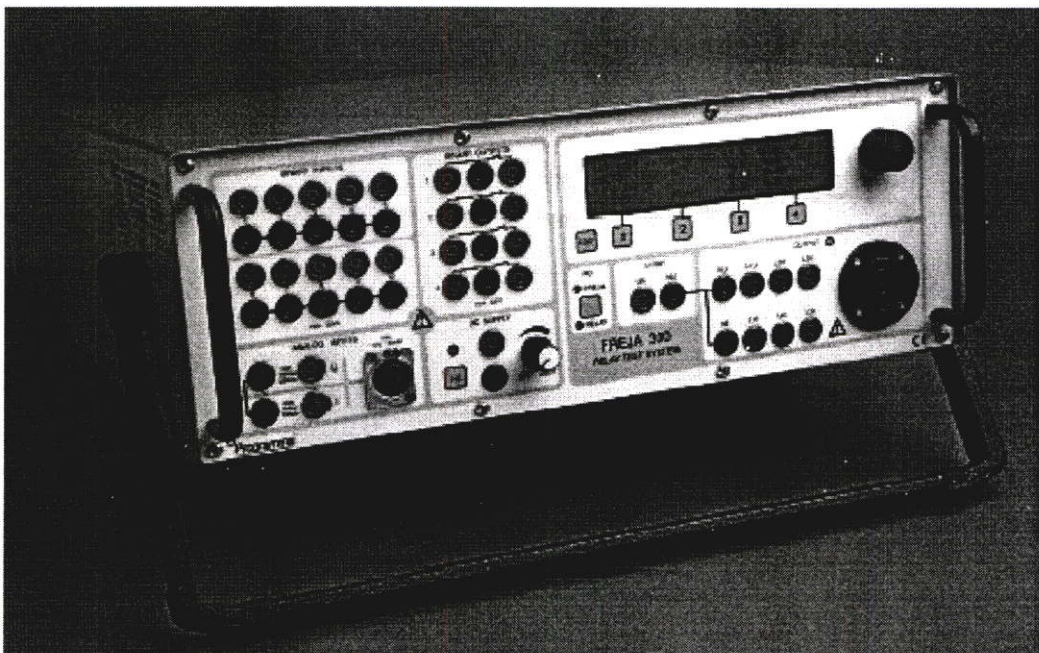
10. เลือก F1/ Save เพื่อบันทึกข้อมูล
11. เลือก F3/ Proceed เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของลักษณะรูปคลื่น
11. กด F5 Generate จากหน้าเมนูหลัก เพื่อเข้าสู่หน้าเมนู Generate โปรแกรม FrejaSim300 จะทำการตรวจสอบความพร้อมในการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องทดสอบรีเลย์
12. กด F1 จากหน้าเมนู Generate เพื่อส่งไฟล์ .SDF ไปยังเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja 300 เพื่อทำการแปลง สัญญาณดิจิทัล เป็นอนาล็อก แล้วส่งไปทดสอบรีเลย์

การ กด F1 เพื่อ Generate เป็นการส่งสัญญาณที่เครื่องทดสอบรีเลย์สร้างได้ออกทางเข้าพุตตามขั้วที่เรากำหนดไว้ ส่งไปทดสอบรีเลย์ผลต่าง ก่อน กด F1 จะต้องตรวจสอบการเชื่อมต่อให้ถูกต้อง ดังรูปที่ 5.15

### 5.3 การต่ออุปกรณ์ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบรีเลย์มีดังนี้

1. คอมพิวเตอร์
2. เครื่องทดสอบ Programma รุ่น Freja 300
3. รีเลย์ผลต่าง SEL-587
4. สายที่ใช้ในการเชื่อมต่อ



รูปที่ 5.15 เครื่องทดสอบรีเลย์ FREJA 300



## บทที่ 6

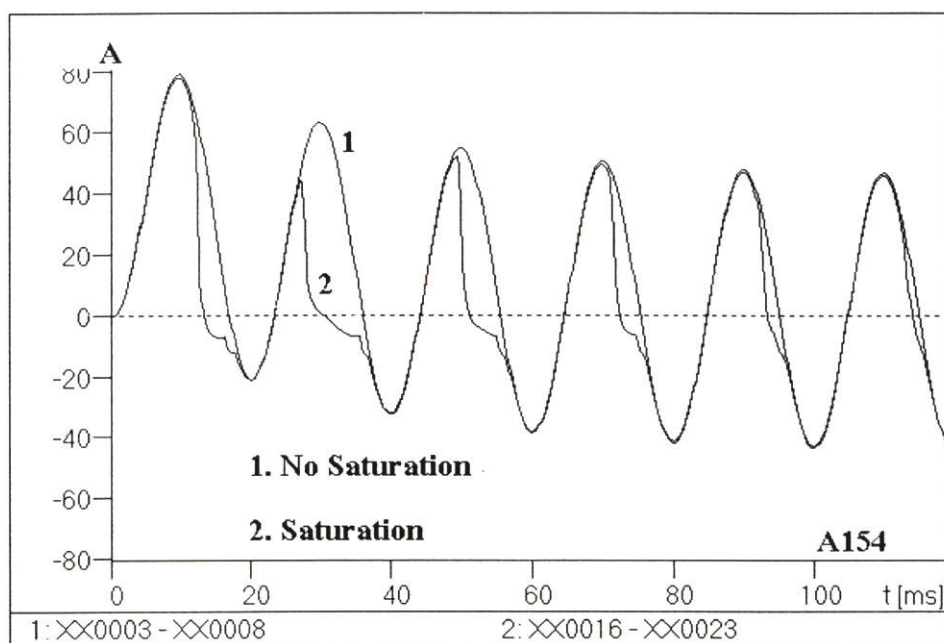
### ผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองของวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งสามารถแยกได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นผลจากแบบจำลองหม้อแปลงกระแสและระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ส่วนที่ 2 จะเป็นผลจากการใช้ไฟล์ .PL4 ที่ได้จากการทดลองใช้กับเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja 300 เพื่อทดสอบรีเลย์ผลต่าง SEL -587

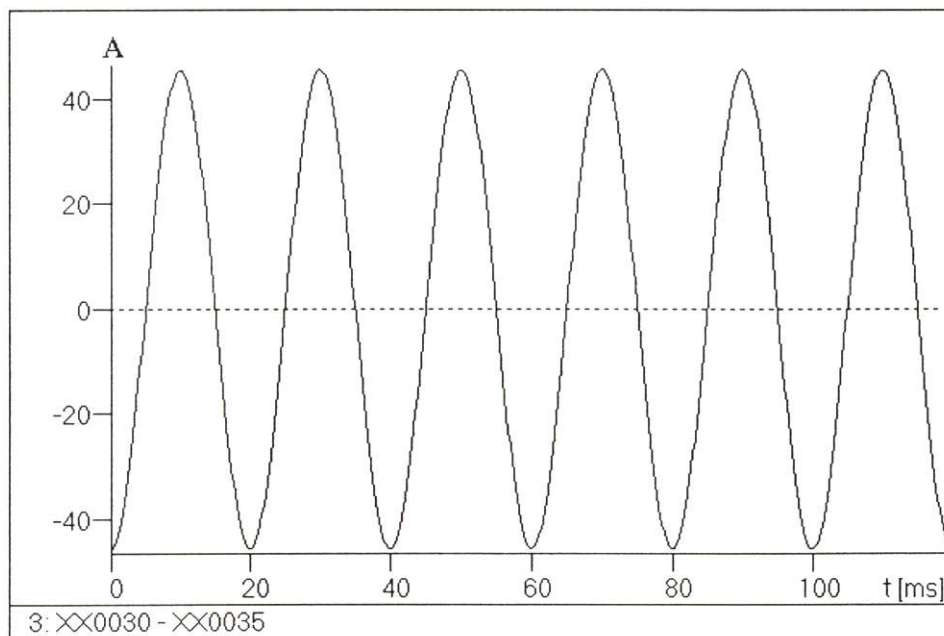
#### 6.1 ผลจากแบบจำลองหม้อแปลงกระแส และระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP

การจำลองสภาวะทรานเซียนต์ของหม้อแปลงกระแสด้วยโปรแกรม EMTP จะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมและการตอบสนองของหม้อแปลงกระแสในขณะหม้อแปลงกระแสต่ออยู่ในระบบ ที่มีปัจจัยที่จะทำให้เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็กแตกต่างกัน เช่น อัตราส่วน X/R ของระบบขณะเกิดลัดวงจรยังมีค่ามาก จะยังทำให้การอิ่มตัวเกิดขึ้นสูงและมีความรุนแรง ขนาดของค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ของเบอร์เดนจะมีผลต่อลักษณะรูปร่างของรูปคลื่นกระแสที่ผิดเพี้ยน ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 1 จะเกิดขึ้นทั้งด้านบวกและลบลักษณะของกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนในกรณีที่เบอร์เดนมีค่า PF เท่ากับ 0.5 จะเกิดขึ้นทางด้านบวกและการลดลงของกระแสมีลักษณะของการประวิงเวลา และการนำหม้อแปลงกระแสที่ระบุค่า accuracy class ต่างกันมาเปรียบเทียบกันก็จะทำให้เห็นชัดเจนว่าหม้อแปลงกระแสที่ระบุค่า accuracy class สูงกว่า เมื่อเกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็กความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นจะเกิดขึ้นน้อยและช้ากว่าหม้อแปลงกระแสที่ระบุค่า accuracy class ต่ำกว่า

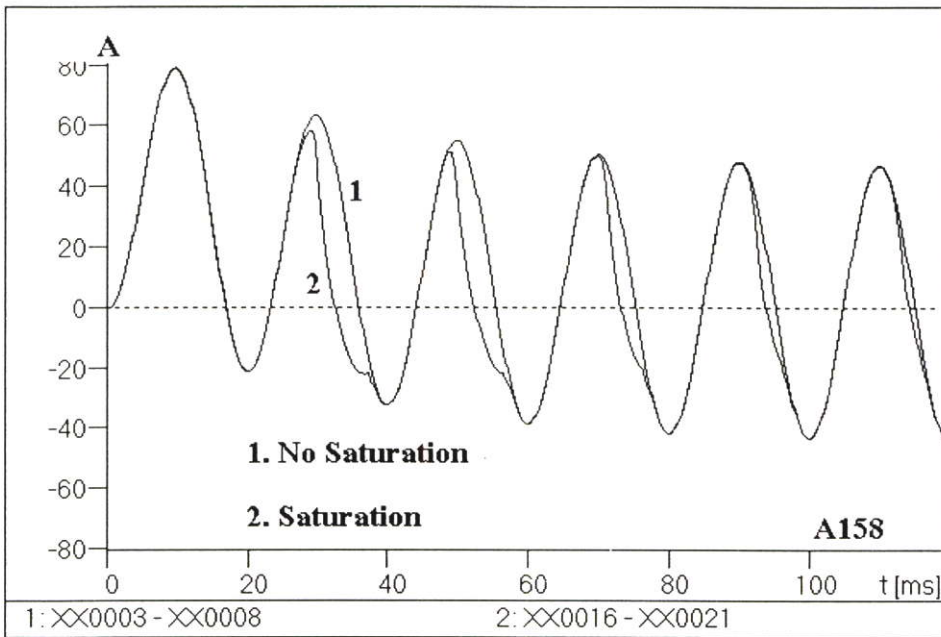
ผลจากแบบจำลองหม้อแปลงกระแส และระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP จะเป็นผลจากการทดลองในเรื่องของหม้อแปลงกระแส ซึ่งแต่ละกรณีได้แสดงผลรูปคลื่นกระแสในสภาวะทรานเซียนต์ 2 รูป คือรูปคลื่นที่ 1 จะแสดงสภาวะทรานเซียนต์โดยไม่มีผลของการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสเข้ามาเกี่ยวข้อง รูปคลื่นที่ 2 แสดงรูปคลื่นในสภาวะทรานเซียนต์ที่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสซึ่งในกรณีต่าง ๆ จะมีระดับความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยในการอิ่มตัวของแต่ละกรณี การแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 6.1 ถึง 6.32 ได้ใช้โปรแกรม PCPlot ซึ่งเป็นโปรแกรมที่รองรับไฟล์เอาต์พุตจากโปรแกรม ATP-EMTP



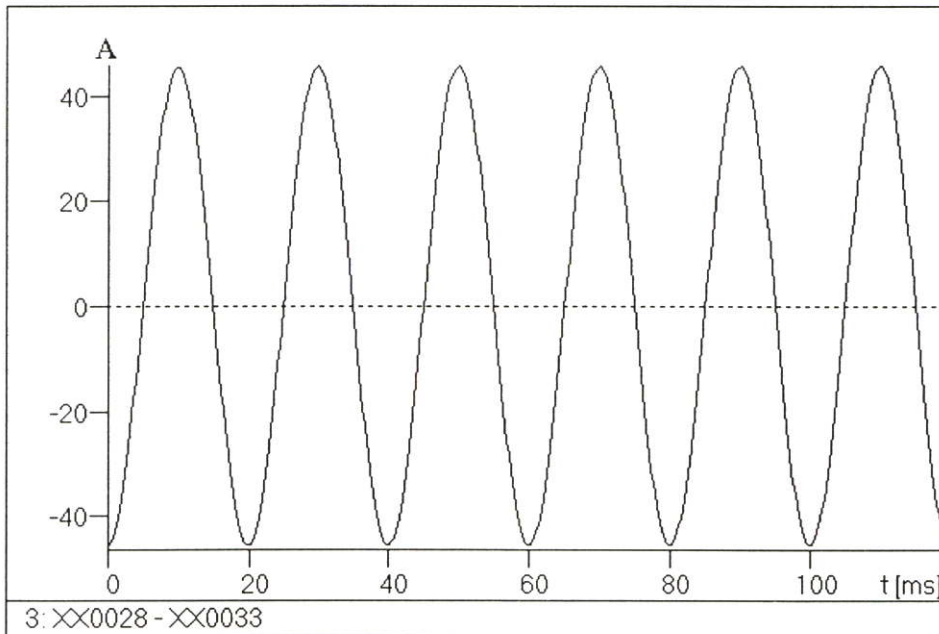
รูปที่ 6.1 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A154  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  $X/R=10$  เบอร์เดิน 4  $\Omega$



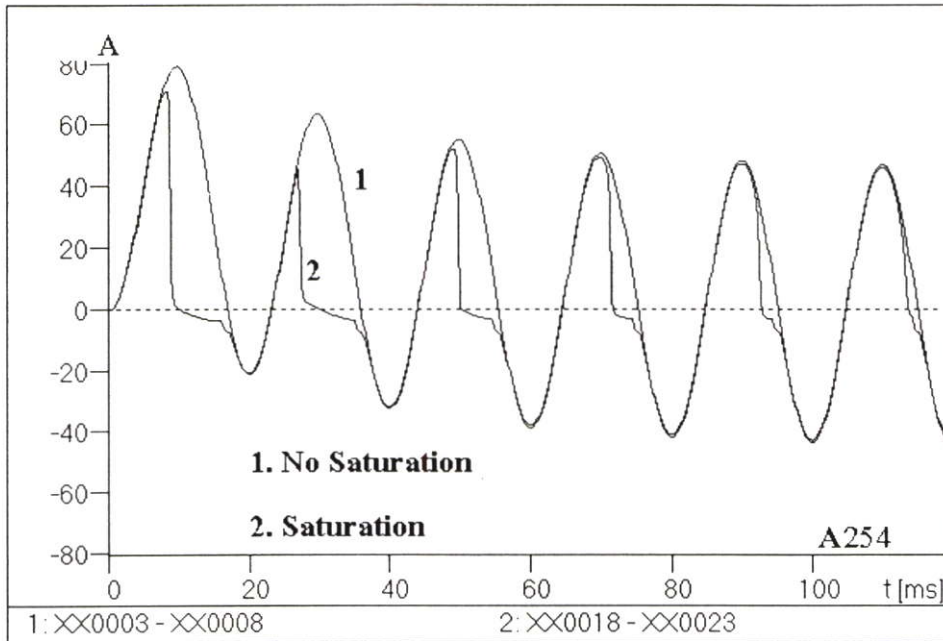
รูปที่ 6.2 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A154  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  $X/R=10$  เบอร์เดิน 4  $\Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีคาร์บอนตัวของหม้อแปลงกระแส



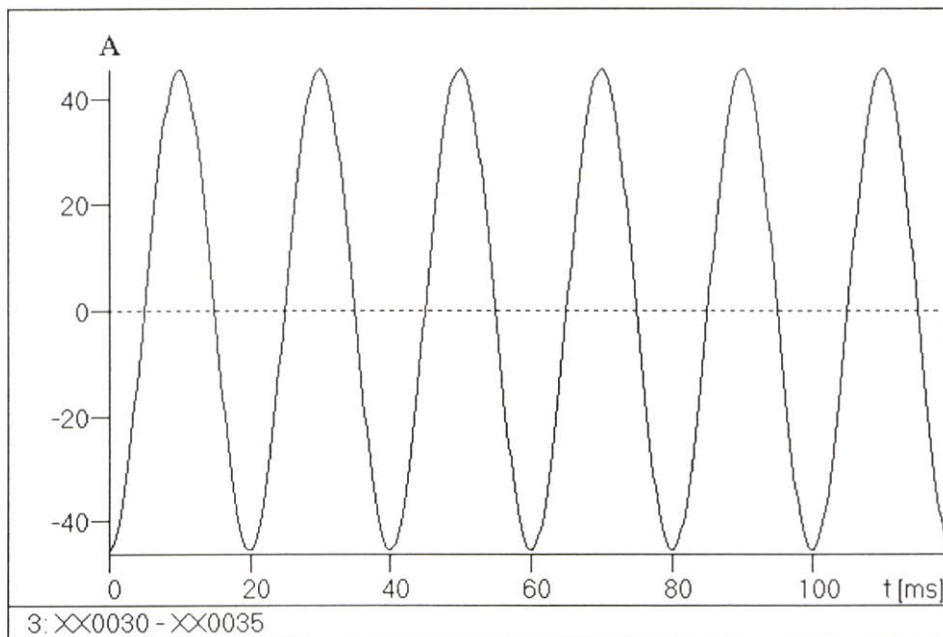
รูปที่ 6.3 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A158  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  
 $X/R=10$  เบอร์เดน  $4 \Omega$



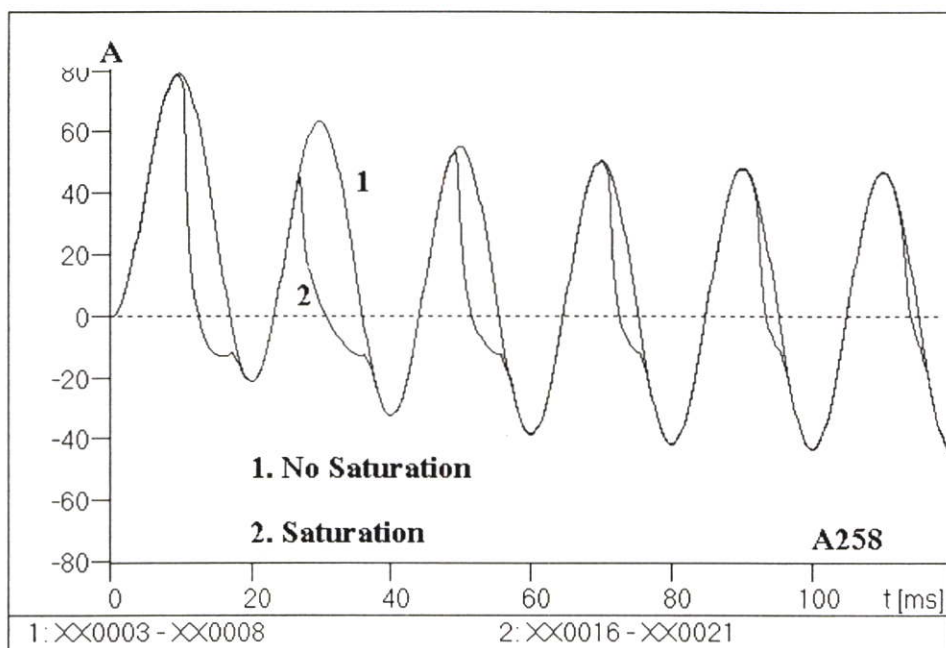
รูปที่ 6.4 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A158  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  
 $X/R=10$  เบอร์เดน  $4 \Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมิตัวของหม้อแปลง  
 กระแส



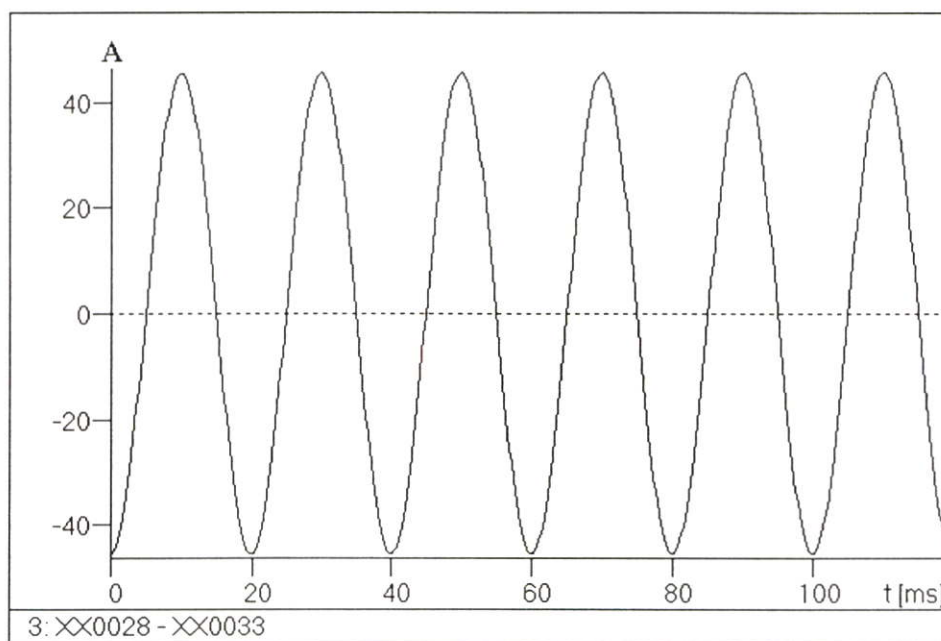
รูปที่ 6.5 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A254  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  
 $X/R=10$  เบอร์เดน  $8 \Omega$



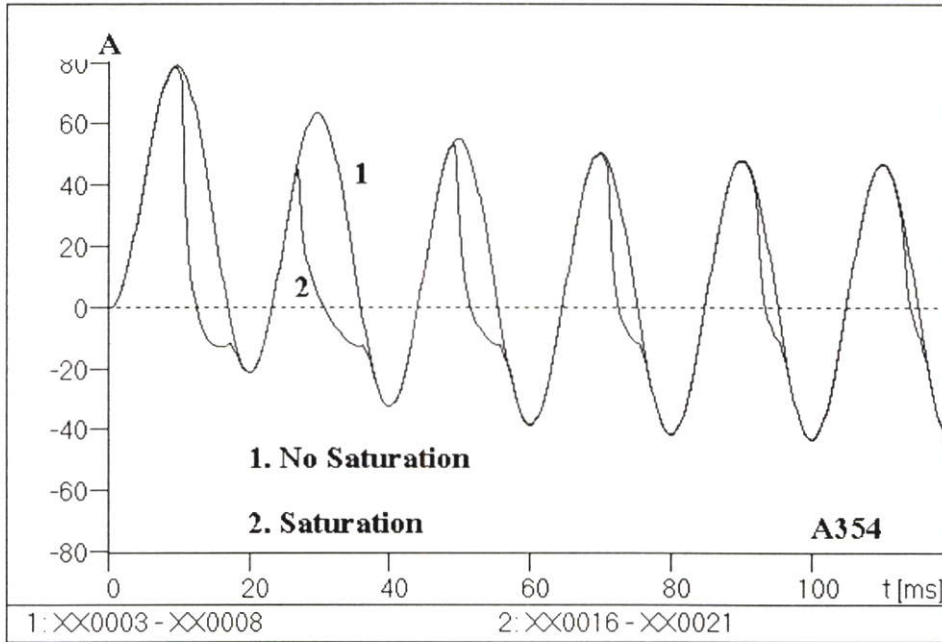
รูปที่ 6.6 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A254  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  
 $X/R=10$  เบอร์เดน  $8 \Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลง  
 กระแส



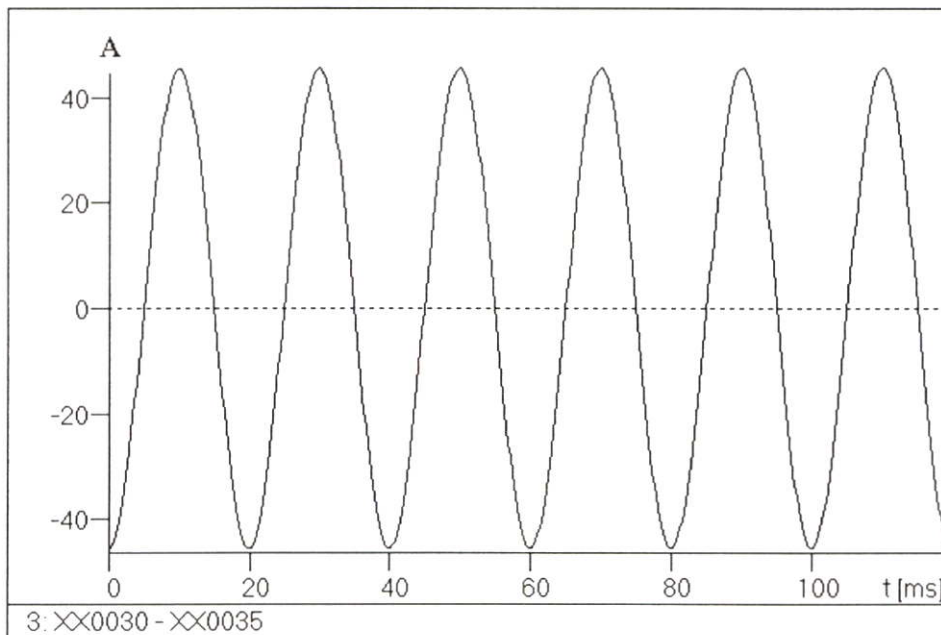
รูปที่ 6.7 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A258  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  $X/R=10$  เบอร์เดน  $8 \Omega$



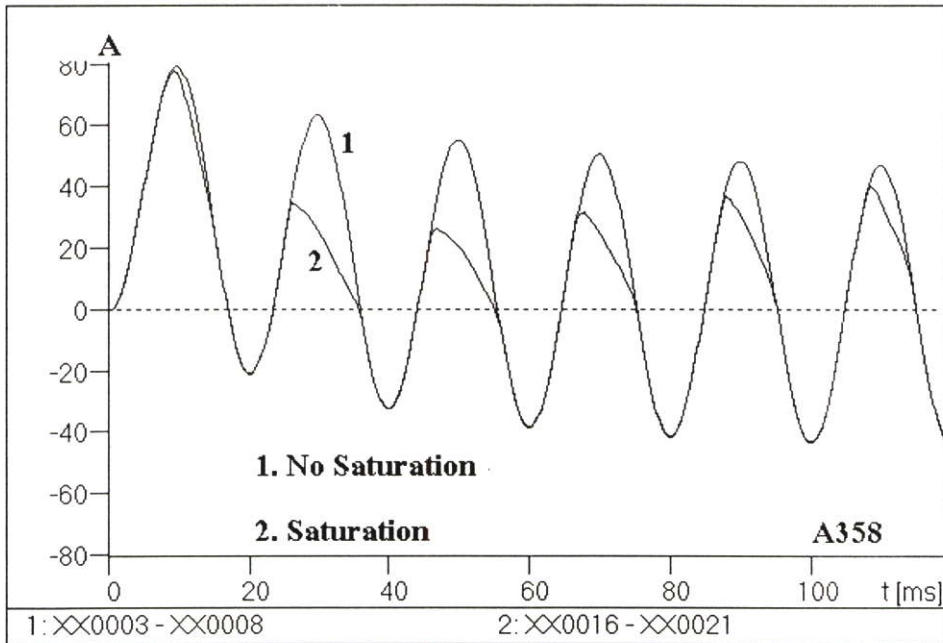
รูปที่ 6.8 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A258  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  $X/R=10$  เบอร์เดน  $8 \Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส



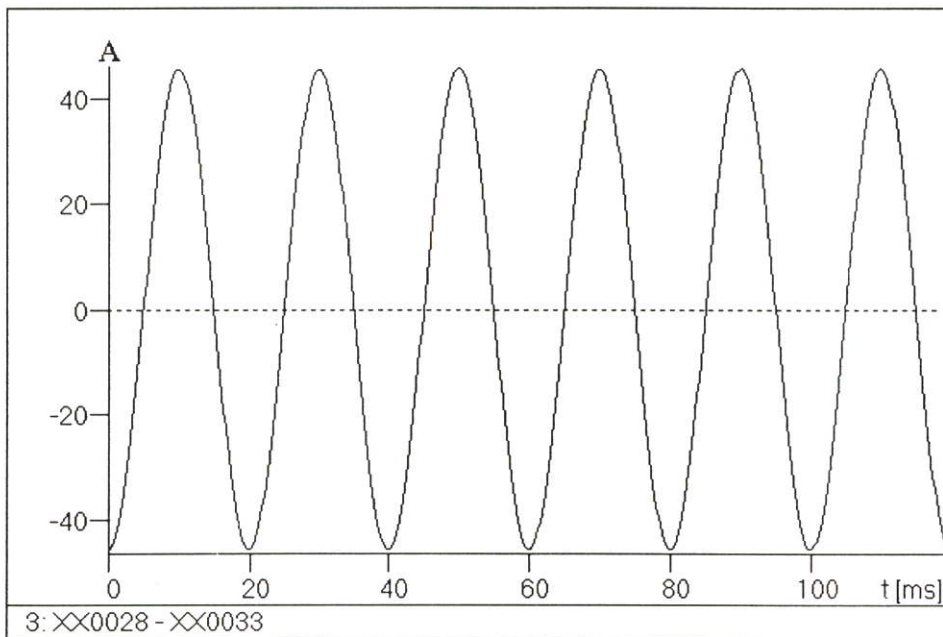
รูปที่ 6.9 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A354  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  $X/R=10$  เบอร์เดน  $4+j7 \Omega$



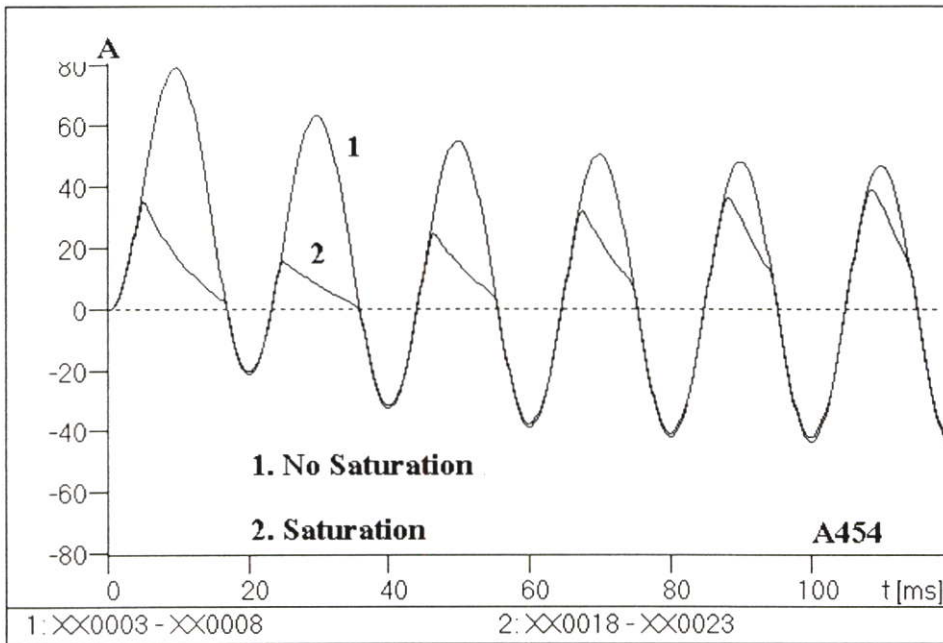
รูปที่ 6.10 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A354  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  $X/R=10$  เบอร์เดน  $4+j7 \Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมตัวของหม้อแปลงกระแส



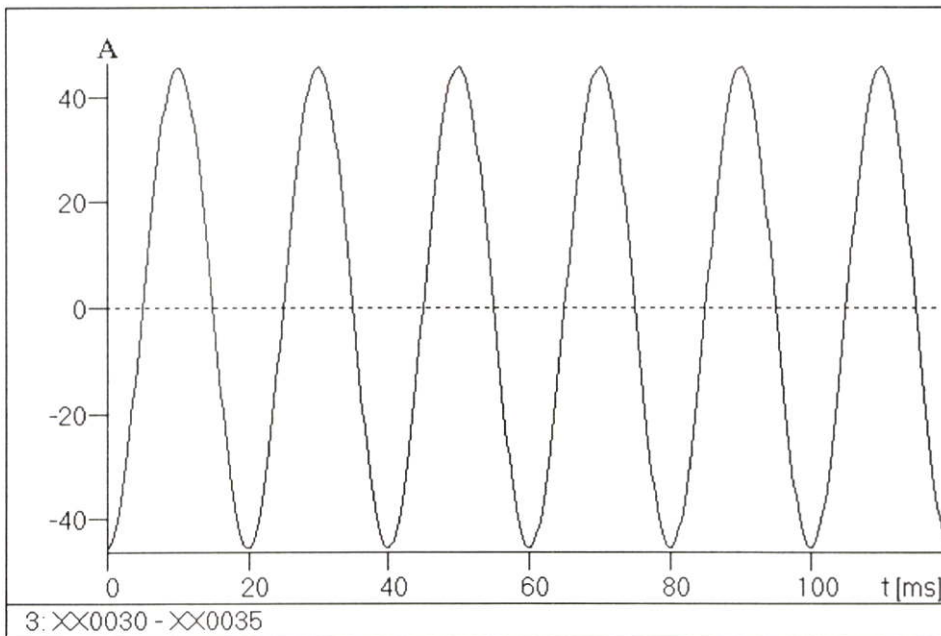
รูปที่ 6.11 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A358  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  $X/R=10$  เบอร์เดน  $4+j7 \Omega$



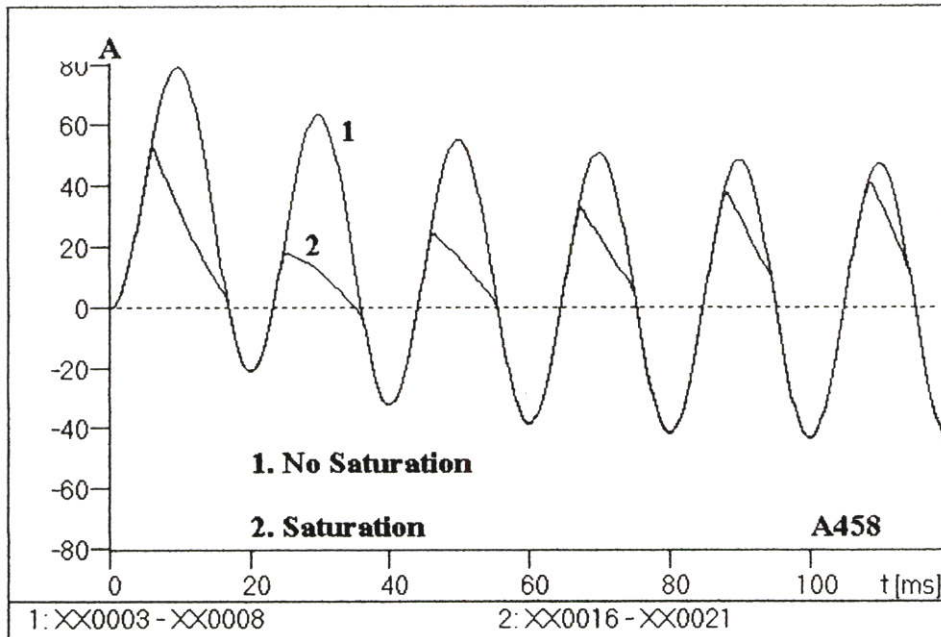
รูปที่ 6.12 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A358  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  $X/R=10$  เบอร์เดน  $4+j7 \Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส



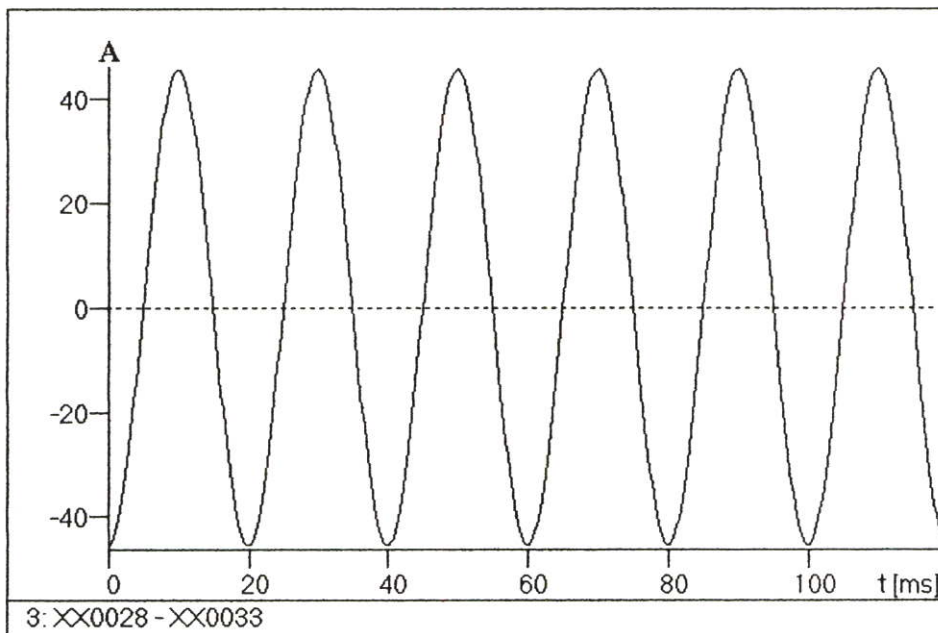
รูปที่ 6.13 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A454  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  $X/R=10$  เฮอร์เดน  $8+j14 \Omega$



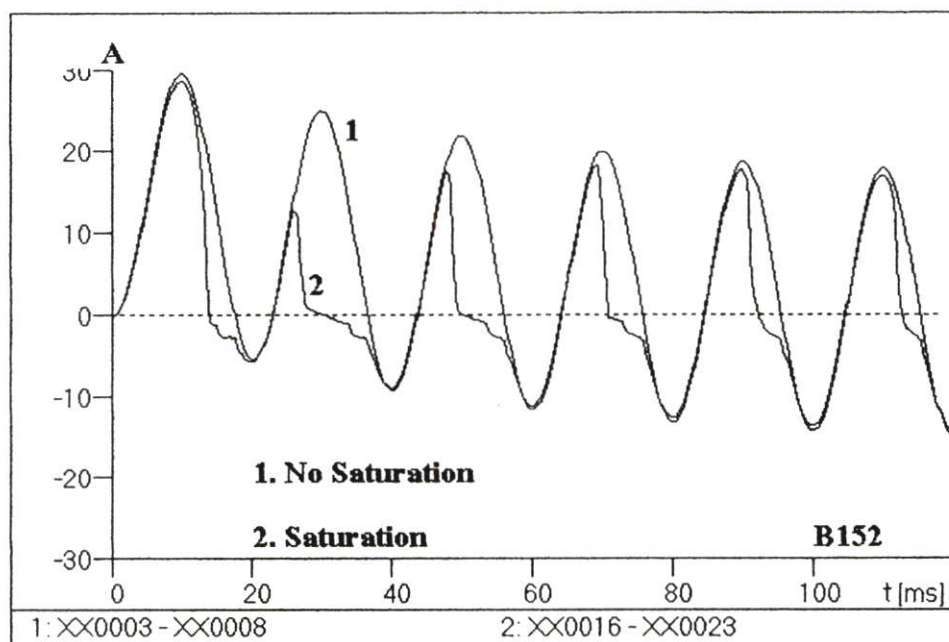
รูปที่ 6.14 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C400 กรณีศึกษา A454  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  $X/R=10$  เฮอร์เดน  $8+j14 \Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีกำบังตัวของหม้อแปลงกระแส



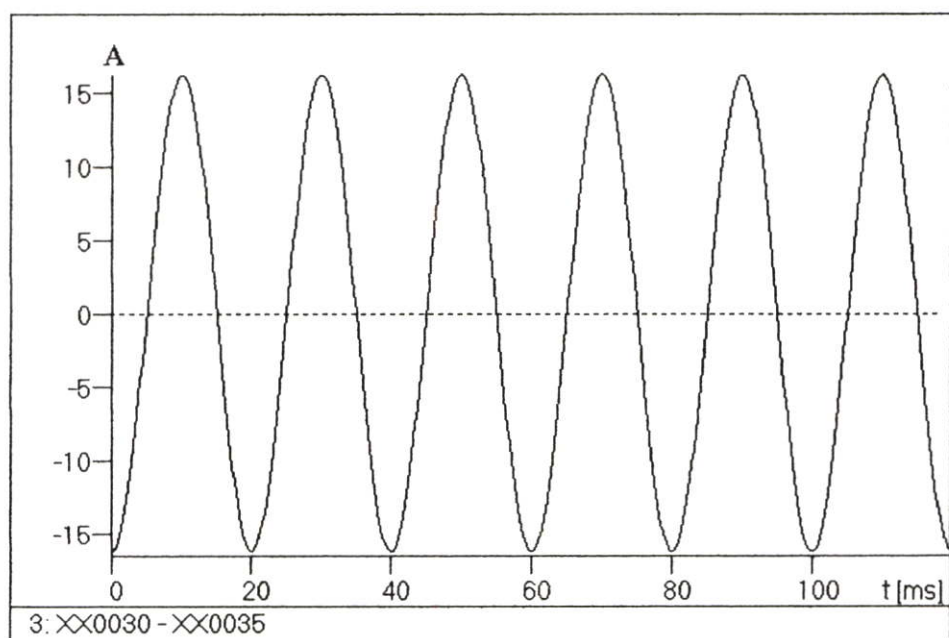
รูปที่ 6.15 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A458  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  $X/R=10$  เบอร์เดน  $8+j14 \Omega$



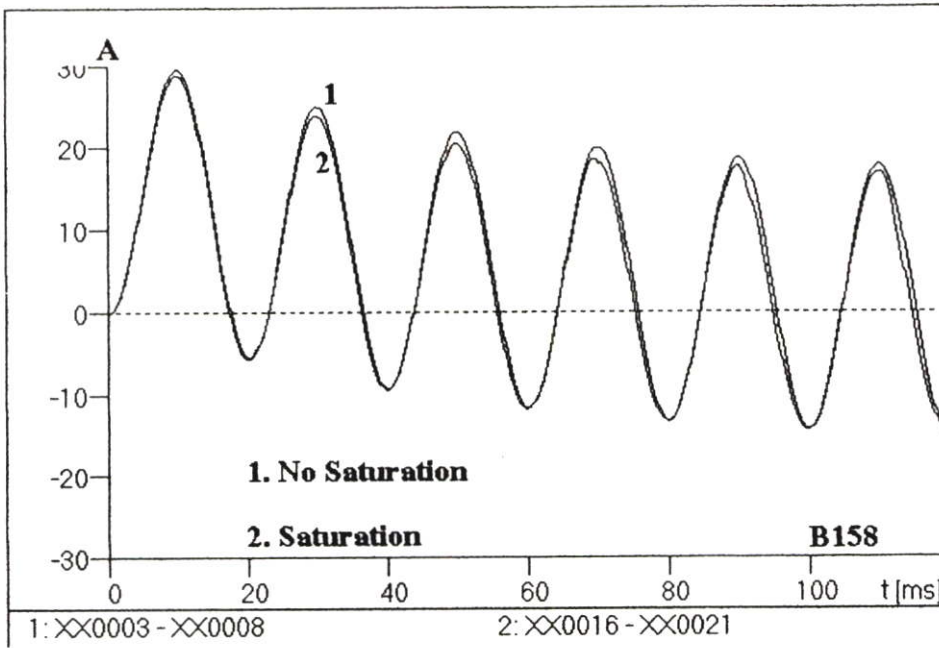
รูปที่ 6.16 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 2000:5 C800 กรณีศึกษา A458  $I_{FSYM} = 12885$  Arms,  $X/R=10$  เบอร์เดน  $8+j14 \Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมตัวของหม้อแปลงกระแส



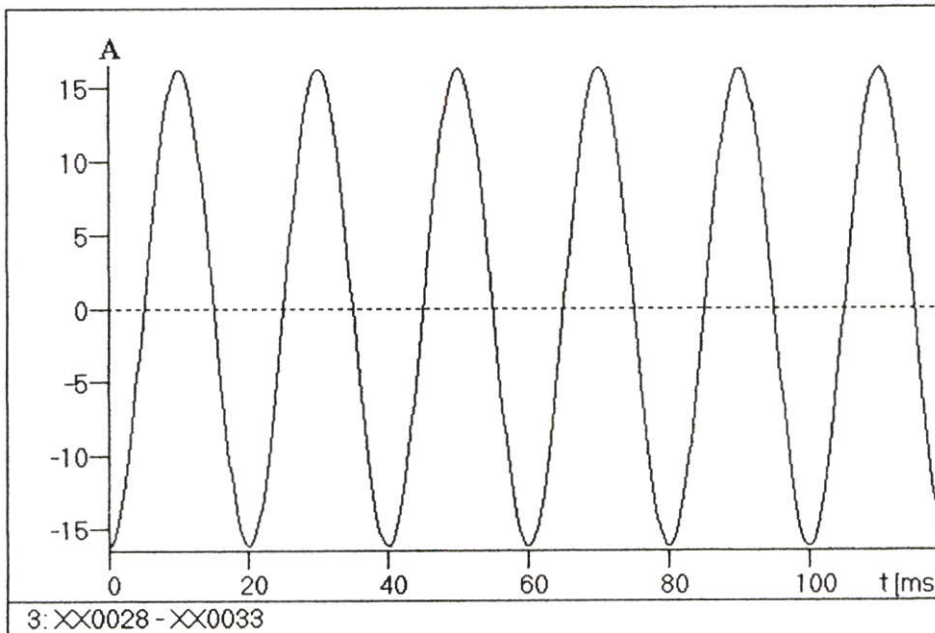
รูปที่ 6.17 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B152  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  
 $X/R=15$  เบอร์เดน 4  $\Omega$



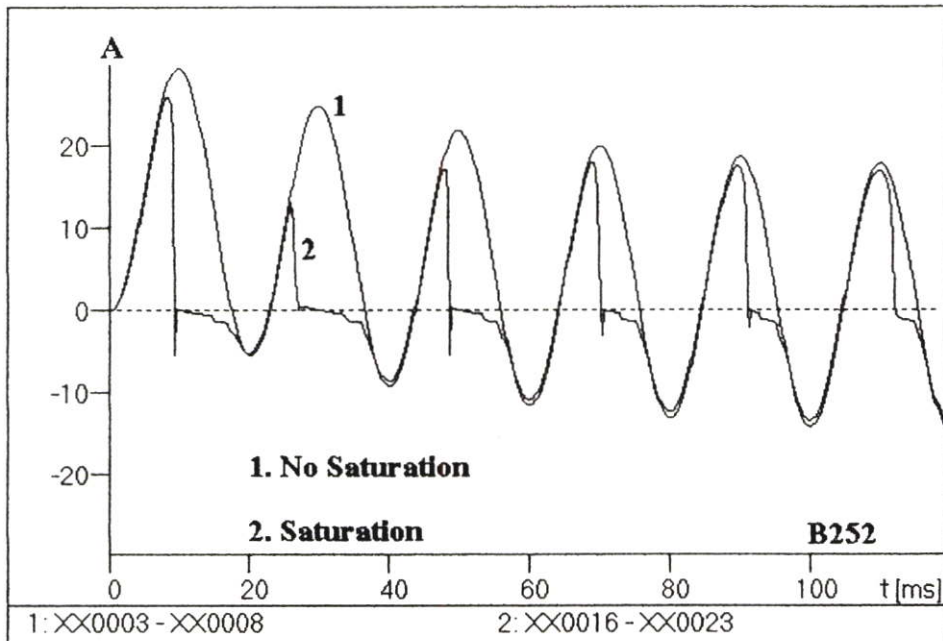
รูปที่ 6.18 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B152  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  
 $X/R=15$  เบอร์เดน 4  $\Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลง  
 กระแส



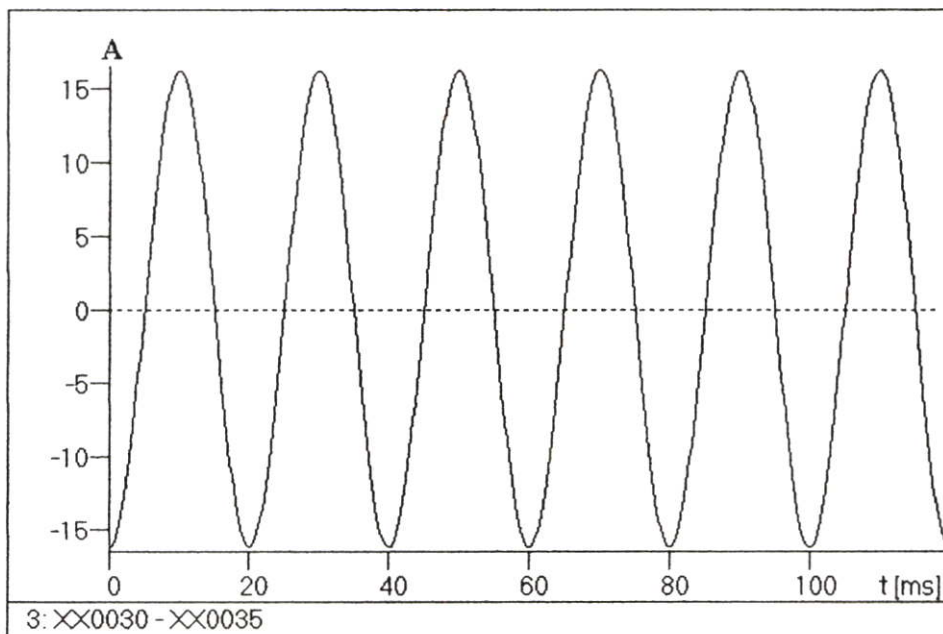
รูปที่ 6.19 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B158  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  
 $X/R=15$  เบอร์เดน  $4 \Omega$



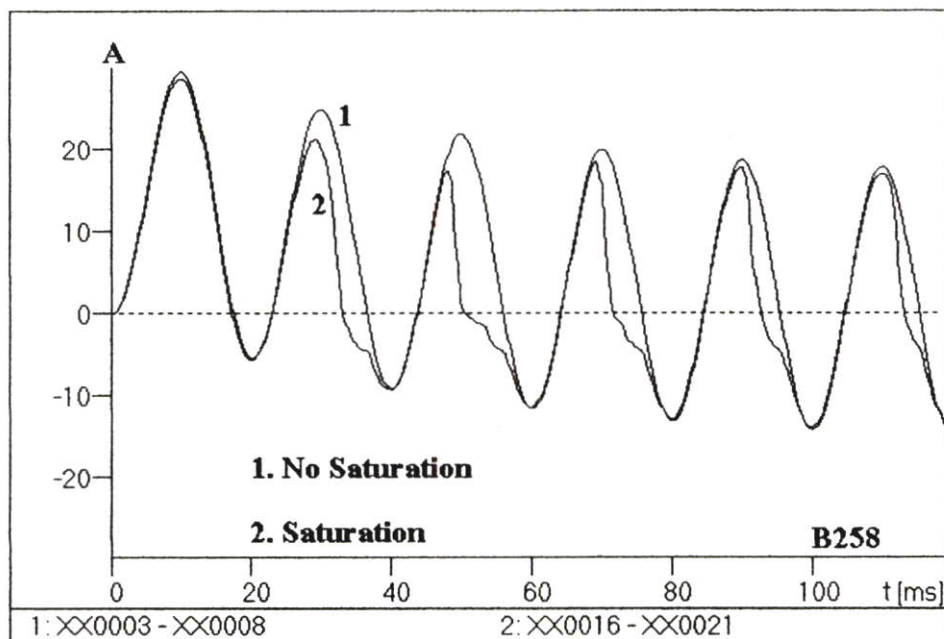
รูปที่ 6.20 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B158  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  
 $X/R=15$  เบอร์เดน  $4 \Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิมิตัวของหม้อแปลง  
 กระแส



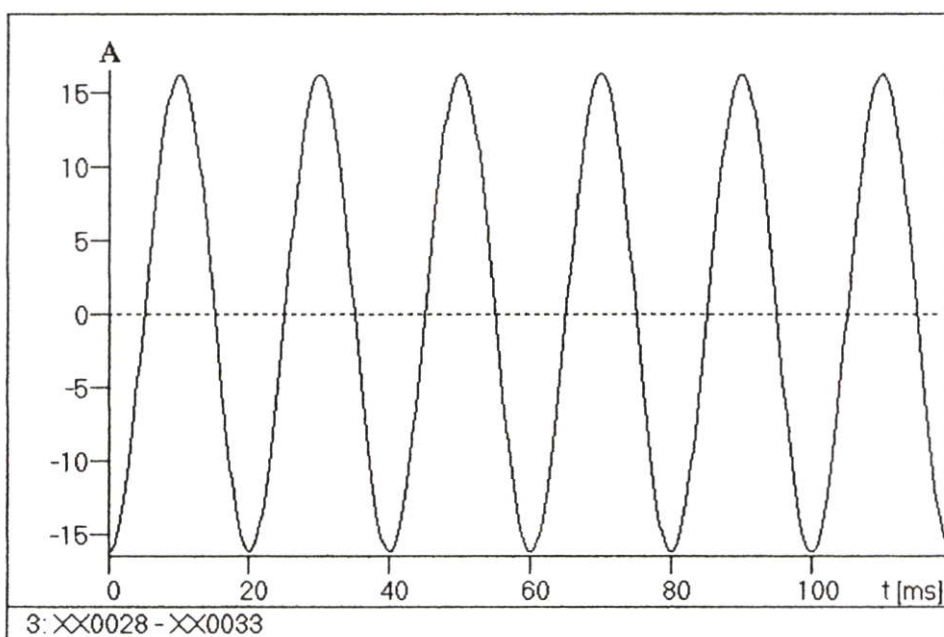
รูปที่ 6.21 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B252  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  
 $X/R=15$  เฮอร์เด็น  $8 \Omega$



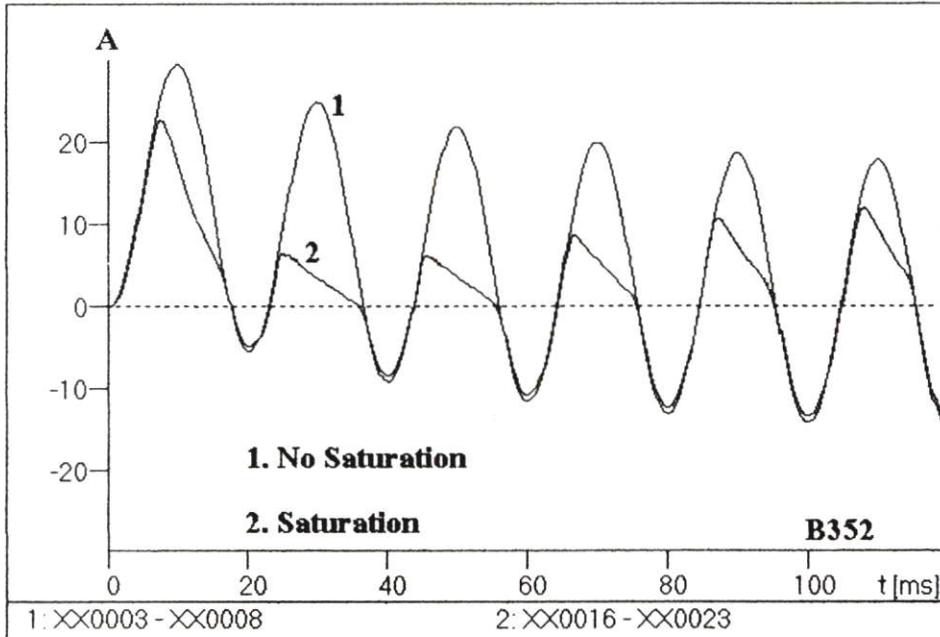
รูปที่ 6.22 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B252  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  
 $X/R=15$  เฮอร์เด็น  $8 \Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลง  
 กระแส



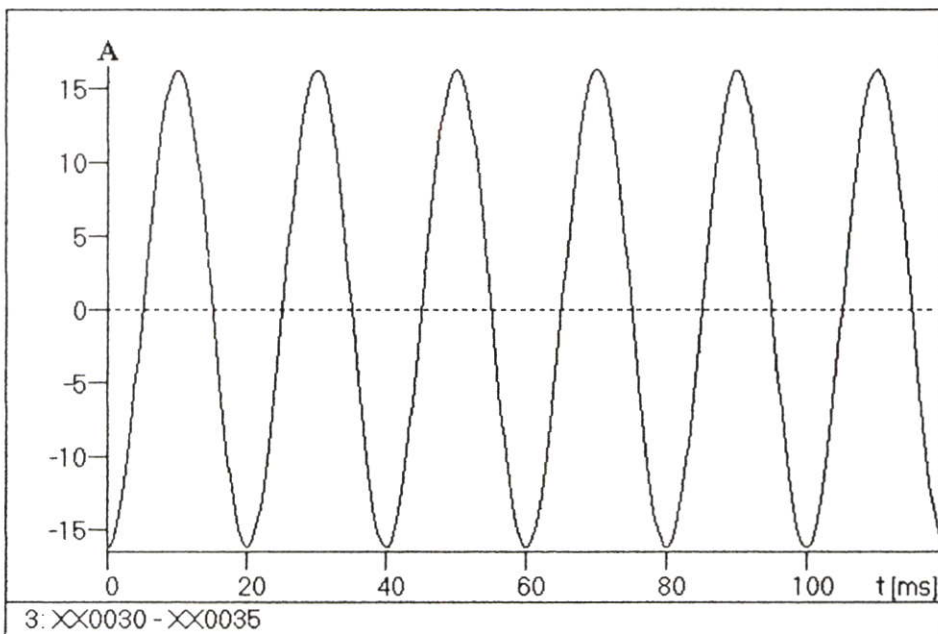
รูปที่ 6.23 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B258  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  $X/R=15$  เบอร์เคน  $8 \Omega$



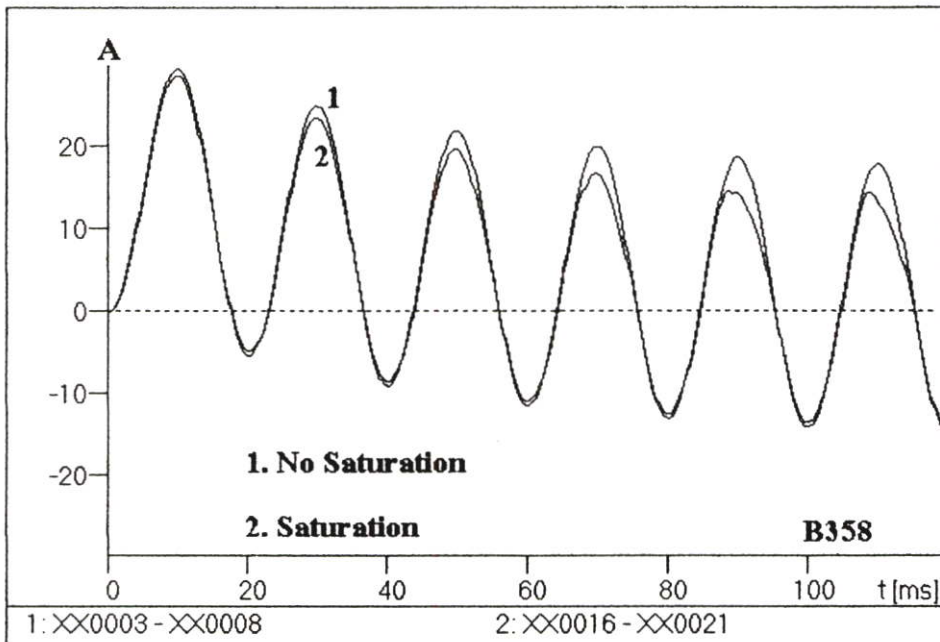
รูปที่ 6.24 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B258  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  $X/R=15$  เบอร์เคน  $8 \Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส



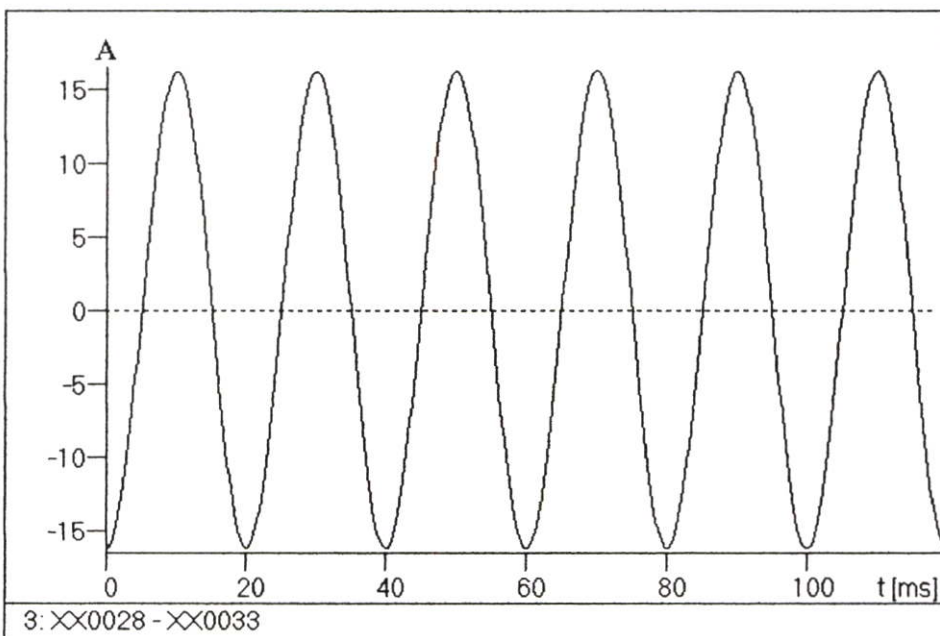
รูปที่ 6.25 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B352  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  
 $X/R=15$  เบอร์เดน  $4+j7 \Omega$



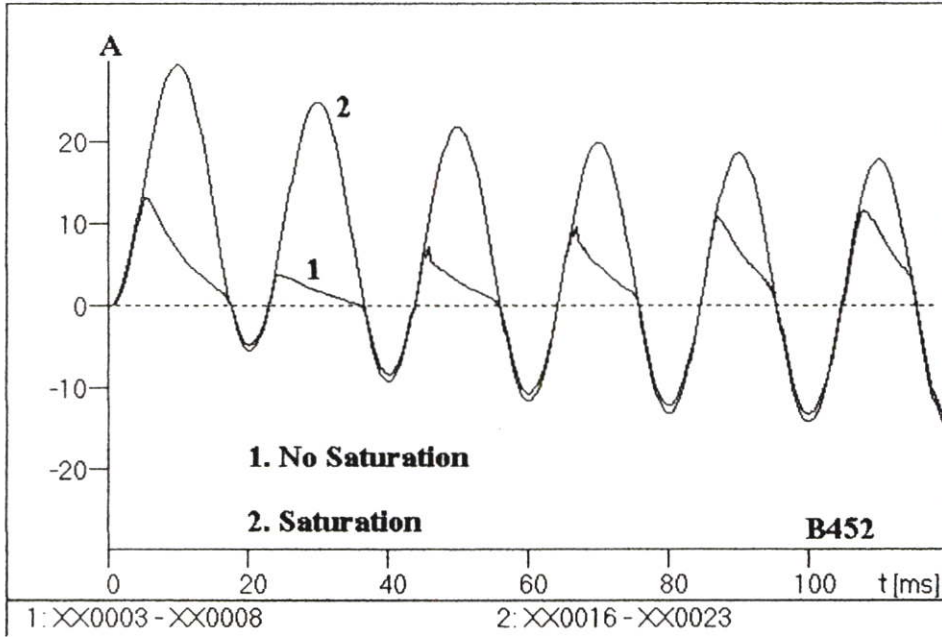
รูปที่ 6.26 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B352  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  
 $X/R=15$  เบอร์เดน  $4+j7 \Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลง  
 กระแส



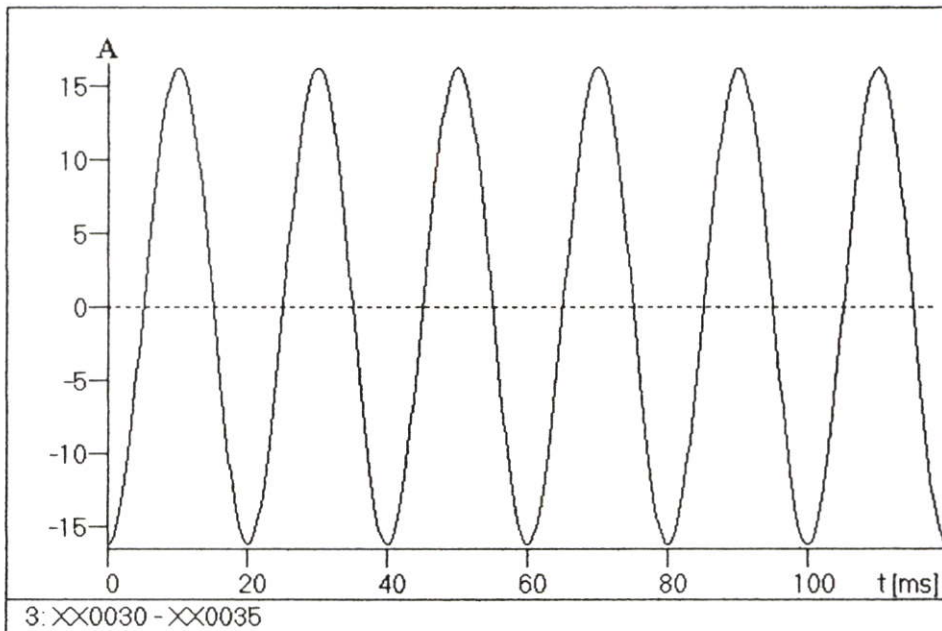
รูปที่ 6.27 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B358  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  
 $X/R=15$  เฮอร์เคน  $4+j7 \Omega$



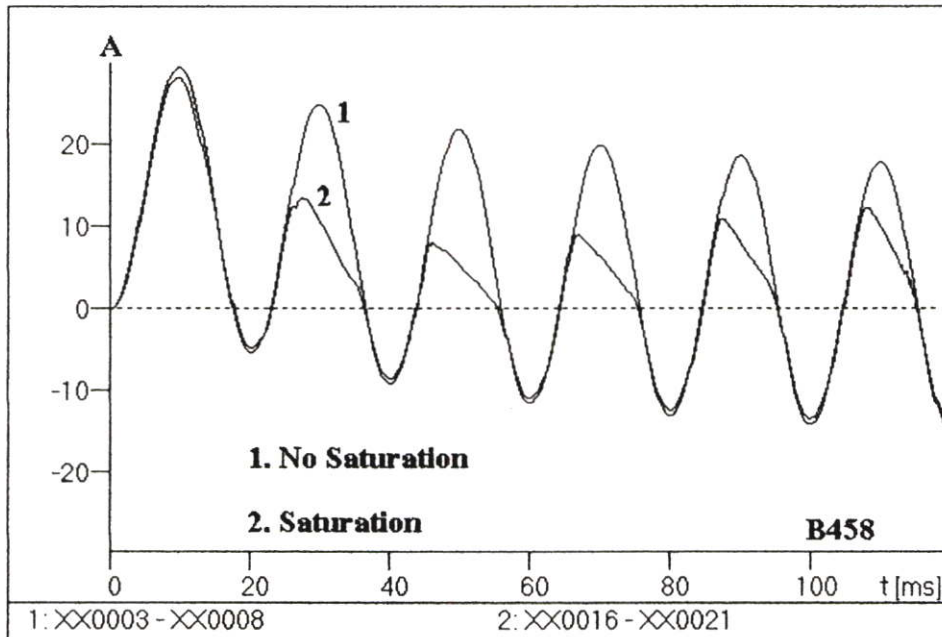
รูปที่ 6.28 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B358  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  
 $X/R=15$  เฮอร์เคน  $4+j7 \Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลง  
 กระแส



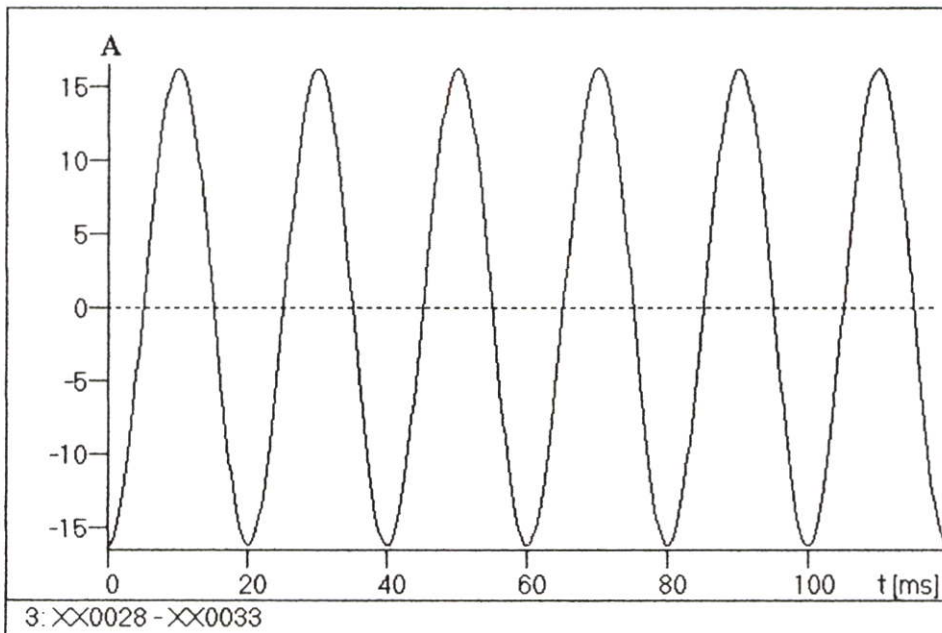
รูปที่ 6.29 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B452  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  
 $X/R=15$  เฮอร์เดน  $8+j14 \Omega$



รูปที่ 6.30 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C200 กรณีศึกษา B452  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  
 $X/R=15$  เฮอร์เดน  $8+j14 \Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลง  
 กระแส



รูปที่ 6.31 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B458  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  
 $X/R=15$  เฮอร์เคน  $8+j14 \Omega$



รูปที่ 6.32 ผลตอบสนองของหม้อแปลงกระแส 400:5 C800 กรณีศึกษา B458  $I_{FSYM} = 913$  Arms,  
 $X/R=15$  เฮอร์เคน  $8+j14 \Omega$  ไม่มีออฟเซตกระแสตรง และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลง  
 กระแส

## 6.2 ผลการทดสอบรีเลย์

ในการแสดงผลส่วนนี้จะเป็นผลการทดสอบรีเลย์ผลต่าง SEL-587 ด้วยแผนการทดสอบตาม บทที่ 5 ซึ่งผลการทดสอบจะเป็นเรื่องของเวลาในการทำงาน (Trip) ของรีเลย์ป้องกัน ซึ่งในการทดสอบ ตามชื่อกรณีศึกษา 16 กรณี จะมีการทดสอบกรณีละ 2 สภาวะ

- สภาวะที่รีเลย์ผลต่างมีการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสที่ปกติ (สภาวะอยู่ตัว) กับรูปคลื่นกระแสที่ทรานเซียนต์ที่มีการอิมพัลส์ของหม้อแปลงกระแส
- สภาวะที่รีเลย์ผลต่างมีการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสที่ปกติ (สภาวะอยู่ตัว) กับรูปคลื่นกระแสที่ทรานเซียนต์ที่ไม่มีการอิมพัลส์ของหม้อแปลงกระแส

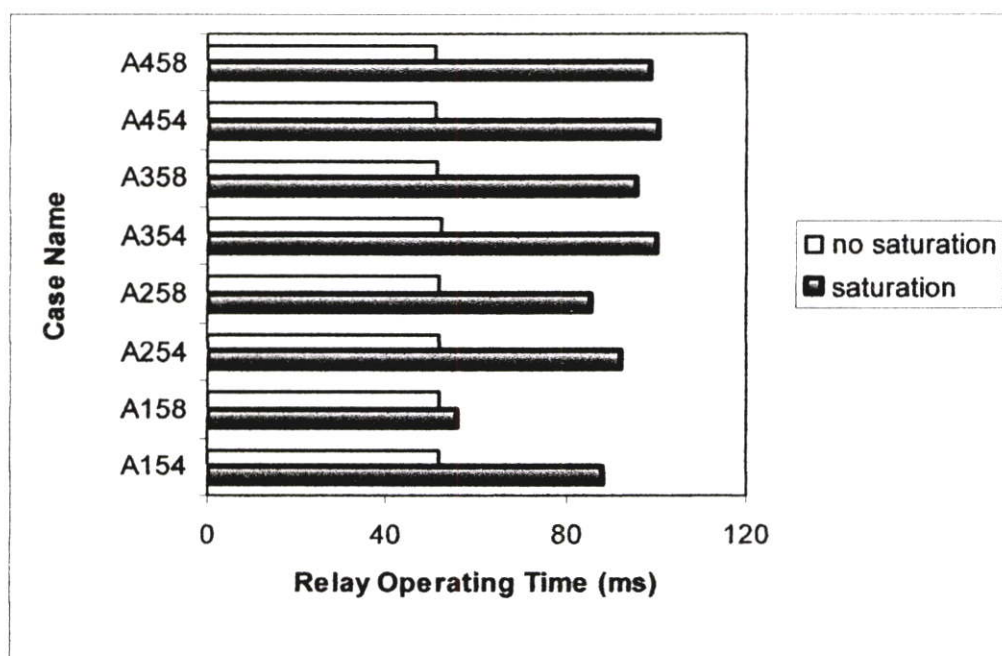
ดังนั้นการทดสอบรีเลย์ป้องกันทั้งหมดจะมี 32 ครั้ง ตามผลการทดสอบในตารางที่ 6.1-6.2 และสามารถสรุปเป็นกราฟเพื่อเปรียบเทียบการทำงานในสภาวะต่างๆ ดังรูปที่รูปที่ 6.33 - 6.36

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบรีเลย์ในสภาวะต่างๆ ของหม้อแปลงกระแส 2000:5

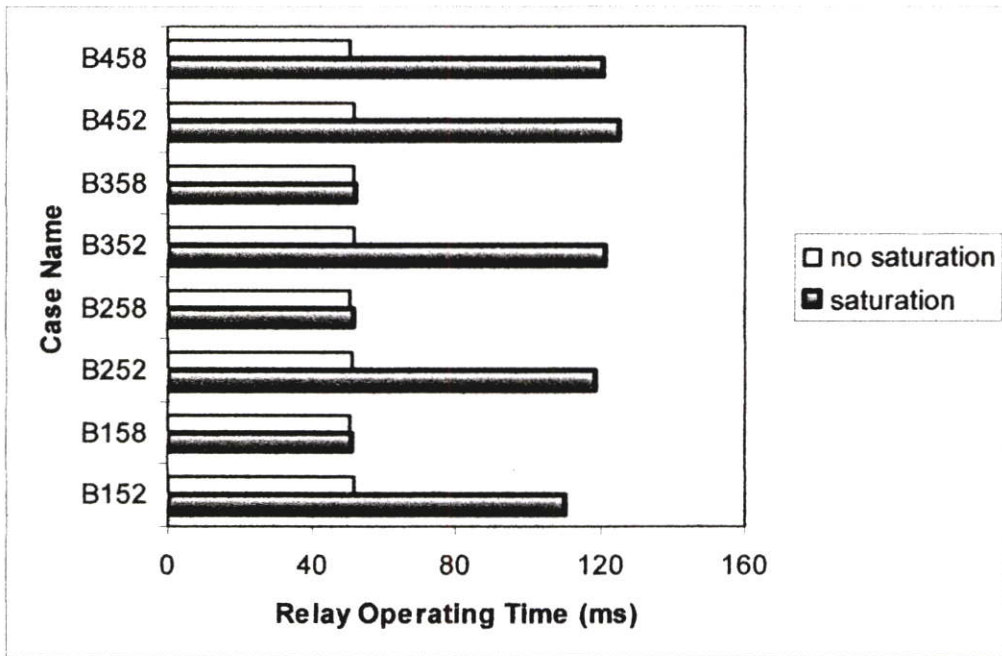
ชื่อกรณี	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip)	
	สภาวะที่มีการอิมพัลส์ (ms)	สภาวะที่ไม่มีการอิมพัลส์ (ms)
A154	88.0	52.0
A158	55.7	51.6
A254	91.9	51.6
A258	85.6	51.8
A354	100.0	51.4
A358	95.5	51.2
A454	100.4	51.0
A458	98.8	51.1

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบรีเลย์ในสภาวะต่าง ๆ ของหม้อแปลงกระแส 400:5

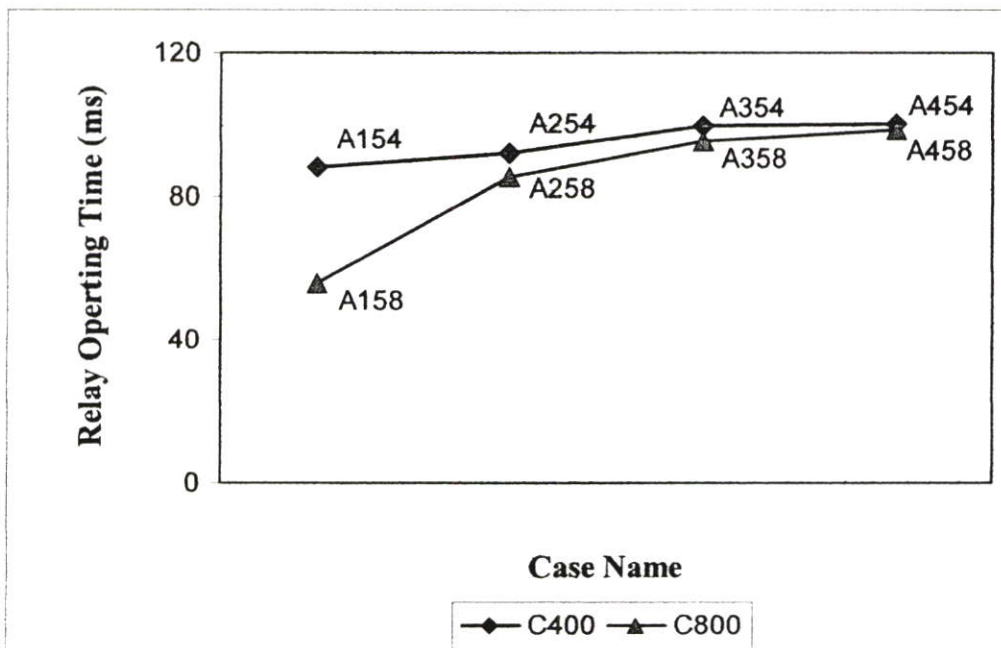
ชื่อกรณี	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip)	
	สภาวะที่มีการ อิ่มตัว (ms)	สภาวะที่ไม่มีการ อิ่มตัว (ms)
B152	110.2	52.0
B158	51.3	51.0
B252	118.7	51.3
B258	51.7	51.0
B352	121.3	52.0
B358	52.3	51.8
B452	125.0	51.8
B458	120.6	51.0



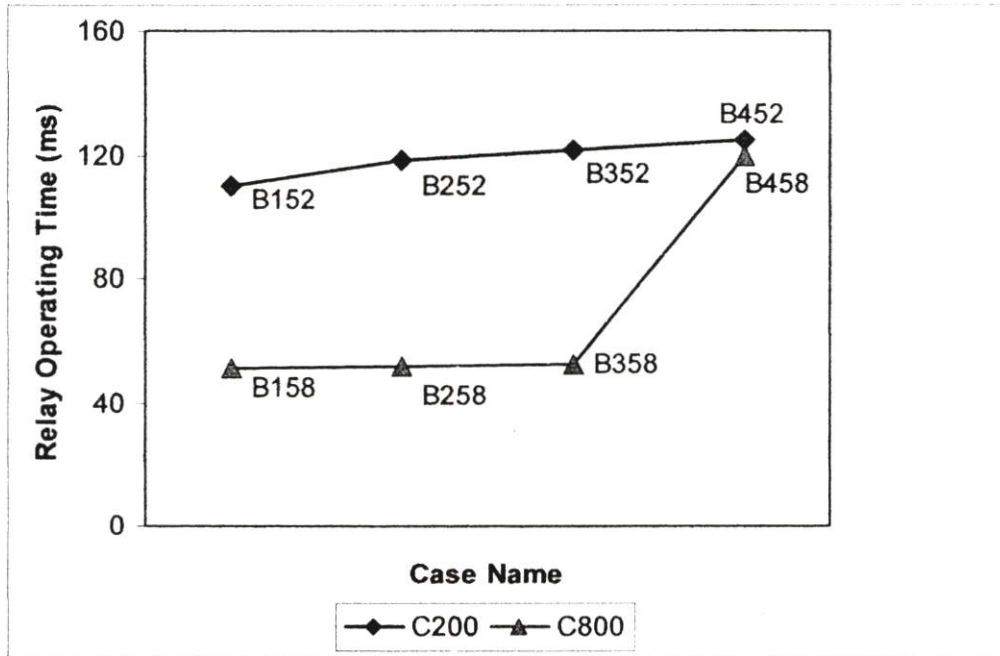
รูปที่ 6.33 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง SEL-587 ในกรณีที่รับกระแสจากหม้อแปลงกระแสขนาด 2000 : 5 ในกรณีที่มีการอิ่มตัว และ ไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส



รูปที่ 6.34 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง SEL-587 ในกรณีที่ได้รับกระแสจากหม้อแปลงกระแสนัด 400 : 5 ในกรณีที่มีการอิ่มตัว และไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส



รูปที่ 6.35 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง SEL-587 ในกรณีที่ได้รับกระแสจากหม้อแปลงกระแสนัดขนาด 2000 : 5 ที่ระบุค่าความแม่นยำแตกต่างกัน



รูปที่ 6.36 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานของรีเลย์ผลต่าง SEL-587 ในกรณีที่ได้รับกระแสจากหม้อแปลงกระแสขนาด 400 : 5 ที่ระบุค่าความแม่นยำแตกต่างกัน

## บทที่ 7

### บทสรุป

จากการศึกษาการตอบสนองของหม้อแปลงกระแสในสภาวะชั่วคราว ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ทำให้สามารถทราบถึงพฤติกรรมของหม้อแปลงกระแสโดยไม่จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองย่อยส่วน ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดสอบได้มากขึ้น

การเกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสซึ่งก่อให้เกิดรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนป้อนให้กับรีเลย์มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการที่จะส่งผลกระทบต่อระดับความรุนแรงในการอิ่มตัว จากผลการทดลองด้วยแบบจำลองสามารถสรุปได้ว่า ระดับของกระแสผิดพ้องยังมีค่าสูง ก็จะทำให้การอิ่มตัวมีความรุนแรงอัตราส่วน X/R ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแสขณะเกิดลัดวงจรจะมีผลโดยตรงต่อขนาดของออฟเซตกระแสตรง และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแส ถ้าอัตราส่วน X/R มีค่าสูงก็จะทำให้การอิ่มตัวมีความรุนแรงและเกิดเร็วขึ้นเบอร์เดน หรือภาระของหม้อแปลงกระแสในการทดสอบซึ่งใช้ค่าเบอร์เดน 4 ค่า คือ  $4 \Omega$ ,  $8 \Omega$ ,  $4+j7 \Omega$ ,  $8+14 \Omega$  พบว่าในกรณีที่เบอร์เดนมีค่าสูงก็จะส่งผลให้การอิ่มตัวมีความรุนแรงตามไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.5 ในบทที่ 2 ค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ของเบอร์เดน จะมีผลทำให้ค่าคงที่เวลาทางด้านทุติยภูมิเปลี่ยนแปลง ซึ่งถ้ามีค่าสูงก็จะส่งผลทำให้การอิ่มตัวที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงมากขึ้น และยังมีผลต่อลักษณะรูปร่างของรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนด้วย เช่น กรณี PF เบอร์เดนมีค่าเท่ากับ 1 ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นจะเกิดขึ้นทั้งด้านบวกและลบ ลักษณะของรูปคลื่นกระแสจะลดลงสู่สภาวะคงตัวอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ PF เบอร์เดนมีค่าเท่ากับ 0.5 ความผิดเพี้ยนจะเกิดขึ้นทางด้านบวก การลดลงของกระแสจะมีลักษณะของการประวิงเวลา การนำข้อมูลการทดสอบของหม้อแปลงกระแสขนาดเดียวกันแต่ระบุค่าความแม่นยำ (Accuracy Class) ต่างกันมาเปรียบเทียบจะทำให้เห็นสมรรถนะของหม้อแปลงกระแสได้อย่างชัดเจนมาก คือถ้าหม้อแปลงกระแสที่ระบุค่าความแม่นยำสูง เช่น C800 เมื่อเกิดสภาวะชั่วคราวจะเกิดการอิ่มตัวช้ากว่า และรุนแรงน้อยกว่าหม้อแปลงกระแสที่ระบุค่าความแม่นยำ C400, C200

การทดสอบสมรรถนะของรีเลย์ผลต่าง SEL-587 ซึ่งได้นำข้อมูลเอาท์พุทไฟล์ .PL4 ที่ได้จากการทดลองในส่วนของแบบจำลองหม้อแปลงกระแสและระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP มาทดสอบตามแผนการทดสอบได้นำเสนอ พบว่าการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสมีผลต่อการทำงานของรีเลย์ผลต่าง โดยจะทำให้การทำงานของรีเลย์ผลต่างทำงานช้าลงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับความรุนแรงในการอิ่มตัว จากการทดสอบได้ทำการเปรียบเทียบการทำงานในสภาวะชั่วคราวที่ไม่มีการอิ่มตัวกับสภาวะที่มีการอิ่มตัว ทำให้พบว่ากรณีที่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสจะทำให้รีเลย์ผลต่างทำงานช้ากว่าทุกกรณีแต่มีบางกรณีที่ผลการทดสอบใกล้เคียงกัน เช่นกรณีที่นำข้อมูล

จากแบบจำลองที่ใช้หม้อแปลงกระแสที่ระบุค่าความถูกต้อง C800 เช่น กรณี A158, B358, B158, B258 โดยรวมสามารถสรุปได้ว่าลักษณะรูปคลื่นกระแสที่ผิดเพี้ยน จะมีผลต่อเวลาในการทำงานของรีเลย์ผลต่าง SEL-587

การอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสเมื่อเกิดสภาวะทรานเซียนต์เป็นสิ่งที่ยากที่จะหลีกเลี่ยง แต่อาจลดความรุนแรงได้โดยการเลือกหม้อแปลงกระแสที่ใช้วัสดุทำแกนเหล็กดีพอ หรือเลือกที่ระบุระดับค่าความแม่นยำ (Accuracy Class) สูง ๆ ในทางปฏิบัติอาจจะยอมให้การอิ่มตัวเกิดขึ้นได้ แต่จะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของรีเลย์ป้องกัน

ในการใช้โปรแกรมทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า (ATP-EMTP) ร่วมกับเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja 300 พบว่าการทดสอบอาจจะล่าช้าหากจะต้องเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนศึกษาการใช้งานโปรแกรม EMTP และโปรแกรม FrejaSim300 แต่ถ้ามีความเข้าใจแล้ว การทดสอบก็สามารถทำได้อย่างรวดเร็วและสามารถเก็บไฟล์ที่สร้างขึ้นมาหลาย ๆ รูปแบบไปใช้ทดสอบรีเลย์ครั้งต่อไปได้อีก

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป ควรจะนำแบบจำลองหม้อแปลงกระแสไปต่อร่วมกับแบบจำลองระบบไฟฟ้า ที่มีแบบจำลองของหม้อแปลงกำลัง และแบบจำลองระบบสายส่ง แล้วจำลองสภาวะลัดวงจรชนิดต่าง ๆ ไปทดสอบ เช่น

- Electromechanical Relay
- Solid State Relay
- Digital Relay

รีเลย์ป้องกันชนิดต่าง ๆ เช่น

- รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay) [50, 51, 50/51, 51V]
- รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) [21]
- รีเลย์แรงดัน (Voltage Relay) [59, 27, 60]
- รีเลย์ความถี่ (Frequency Relay) [81]

หรือรีเลย์ชนิดเดียวกันแต่ใช้หลักการในการประมวลผลต่างกัน เพื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานในสภาวะต่าง ๆ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. 2545. การป้องกันระบบไฟฟ้า พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : เอ็มแอนคို့
- [2] สันติ อัสวศรีพงษ์ศรี. 2526. รีเลย์ป้องกันกับการป้องกันระบบกำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ
- [3] ABB Network Partner. 1996. **User's manual and technical description of SPAD346 C stabilized differential relay**, Finland
- [4] BPA 1987 – 1996, **Alternative Transient Program (ATP) rule book USA**
- [5] L. Prikler and Hans Kr. Hoidalen. 1998, **ATPDraw for Windows 3.1x/95/NT version 1.0 User's Manual**, SINTEF Energy Research, Trondheim, Norway
- [6] M. Kezunovic, C.W. Fromen and F. Phillips. 1994. "Experimental Evaluation of EMTP based current transformer models for protective relay transient study" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.9, No.1, 405-413
- [7] Kasztenny, B. and M. Kezunovic 2000. "A Method for Linking Different Modeling Techniques for Accurate and Efficient Simulation" IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 1, 65-72.
- [8] M. Kezunovic, B.A. Pickett, 1998. "Digital Simulator Performance Requirements for Relay Testing" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, 78-84.
- [9] R. Floker, SEL. "Determine current transformer suitability using EMTP model" SEL Inc. Pullman, WA, US.
- [10] Schweitzer Engineering Laboratories. 2001. **Instruction manual current differential relay SEL-587** Pullman, WA, US.
- [11] GEC Alsthom Measurement Ltd. 1994. **Analysis and Protection of Power System Cause (Transient Performance of Current Transformer)** Stafford, England.
- [12] Jodice, J.A. 1997. "Relay performance testing". IEEE Trans.on Power Delivery Vol.12 ,169-171.
- [13] Demetrios A.Tziouvaras, Chairman 2000. "Mathematical Models for Current, Voltage, and Coupling Capacitor Voltage Transformers." IEEE Trans. on Power Delivery. Vol.15, 62-72
- [14] Meidensha Corporation. 1993 Test Report of Tranformer and Bushing-Type Current Transformer Serial No. 8R8714T1.

- [15] Programma Electric AB. 2001. **USER'S MANUAL Relay testing system FREJA 300**, sweden
- [16] Héctor. O. Pascual, Jorge L. "Dampé Behaviour of Current Transformers (CT's) under severe saturation conditions." La Plata, Argentina
- [17] D. O'Kelly, 1977. "Simulation of Transient and Steady-state Magnetisation Characteristics with Hysteresis" IEE Proceedings, Vol.124, No.6, 578-582.

## ภาคผนวก ก.

## การแก้ไขไฟล์เริ่มต้น (startup file) ของโปรแกรม EMTP

การแก้ไขไฟล์เริ่มต้น (startup file) ของโปรแกรม EMTP ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะกำหนดรูปแบบของไฟล์ PL4 ให้สามารถนำไปใช้กับเครื่องทดสอบบริเลย์ Programma รุ่น Freja 300

ไฟล์ .PL4 มี 3 ชนิดคือ FORMATTED, UNFORMATED และ C-like ชนิดที่สามารถนำไปใช้กับโปรแกรม Freja Sim300 Disturbed Simulator ได้คือชนิด FORMATTED ซึ่งรูปแบบเป็น ASCII File โดยจะต้องแก้ไข ไฟล์เริ่มต้นให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

1	RHIGH	EPSZNO	EPWARN	EPSTOP	EPSUBA	EPDGEL	EPOMEG	SZPLT	SZBED	TENFLZ
	1.D+10	1.D-8	1.D-3	0.1	100.	1.D-16	1.D-15	10.0	72.0	10.
2	SIGMAX	TENERG	DEGMIN	DEGMAX	ZNOLIM(1), (2)	STATFR	ZNVREF	XMAXMX	AINCR	
	4.0	1.D+20	0.0	360.	1.0	1.5	50.0	1.D-6	2.0	.05
3	FREQFR	HLETT1	Unused	VHS	VS	VH	TAXISL	VAXISL	FILL1	FILL2
		0.25		8.0	1.0	10.	10.0	8.0	6.	7.0
4	TOLRCE	FHTAX	FXSUP	FYSUP	FXTIT	FYTIT	VPLOTS	VPLOTL	FACTVI	FTCARR
	8.E-5	0.5	.25	.03	0.10	0.1	1.0	5.0	0.0	1.5
5	FXNUMV	FXNUMH	FVAXTI	FXVERT	Unused	TIMTAC	OVRLAP	FLZERO	EPSILM	FLTINF
	1.5	5.0	-2.5	0.0		0.0	0.5	1.D-12	1.D-8	1.D+19
6	XHEADM	YHEADM	HGTHDM	XCASTI	YCASTI	HGTCST	XLEGND	YLEGND	HGTLGN	PIXPUN
	2.5	7.95	.55	0.5	7.3	.35	0.5	1.30	.25	40
7	XALPHA	YALPHA	HGTALF	D4FACT	PEKEXP	EPSLRT	EPSPIV	PLMARK	FACOSC	
	1.5	6.5	.25	-2.	43.8888	1.E-12	1.E-16	1.0	0.3	
8	NMAUTO	INTINF	KOL132	MUNIT5	MAXZNO	IPRSPY	IPRSPY	LNPIN	MINHAR	MAXHAR
	1	9999999	132	5	50	0	-1	6	0	20
9	NFOR32	NIOMAX	MRGN	LINLIM	MPAGE	MODE28	KPGRID	KPEN(1)	KPEN(2)	KPEN(3)
	30	10	2	100	0	1	3	12	10	11
10	.. (4)	KOMLEV	NSMTH	MODSCR	KOLALP	MAXFLG	LIMCRD	NOBLAN	MOUSET	NOTPPL
	14	-1	50	2	5	1	3000	0	0	1
1	NOCOMM	NOHELP	NEWPL4	Unused	Unused	NSMPLT	KOLWID	KOLSEP	JCOLU1	KSLOWR
	0	1	0	-111	-777	50	11	1	0	5
2	KSYMBL	NOBACK	KOLEXM	LTEK	NCUT1	NCUT2	INCHPX	INCHPY	NODPCX	LCHLIM
	200	1	60	1	13	11	2	2	0	0
3	NORUN	JTURBO	MAXSYM	IHS	LIMCOL	KLEVL	KEXTR	NOHPGL	NOPOST	IZGR1
	0	1	3	3	79	0	0	0	0	2
14	IZGR2	LENREC	LU6VRT	LRLIM	KASEND	LUNDAT	KTRPL4	JORIEN	LIMPNL	LUNTEX
	1	0	32768	75	5	3	-3	0	200	-11
5	KINSEN	LISTON	LIMTAC	NOCALC	MFLUSH	L4BYTE	KOMPAR	LISTO1	NOGNU	
	1	0	25	0	1000	0	0	0	0	
6	LUNIT1	LUNIT2	LUNIT3	LUNIT4	LUNIT5	LUNIT6	LUNIT7	LUNIT8	LUNIT9	LUNIT10
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
17	KS(1)	KS(2)	KS(3)	KS(4)	KP(1)	KP(2)	KP(3)	KP(4)	KOLROV	NUMHLD
	0	0	12	10	7	14	0	0	18	
18	Name of language font file	]	Window]	Root name for SPY	@K usage	]				
	\atp\blockd5l.bin		junk	inclspy	.dat					
9	SSONLY	CHEFLD	TEXNAM	CHVBAR	BRANCH	TXCOPY	USERID	-TRASH	-TERRA	CHRCOM
	PHASOR	E	DUM		NAME	COPY	EEUG98	.....	TERRA	C { } &
0	DATTYP	LISTYP	PCHTYP	PL4TYP	EFIELD	FMTPL4	PSCTYP	-BLANK		
	.dat	.lis	.pch	.pl4		10E8.2	.ps			

รูปที่ ก-1 การแก้ไข ไฟล์เริ่มต้น ของโปรแกรม EMTP เพื่อกำหนดรูปแบบของไฟล์ PL4 ให้เป็น

FOMATTED ASCII Text File

### Card 14. 7th Miscellaneous Integers

```
-----
14 IZGR2  LENREC  LU6VRT  LRLIM  KASEND  LUNDAT  KTRPL4  JORIEN  LIMPNL  LUNTEX
      0          0  32768      75      5      3      -4      0      200     -11
-----
```

**KTRPL4** ระบุเป็นค่า -3 เป็นการกำหนดให้ output file ทั้งหมด ที่มีนามสกุล .LIS, .PL4, และ .PCH มีชื่อเหมือนกับ source code file และ ถูกเก็บไว้ใน Drive C: แต่ถ้าเป็นค่า -4 ก็จะหมายถึงการกำหนดให้ output file ทั้งหมดถูกเก็บไว้ใน Drive D:

### Card 15. 8th Miscellaneous Integers

```
-----
5 KINSEN  LISTON  LIMTAC  NOCALC  MFLUSH  L4BYTE  KOMPAN  LIST01  NOGNU
      1          0      25      0     1000      1      0      0      1
-----
```

**L4BYTE** ระบุเป็นค่า 0 เพื่อกำหนดชนิดของ .PL4 ให้เป็นรูปแบบเป็น FORMATTED .PL4 file และ อาจจะกำหนดให้เป็นรูปแบบ C-like file หรือ UNFORMATTED .PL4 file. ก็ได้

### Card 20. A6 ALPHANUMERIC names, 2nd of 2 cards

```
-----
0 DATYTP  LISTYTP  PCHYTP  PL4YTP  EFIBLD  FMTPL4  PSCTYP  BLANK-
  .dat    .lis    .pch    .pl4      10E8.0  .ps
-----
```

**PCHYTP** เป็นการกำหนด punch file (\$PUNCH) ให้มีนามสกุลเป็น .PCH

**PCHYTP** เป็นการกำหนด plot file ให้มีนามสกุลเป็น .PL4

**FMTPL4** เป็นการกำหนดให้มีคอลัมน์ ใน source file ให้มีความยาวเท่ากับ 80 คอลัมน์

การป้อนข้อมูลโปรแกรม EMTP สำหรับแต่ละแบบจำลองจะต้องมีความถูกต้องเป็นไปตาม EMTP Rule book ซึ่งได้ถูกรวบรวมไว้เป็นคู่มือใช้งานมีจำนวนหน้าประมาณ 700 หน้า จะต้องศึกษาเพื่อให้เข้าใจในวิธีการ และหลักการใช้งาน การป้อนข้อมูลโปรแกรม EMTP แต่ละบรรทัดจะมีลักษณะคล้ายกับการเจาะบัตร (Card) เพื่อใช้สั่งให้เครื่องคอมพิวเตอร์ทำงาน โดยในหนึ่งบรรทัดของบัตรจะมี 80 คอลัมน์ ช่องว่างถือเป็นตัวอักษร 1 โดยในการวิเคราะห์แต่ละจะแบ่งเป็นกลุ่มข้อมูล ซึ่งมีจุดเริ่มต้นของข้อมูลเป็น BEGIN NEW DATA CASE และมีกลุ่มข้อมูลต่างๆ โดยสรุปดังนี้

กลุ่มที่ 1 (อาจไม่มีก็ได้) เป็นข้อมูลประเภทคำสั่งว่าจะให้เลือกทำสิ่งต่าง ๆ ที่ต้องการโดยเฉพาะ ตัวอย่างเช่น ให้ใช้ความถี่กำลังตามที่กำหนดใหม่แทนค่าที่กำหนดไว้ค่าเดิมซึ่งเปลี่ยนแปลงได้หรือเป็นคำสั่งที่เขียนเป็น subroutine มาใช้งาน

กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มข้อมูลสำหรับการกำหนดค่า time step (t) และเวลาสูงสุดที่จะวิเคราะห์ การเลือกชนิดของข้อมูลเช่นจะใช้ค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งมีหน่วยเป็น “ไมโครเฮนรี่” หรือค่าของตัวเก็บประจุซึ่งมีหน่วยเป็น “ไมโครฟารัด” หรืออีกวิธีคือการกำหนดเป็นค่ารีแอคแตนซ์ ซึ่งมีหน่วยเป็น “โอห์ม” ค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ การกำหนดประเภทของการแสดงผลที่ต้องการ การกำหนดการวิเคราะห์ให้เป็นแบบ simulation หรือให้ทำการคำนวณเพียงอย่างเดียวและการกำหนดให้พิมพ์ข้อความให้ทราบกรณีที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นเป็นต้น

กลุ่มที่ 3 (อาจไม่มีก็ได้) เป็นข้อมูลประเภทระบบควบคุมเพื่อใช้ในส่วนของ TACS

กลุ่มที่ 4 เป็นข้อมูลองค์ประกอบต่าง ๆ เช่นหม้อแปลง โหลด สายส่ง รวมไปถึงองค์ประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้น กลุ่มนี้จะต้องปิดท้ายด้วยบรรทัดว่าง

กลุ่มที่ 5 เป็นข้อมูลขององค์ประกอบประเภท สวิตช์ ไดโอด เอชไอหรือดีซีคอนเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นองค์ประกอบไม่เชิงเส้นแปรตามเวลา กลุ่มนี้ต้องปิดท้ายด้วยบรรทัดว่างเช่นกัน

กลุ่มที่ 6 เป็นข้อมูลของแหล่งจ่ายกระแสหรือแรงดันและข้อมูลของเครื่องกลไฟฟ้าที่ต้องการนำมาวิเคราะห์เกี่ยวกับไดนามิกของเครื่องนั้น ๆ และต้องปิดท้ายด้วยบรรทัดว่าง

กลุ่มที่ 7 (อาจไม่มีก็ได้) เป็นข้อมูลสำหรับกรณีต้องการป้อนค่า initial condition สำหรับการวิเคราะห์ทรานเซียนต์ หากไม่มีการระบุในกลุ่มนี้โปรแกรมจะทำการคำนวณให้เองโดยอัตโนมัติ

กลุ่มที่ 8 เป็นข้อมูลบอกถึงเอาต์พุต ที่ต้องการให้วิเคราะห์ให้เป็นตาราง ถ้าไม่ต้องการให้ใส่เป็นบรรทัดว่าง

กลุ่มที่ 9 (อาจไม่มีก็ได้) ลักษณะของแหล่งจ่ายกระแสหรือแรงดัน ที่ต้องการป้อนข้อมูลที่ละจุด กลุ่มนี้จะปิดท้ายด้วยบรรทัดที่พิมพ์ตัวเลข 9999

กลุ่มที่ 10 เป็นข้อมูลที่จะให้โปรแกรมทำการพล็อตกราฟหรือไม่ ต้องปิดท้ายด้วยบรรทัดว่าง ข้อมูลชุดนี้จะต้องลงท้ายด้วย BEGIN NEW DATA CASE และถ้าไม่ต้องการใส่ข้อมูลชุดถัดไป จะต้องใส่บรรทัดว่างหนึ่งบรรทัดเป็นการสิ้นสุดการป้อนข้อมูล

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW ธันวาคม, พฤศจิกายน 16, 2004
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Hjalal at SEFAS - NORWAY 1994-98
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  2.6E-5 .08 50. 50.
    500 1 1 1 1 0 0 1 0
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
  TRANSFORMER TX0001 0
    9999
  1XX0001 1.E-6 1.E-6 5.
  2XX0003 1.E-6 1.E-6 2.E3
  XX0005XX0006 .084 .843 0
  XX0008 8. 0
  96 XX0003 8888. 0.0 0
$INCLUDE, C:\hysdat\HYS25C-2.LIB
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  XX0003XX0008 MEASURING 1
  XX0006XX0001 .5 .1 0
  XX0011XX0005 MEASURING 1
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
  14XX0011 0 2693. 50. -90. -1. .5
/INITIAL
/OUTPUT
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK INITIAL
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

## รูปที่ ก-2 แสดงตัวอย่างไฟล์ Source code ของแบบจำลอง

ในปัจจุบันไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเขียน Source code เองให้ยุ่งยากเพราะได้มีโปรแกรมกราฟิกที่ชื่อ โปรแกรม ATPDraw มาช่วยในการสร้างแบบจำลอง เมื่อ รันโปรแกรมก็จะได้ไฟล์ที่เป็น Source code ซึ่งจะมีนามสกุลเป็น .atp

ตารางที่ ก-1 ส่วนประกอบต่างๆภายในโปรแกรม ATP-EMTP

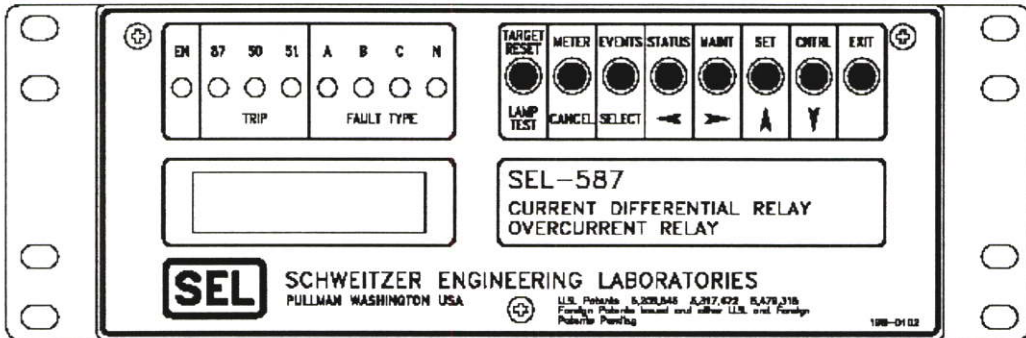
Component type	ATP Element Identification
SWITCHES	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ type 0 : Stand alone switches               <ul style="list-style-type: none"> <li>● Time-controlled switch</li> <li>● Voltage-controlled switch</li> <li>● MEASURING switch</li> </ul> </li> <li>◆ type 0 : Statistical switches               <ul style="list-style-type: none"> <li>● STATISTICS switch</li> <li>● SYSTEMATIC switch</li> </ul> </li> <li>◆ TACS/MODELS controlled switch               <ul style="list-style-type: none"> <li>● type 11 : Switch for diode and thyristor application</li> <li>● type 12 : Switch for spark gap and triac application</li> <li>● type 13 : Simple TACS/MODELS controlled switch</li> </ul> </li> </ul>
SOURCES	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Empirical Sources</li> <li>◆ Analytical Sources (voltage or current)               <ul style="list-style-type: none"> <li>● type 11 : Step function</li> <li>● type 12 : Ramp function</li> <li>● type 13 : Two-slope linearized surge function</li> <li>● type 14 : Cosine function / trapped charge</li> <li>● type 15 : Exponential surge function</li> <li>● type 16 : Simplified AC/DC converter model</li> <li>● type 18 : Ideal transformer / ungrounded voltage source</li> </ul> </li> <li>◆ TACS/MODELS controlled sources               <ul style="list-style-type: none"> <li>● TACS/MODELS modulation</li> <li>● TACS/MODELS controlled voltage/current source</li> </ul> </li> <li>◆ Rotating Machines               <ul style="list-style-type: none"> <li>● type 59 : Three-phase synchronous machine (prediction method)</li> <li>● type 58 : Three-phase synchronous machine (phase-domain solution)</li> <li>● type 19 : Universal Machine model</li> </ul> </li> </ul>

Component type	ATP Element Identification
<p style="text-align: center;">LINEAR BRANCHES</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ type 0 : Uncoupled lumped series RLC element</li> <li>◆ type 1,2,3,.. : Mutually coupled o-Circuit</li> <li>◆ type 51,52,53,.. : Mutually coupled RL elements</li> <li>◆ type -1,-2,-3,.. : Distributed parameter line models <ul style="list-style-type: none"> <li>● Constant parameter line model (Clark, K.C.Lee)</li> <li>● Special double-circuit distributed line</li> <li>● SEMLYEN line model</li> <li>● JMARTI line model</li> <li>● NODA line model</li> </ul> </li> <li>◆ Saturable TRANSFORMER component (multi winding) <ul style="list-style-type: none"> <li>● TRANSFORMER single-phase units</li> <li>● TRANSFORMER THREE PHASE with zero-sequence coupling <ul style="list-style-type: none"> <li>● IDEAL TRANSFORMER component</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>● BCTRAN supporting routine</li> <li>● KIZILCAT F-DEPENDENT (high order admittance branch)</li> <li>● CASCADED PI – type 1,2,3 element (for steady-state solution)</li> <li>● PHASOR BRANCH [Y] – type 51,52,53 element (for steady-state solution and Frequency Scan computation)</li> </ul>
<p style="text-align: center;">NONLINEAR BRANCHES</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ type 99 : Pseudo-nonlinear resistance</li> <li>◆ type 98 : Pseudo-nonlinear inductance</li> <li>◆ type 97 : Staircase time-varying resistance</li> <li>◆ type 96 : Pseudo-nonlinear hysteretic inductor</li> <li>◆ type 94 : User-defined component via MODELS</li> <li>◆ type 93 : True, nonlinear inductance</li> <li>◆ type 92 : - Exponential ZnO surge arrester <ul style="list-style-type: none"> <li>- Multi-phase, piece-wise linear resistance with flashover</li> </ul> </li> <li>◆ type 91 : Multi-phase time-varying resistance TACS/MODELS controlled resistance</li> <li>◆ User supplied Fortran nonlinear element</li> </ul>

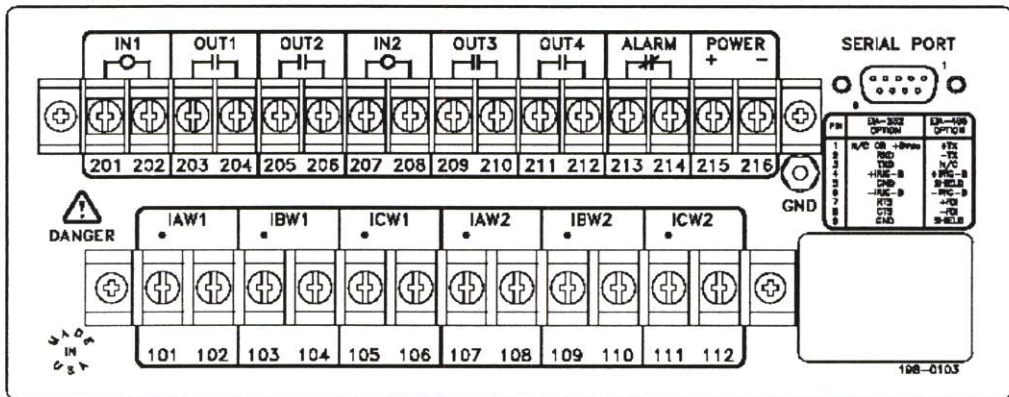
ภาคผนวก ข.

ข้อมูลรีเลย์ผลต่าง SEL-587

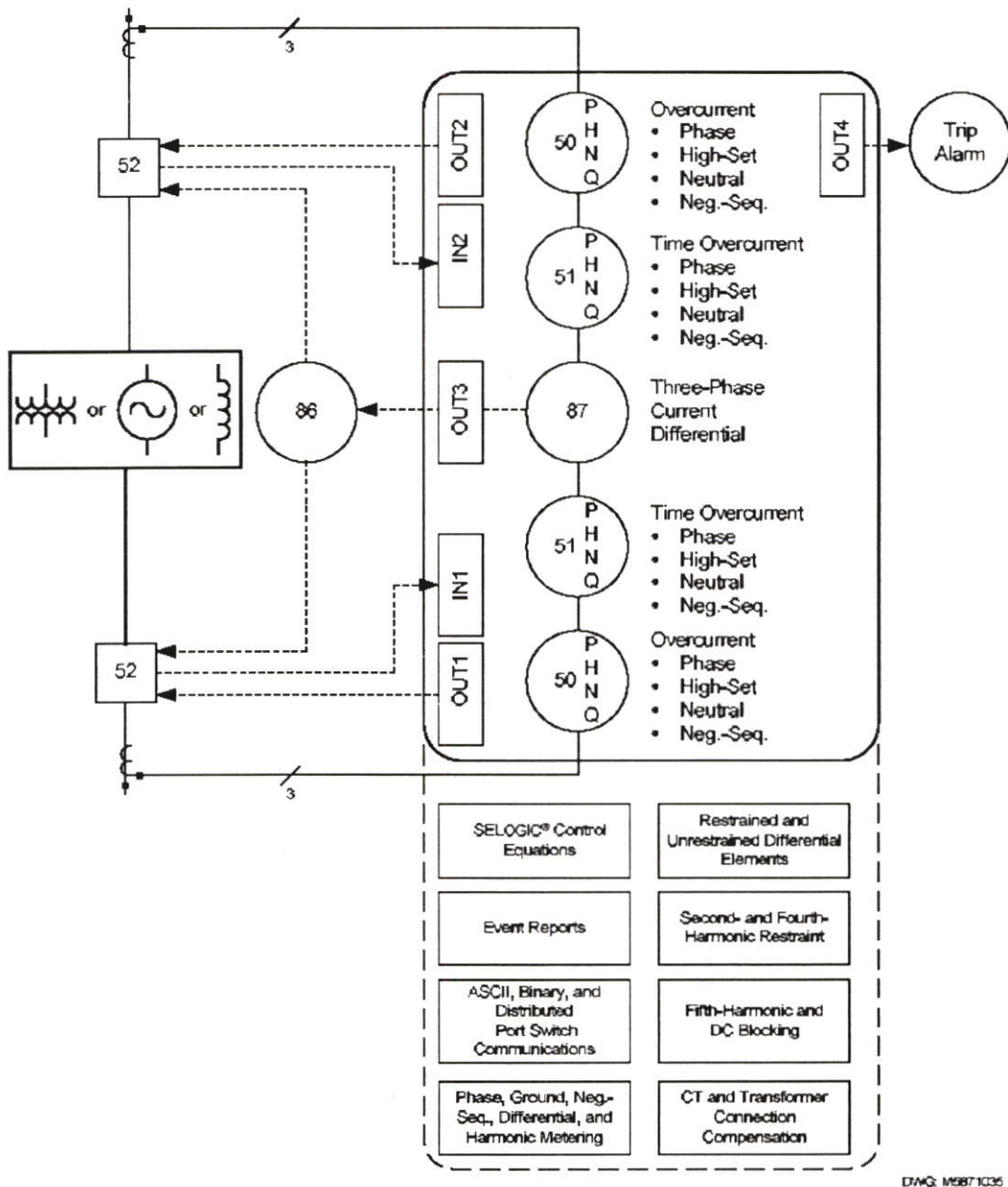
รีเลย์ผลต่าง SEL-587 เป็น รีเลย์กระแสต่างและรีเลย์กระแสเกินในตัวเดียวกันเป็นผลิตภัณฑ์ของ SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES (SEL) ประเทศ สหรัฐอเมริกา ซึ่งได้รับการอนุเคราะห์ให้ใช้ในการทดสอบจาก บริษัท เอบีบี จำกัด



รูปที่ ข-1 ภาพด้านหน้าของรีเลย์ SEL-587



รูปที่ ข-2 ภาพด้านหลังของรีเลย์ SEL-587



รูปที่ ข-3 ฟังก์ชันของรีเลย์ป้องกัน SEL-587

## แสดงข้อมูลจำเพาะของรีเลย์

**AC Current** 5 A nominal: 15 A continuous; 250 A for 1 second; linear to 100 A symmetrical

**Inputs** Limiting Dynamic Value: 625 A for 1 cycle (sinusoidal waveform)

Burden: 0.16 VA @ 5 A, 1.15 VA @ 15 A

1 A nominal: 3 A continuous; 100 A for 1 second; linear to 20 A symmetrical

Limiting Dynamic Value: 250 A for 1 cycle (sinusoidal waveform)

Burden: 0.06 VA @ 1 A, 0.18 VA @ 3 A

60/50 Hz system frequency and ABC/ACB phase rotation are user-settable.

**Output** The output type is dependent on the rear-panel terminal type. Output ratings were

**Contacts** determined with *IEC 255-0-20 : 1974*, using the simplified method of assessment.

### Standard (Conventional Terminal Blocks Option):

6 A continuous carry

30 A make per *IEEE C37.90 : 1989*

100 A for one second

270 Vac/360 Vdc MOV for differential surge protection

Pickup/dropout time: < 5 ms

Breaking Capacity (L/R = 40 ms):

24 V 0.75 A 10,000 operations

48 V 0.50 A 10,000 operations

125 V 0.30 A 10,000 operations

250 V 0.20 A 10,000 operations

Cyclic Capacity (L/R = 40 ms):

24 V 0.75 A 2.5 cycles per second

48 V 0.50 A 2.5 cycles per second

125 V 0.30 A 2.5 cycles per second

250 V 0.20 A 2.5 cycles per second

**High Current Interrupting (Plug-in Connectors Option):**

6 A continuous carry

30 A make per *IEEE C37.90 : 1989*

330 Vdc MOV for differential surge protection

Pickup time: < 5 ms

Dropout time: < 8 ms (typical)

Breaking Capacity: 10 A 10,000 operations

24, 48, and 125 V (L/R = 40ms)

250 V (L/R = 20ms)

Cyclic Capacity: 10 A 4 cycles in 1 second, followed by 2 minutes idle  
for thermal dissipation

24, 48, and 125 V (L/R = 40ms)

250 V (L/R = 20ms)

**Note:** Do not use high current interrupting output contacts to switch ac control signals.

These outputs are polarity-dependent.

**Optoisolated** The input type is dependent on the rear-panel terminal type. “Level-sensitive”

**Input Ratings** inputs differ

from “standard” jumper-selectable inputs in that they are guaranteed to deassert below a certain voltage level and they are not user-settable. The inputs are not polarity-dependent. With nominal control voltage applied, each input draws approximately 4 mA of current.

**Jumper-Selectable (Conventional Terminal Blocks Option):**

The conventional terminal blocks model is equipped with jumper-selectable inputs. Both inputs may be individually user-configured to operate on any of the following nominal voltages:

24 Vdc: on for 15 – 30 Vdc

48 Vdc: on for 30 – 60 Vdc

125 Vdc: on for 80 – 150 Vdc

250 Vdc: on for 150 – 300 Vdc

**Power Supply** 24 Volt\*: 16 – 36 Vdc

**Ratings** 48/125 Volt: 36 – 200 Vdc or 85 – 140 Vac  
 250 Volt: 85 – 350 Vdc or 85 – 264 Vac  
 3.5 watts nominal, 5.5 watts maximum.

\* The 24-volt power supply is polarity-dependent.

**Serial** Rear-panel 9-pin sub-D connector; 300, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, and

**Communications** 38400 baud; settable baud rate and data bit protocols.

**Metering** Instantaneous and Demand Ammetering functions

**Functions** Measurement Accuracy:  $\pm 2\%$ .

**Routine** Current inputs: 2500 Vac for 10 seconds

**Dielectric Test** Power supply, logic inputs, and contact outputs: 3000 Vdc for 10 seconds

The following *IEC 255-5 : 1977* dielectric test is performed on all units with the CE mark:

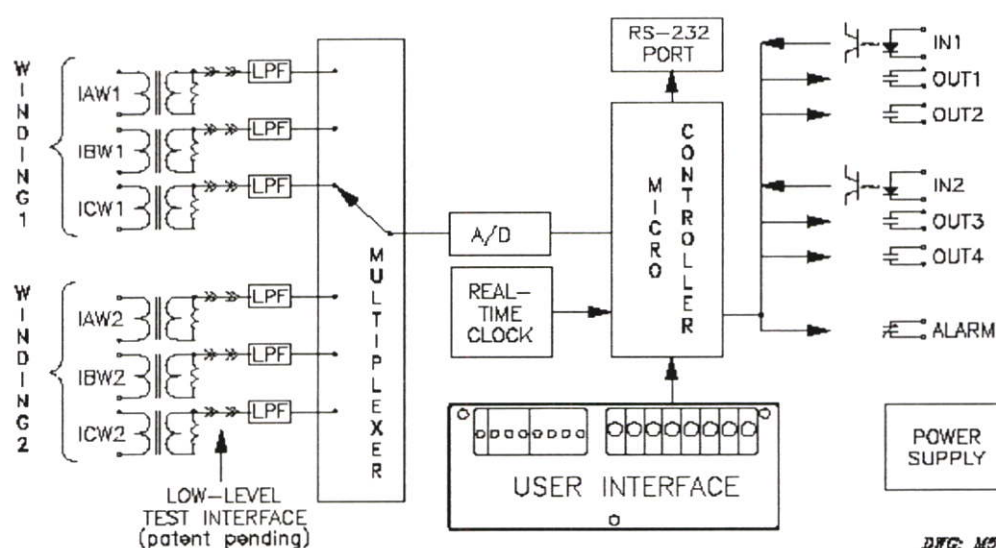
2500 Vac for 10 seconds on analog inputs.

3100 Vdc for 10 seconds on power supply, logic inputs, and contact outputs.

**Operating Temp.**  $-40^{\circ}$  to  $85^{\circ}\text{C}$  ( $-40^{\circ}$  to  $185^{\circ}\text{F}$ ).

**Dimensions** 8.81 cm x 21.59 cm x 23.37 cm (3.47" x 8.5" x 9.2") (H x W x D).

**Weight** 2.6 kg (5 lb, 12 oz).



รูปที่ ข-4 แสดงแผนผังการทำงานของ รีเลย์ SEL-587

ตารางที่ ข-1 แสดงข้อมูลในการตั้งค่ารีเลย์

General Data			
Description	Range		
Maximum Power Transformer Capacity	OFF, 0.2–5000 MVA in .1 steps	MVA =	_____
Winding 1 Line-to-Line Voltage	1–1000 kV	VWDG1 =	_____
Winding 2 Line-to-Line Voltage	1–1000 kV	VWDG2 =	_____
Transformer Connection	YY, YDAC, YDAB, DACDAC, DABDAB, DABY, DACY, OTHER	TRCON =	<u>YY</u>
CT Connection	DACDAC, DABDAB, DACY, DABY, YY, YDAB, YDAC	CTCON =	<u>YY</u>
Remove I0 from Wye Connection Compensation (SEL-587-1 Relay only)	Y, N	RZS =	_____
Winding 1 CT Ratio	1–50000	CTR1 =	_____
Winding 2 CT Ratio	1–50000	CTR2 =	_____
Demand Ammeter Time Constant	OFF, 5–255 min	DATC =	<u>15</u>
Phase Demand Ammeter Threshold	0.5–16 A      5 Amp 0.1–3.2 A      1 Amp	PDEM =	<u>1.0</u>
Negative-Sequence Demand Ammeter Threshold	0.5–16 A      5 Amp 0.1–3.2 A      1 Amp	QDEM =	<u>1.0</u>
Residual Demand Ammeter Threshold	0.5–16 A      5 Amp 0.1–3.2 A      1 Amp	NDEM =	<u>1.0</u>

Current TAPs			
Description			
Winding 1 Current TAP		TAP1 =	<u>1.0</u>
Winding 2 Current TAP		TAP2 =	<u>1.0</u>

Differential Elements			
Description	Range		
Restrained Element Operating Current Pickup	0.1–1.0 in per unit of tap	O87P =	<u>0.6</u>
Restraint Slope 1 Percentage	5–100%	SLP1 =	<u>10</u>
Restraint Slope 2 Percentage	OFF, 25–200%	SLP2 =	<u>100</u>
Restraint Current Slope 1 Limit	1–16 in per unit of tap	IRS1 =	<u>1</u>
Unrestrained Operating Current Pickup	1–16 in per unit of tap	U87P =	<u>16.0</u>
Second-Harmonic Blocking Percentage	OFF, 5–100%	PCT2 =	<u>15</u>
Fourth-Harmonic Blocking Percentage (SEL-587-1 Relay only)	OFF, 5–100%	PCT4 =	<u>-</u>
Fifth-Harmonic Blocking Percentage	OFF, 5–100%	PCT5 =	<u>5</u>
Fifth-Harmonic Alarm Threshold	0.1–3.2 in per unit of tap	TH5 =	<u>1</u>
Fifth-Harmonic Alarm Time-Delay Pickup	0.00–8000.00 cycles	TH5D =	<u>30</u>
DC Ratio Blocking (SEL-587-1 Relay only)	Y, N	DCRB =	<u>-</u>
Harmonic Restraint (SEL-587-1 Relay only)	Y, N	HRSTR =	<u>-</u>
Independent Harmonic Blocking	Y, N	IHBL =	<u>N</u>

## ภาคผนวก ค.

## ข้อมูลเครื่องทดสอบรีเลย์ FREJA 300

เครื่องทดสอบรีเลย์ Programma รุ่น Feja 300 นี้มีพัฒนาการในด้านของการทดสอบที่ทันสมัย มีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา สะดวกต่อการนำไปใช้ในโรงงานสนาม มีขีดความสามารถในการทดสอบเป็นที่ยอมรับในวงการการทดสอบรีเลย์ มีโปรแกรมช่วยอำนวยความสะดวกในการทดสอบ สามารถสร้างสัญญาณที่มี Harmonic นอกจากนี้ยังมีโปรแกรมช่วยแปลงไฟล์ต่าง ๆ เช่น EMTP, Comtrade ให้เป็นไฟล์มาตรฐานของเครื่องสามารถนำสัญญาณแรงดันหรือ กระแส ไปทำการทดสอบรีเลย์ได้



1. Binary inputs.
2. Binary outputs (normally-closed and normally-open).
3. Display and buttons used in the Local Mode.
4. Dial, press to Enter.
5. Multiconnector for voltage (L1U, L2U, L3U, NU) and current (L1I, L2I, L3I, NI).
6. Current and voltage outputs.
7. Switch, PC to Freja 300 or relay.
8. DC-supply, connect to (11) to read the values (in General mode page 5/6 on the display).
9. Analog inputs, LOW, for measurement transducers.
10. Fuse (50 mA) at the bottom, for Analog inputs LOW (9).
11. Analog inputs, HIGH, for volt- and ammeter.

รูปที่ ค-1 แสดงส่วนต่างๆ ที่อยู่ด้านหน้าเครื่องทดสอบรีเลย์ FREJA 300

ตารางที่ ก-1 แสดงข้อมูลจำเพาะของเครื่องทดสอบบรีเลย์ FREJA 300

<b>VOLTAGE OUTPUTS</b>		
<b>Range</b>	4-phase AC	4 x 150 V
	1-phase AC (L-L)	2 x 300 V
	DC (L-N)	180 V
<b>Power</b>	3-phase AC	3 x 82 VA at 150 V
	1-phase AC (L-L)	1 x 140 VA at 300 V
	DC (L-N)	87 W
<b>Resolution</b>	SW	10 mV
	HW	6.5 mV
<b>Accuracy<sup>4)</sup> (guaranteed)</b>	±0.01% of range +0.05% of reading	
<b>Distortion (THD+N)<sup>3)</sup></b>	0.02% typical (0.04% max)	
<b>CURRENT OUTPUTS<sup>1)</sup></b>		
<b>Range</b>	3-phase AC	3 x 15 A
	1-phase AC <sup>2)</sup>	1 x 45 A
	DC (L-N)	15 A
<b>Power</b>	3-phase AC	3 x 87 VA
	1-phase AC <sup>2)</sup>	1 x 250 VA
	DC (L-N)	3 x 87 W
<b>Resolution</b>	SW	1 mA
	HW	0.65 mA
<b>Accuracy<sup>4)</sup> (guaranteed)</b>	±0.01% of range +0.3% of reading	
<b>Distortion (THD+N)<sup>3)</sup></b>	0.1% typical (0.2% max)	
<b>GENERATORS, GENERAL</b>		
<b>Frequency range</b>	Continuous signals	DC - 2000 Hz
	Transient signals	DC - 3.5 kHz
<b>Frequency resolution</b>	1 mHz	
<b>Frequency accuracy</b>	0.01%	
<b>Phase angle range</b>	0 - 360°	
<b>Phase resolution</b>	0.1°	
<b>Phase accuracy<sup>4)</sup></b>	±0.1°	
<b>Connection (Amplifier outputs)</b>	4 mm banana connectors or 8-pin amplifier multiconnector	
<p>All seven generators are continuously and independently adjustable in amplitude and phase. No switching of range is necessary. All current and voltage outputs are fully overload- and short-circuit-proof and protected against external high voltage transient signals and overtemperature.</p> <p>1) For higher current or output power you can use amplifier CA3</p> <p>2) Parallel connection</p> <p>3) THD+N: Values at 50/60 Hz, at max amplitude, 50% power and resistive load. Measurement bandwidth 22 Hz - 22 kHz.</p> <p>4) For sinusoidal signals at 50/60 Hz</p>		
<b>DC AUXILLARY VOLTAGE OUTPUT</b>		
<b>Range</b>	20 - 210 V DC	
<b>Output power</b>	75 W at 210 V	

<b>TIMER/MEASURING SECTION</b>	
<b>Binary inputs</b>	
<b>Number</b>	10 Inputs (2 groups of 5 independent) dry or wet contacts 275 V DC, 240 V AC
<b>Internal resolution time</b>	50 $\mu$ s
<b>Galvanic isolation</b>	Galvanically separated from the amplifier section. Two galvanically separated groups: 1 to 5 and 6 to 10
<b>Max measuring time</b>	15264 h (636 days)
<b>Range / Resolution</b>	0 - 9.9 ms      0.1 ms 10 ms - 60 min      1 ms 1 h - 15264 h      1 s
<b>DC current measuring input, LOW</b>	
<b>Measuring range</b>	$\pm$ 20 mA
<b>Resolution</b>	SW      0.1 $\mu$ A HW      0.6 $\mu$ A
<b>Accuracy</b>	0.01% typical, 0.03% guaranteed (= 6 $\mu$ A)
<b>DC voltage measuring input, LOW</b>	
<b>Measuring range</b>	$\pm$ 10 V
<b>Resolution</b>	SW      0.1 mV HW      0.3 mV
<b>Accuracy</b>	0.01% typical, 0.03% guaranteed (= 3 mV)
<b>AC/DC current measuring input, HIGH<sup>5)</sup></b>	
<b>Measuring range</b>	$\pm$ 14 A DC, 10 A ACrms
<b>Accuracy</b>	DC <0.1%, AC <0.3%
<b>AC/DC voltage measuring input, HIGH<sup>5)</sup></b>	
<b>Measuring range</b>	$\pm$ 220 V DC, 150 V ACrms
<b>Accuracy</b>	DC <0.05%, AC <0.2%
5) 50 or 60 Hz AC + harmonics only	
<b>Measurement, Internally generated values</b>	
<b>Accuracy</b>	Voltage AC/DC <1% $\pm$ 1digit Current AC/DC <2% $\pm$ 2digit
<b>Binary outputs</b>	
<b>Number</b>	2 x 4 (NO & NC)
<b>Type</b>	Zero-potential contacts, controlled via software
<b>Break capacity AC</b>	240 V AC, max 8 A, max load 2000 VA
<b>Break capacity DC</b>	275 V DC, max 8 A, max load 240 W
<b>GENERAL</b>	
<b>Power requirements</b>	
<b>Voltage</b>	90 - 264 V AC single phase
<b>Frequency</b>	47 - 63 Hz
<b>Power consumption</b>	600 VA typical (1200 VA max)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอรรถรัตน์ นาวิกาวตาร
วัน เดือน ปีเกิด	22 เมษายน 2522
ที่อยู่	38/1 หมู่ 6 ตำบลควนทอง อำเภอชนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช 80210
ประวัติการศึกษา	2544 ปริญญาตรี สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ 2544 ปริญญาตรี สาขา รัฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ประวัติการทำงาน	2544 – ปัจจุบัน บริษัท เซฟตี้ โซลูชั่น จำกัด ตำแหน่ง วิศวกรระบบ 2548 – ปัจจุบัน บริษัท ซีคู เทคโนโลยี จำกัด ตำแหน่ง วิศวกรที่ปรึกษา
ผลการวิจัยที่ตีพิมพ์	<b>การจำลองสภาวะชั่วคราวของหม้อแปลงกระแสโดยใช้โปรแกรม ATP</b> อรรถรัตน์ นาวิกาวตาร มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ วิศวสารลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 2548.