



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การจำลองสถานะปรับตัวชั่วคราวของการลัดวงจรโดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

EMTP/ATP-Based Transient Short Circuit Fault Simulation for Percentage Transformer Differential Relay Performance Testing

นามผู้วิจัย นายโสฬส อวยพร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์สันติ อัสวศรีพงศ์ธร, M.Eng.Sc.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การจำลองสภาวะปรับตัวชั่วคราวของการลัดวงจรโดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP
เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

EMTP/ATP-Based Transient Short Circuit Fault Simulation
for Percentage Transformer Differential Relay Performance Testing

โดย

นายโสฬส อวยพร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โศภส อวยพร 2555: การจำลองสถานะปรับตัวชั่วคราวของการลัดวงจรโดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สันติ อัสวศรีพงศ์ธร, M.Eng.Sc. 228 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้ได้อธิบายถึงวิธีการทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานะปรับตัวชั่วคราว (Transient) โดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP สร้างแบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงทดสอบ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลทดสอบภาคสนามมาสร้างแบบจำลอง การทดสอบสมรรถนะของรีเลย์จะทดสอบภายใต้เงื่อนไขกระแสลัดเล็งสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าและการลัดวงจร โดยเอาต์พุตของโมเดลหม้อแปลงทดสอบอยู่ในรูปแบบของไฟล์ PL4 ซึ่งไฟล์ PL4 ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP/ATP สามารถนำไปใช้กับเครื่องทดสอบรีเลย์ที่มีการควบคุมการทำงานด้วยไมโครโพรเซสเซอร์ที่มีใช้งานอยู่ การทดลองสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้มุ่งเน้นไปที่ความน่าเชื่อถือภายใต้เงื่อนไขกระแสลัดเล็งสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าจากการปิดกลับอัตโนมัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทางโดยพิจารณาฟังก์ชันยับยั้งการทำงานด้วยฮาร์โมนิกส์ที่ 2 และเงื่อนไขลัดวงจรนอกเขตป้องกันและหม้อแปลงทดสอบด้วย โดยพิจารณาผลตอบแทนของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเชิงพาณิชย์จำนวน 2 ตัว ประโยชน์ของงานทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่สำคัญมี 2 ประการคือ ประการแรก กระบวนการที่ได้อธิบายในวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปใช้โดยการไฟฟ้าเพื่อการหาค่าเซตตั้งประสิทธิภาพสำหรับรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแต่ละตัวให้เหมาะกับการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้ากำลังครบทุกเงื่อนไขที่คาดว่าจะมีโอกาสเป็นไปได้ ประการที่สอง สามารถดำเนินการทดสอบรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของผู้ผลิตหลายๆ รายเพื่อเปรียบเทียบและคัดเลือกกรีเลย์ตัวที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานเฉพาะรายมากที่สุด ทำให้ระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีความมั่นคงและเชื่อถือได้ ไม่ทำให้เกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้าง เนื่องจากการทำงานผิดพลาดของรีเลย์

Sorot Auyporn 2012: EMTP/ATP-Based Transient Short Circuit Fault Simulation for Percentage Transformer Differential Relay Performance Testing. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Santi Asawasripongton, M.Eng.Sc. 228 pages.

This thesis describes the methodology for percentage transformer differential relay performance testing in transient condition. Digital model of power transformer and current transformer are established from EMTP/ATP program which using the field test report parameter. The testing consists of magnetizing inrush current and short circuit condition. The output of the current transformer model is PL4 format file which is compatible to the existing microprocessor-based relay test set available. The experimental work presented in this thesis focuses on the reliability evaluation of magnetizing inrush current effect from automatic reclosing of circuit breaker at the upstream substation by considering of 2nd Harmonics blocking function. The other topic for reliability evaluation is short circuit condition which has occurred at the out zone of power transformer protection which considering the response of two commercially available percentage transformer differential relays. The main benefits of this thesis work are twofold. Firstly, the procedures described in this thesis can be used by a utility to find optimum settings for each percentage transformer differential relay for a full range of expected power system contingencies. Secondly, the response of the tested percentage transformer differential relays from several manufacturer can be compared and the best relays selected for a specific application. They can make the transformer protection systems are secure and reliable which not cause extensive power outage due to malfunction of the relay.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.สันติ อัสวศรีพงศ์ธร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ที่ให้คำปรึกษา สนับสนุนด้านการเรียน และวางแผนงานการศึกษาค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจ
แก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี และ ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชา
วิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน และมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.คมสันต์ หงษ์สมบัติ และ ดร.ประดิษฐ์ เพื่องฟู ผู้ทรงคุณวุฒิ
ภายนอก จาก การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่สละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบ และ เสนอแนะให้
คำแนะนำการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา ตลอดจนเจ้าหน้าที่
ประสานงานโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำมาโดยตลอดจนสำเร็จ
การศึกษา

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่การไฟฟ้าส่วน
ภูมิภาค และขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัวและภริยาของข้าพเจ้า ที่ให้การส่งเสริม
สนับสนุน และเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัย

โสฬส อวยพร

กันยายน 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(14)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	39
อุปกรณ์	39
วิธีการ	40
ผลและวิจารณ์	61
สรุปและข้อเสนอแนะ	98
สรุป	98
ข้อเสนอแนะ	99
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	104
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก ข้อมูลคุณลักษณะ CT, หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง, ระบบไฟฟ้ากำลัง และ ค่าเซตตั้งของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์	107
ภาคผนวก ข ลักษณะรูปคลื่นกระแสลัดเลียงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าและกระแส ลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง	121
ภาคผนวก ค พฤติกรรมการตอบสนองของ CT เมื่อเกิดกระแสลัดเลียง สนามแม่เหล็กพุ่งเข้าและกระแสลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง	148
ภาคผนวก ง รูปคลื่นกระแสผลต่างและ Locus กระแสผลต่าง / กระแสต้าน การทำงานของรีเลย์	193
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	228

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	41
2	ผลการคำนวณหาค่ากระแสและแรงดันที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับโปรแกรมย่อย SATURA ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	45
3	ข้อมูลหม้อแปลงทดกระแสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์	50
4	องค์ประกอบต่างๆของแบบจำลองคิจิตอระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในโปรแกรม EMTP/ATP	52
5	ชื่อและขอบเขตของกรณีศึกษากลุ่ม A	54
6	ชื่อและขอบเขตของกรณีศึกษากลุ่ม B	56
7	ชื่อและขอบเขตของกรณีศึกษากลุ่ม C	57
8	ชื่อและขอบเขตของกรณีศึกษากลุ่ม D	58
9	ผลทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษากระแสลัดเล็งขนามแม่เหล็กพุ่งเข้า	64
10	ผลการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 ในกระแสผลต่างแปรผันตามมุมมองการเปิดวงจร, มุมองศาการปิดวงจร และปริมาณภาระโหลดเชื่อมต่อกรณีศึกษากลุ่ม A (เฉพาะกรณีรีเลย์ทำงาน)	79
11	ผลการวิเคราะห์กระแสผลต่างและระยะห่างระหว่างลูกคลื่นในกระแสผลต่างแปรผันตามมุมมองการเปิดวงจร, มุมองศาการปิดวงจร และปริมาณภาระโหลดเชื่อมต่อกรณีศึกษากลุ่ม A (เฉพาะกรณีที่รีเลย์ KBCH 120 ทำงาน)	81
12	ผลการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 ในกระแสผลต่างตามกรณีศึกษากลุ่ม B	84
13	ผลการวิเคราะห์ Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน ตามกรณีศึกษากลุ่ม B	85
14	ผลการวิเคราะห์ระดับ 2 nd Harmonic ในกระแสผลต่างของรีเลย์ รุ่น SEL 587 ตามกรณีศึกษากลุ่ม C	88
15	ผลการวิเคราะห์ระดับ 2 nd Harmonic ในกระแสผลต่างของรีเลย์ รุ่น SEL 587 ตามกรณีศึกษากลุ่ม D	92

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	ผลทดสอบรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษากลุ่ม B และ C	94
17	ค่าเวลาการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ตามกรณีศึกษากลุ่ม D	95
ตารางผนวกที่		
ก1	สรุปข้อมูล V_{rms} - I_{rms} และ $\lambda-i$ ที่ได้จากการใช้โปรแกรม SATURA ของ CT 300:1 A ใช้งานที่ความถี่กำลัง 50 Hz	110
ก2	สรุปข้อมูล V_{rms} - I_{rms} และ $\lambda-i$ ที่ได้จากการใช้โปรแกรม SATURA ของ CT 1800:1 A ใช้งานที่ความถี่กำลัง 50 Hz	110
ก3	ค่าอิมพีแดนซ์เทวินินของแหล่งกำเนิด (สถานีบางแสน) ที่อัตราส่วน X/R เท่ากับ 7.33	116
ก4	ข้อมูลค่าเซตตั้งของรีเลย์ รุ่น SEL 587	119
ก5	ข้อมูลค่าเซตตั้งของรีเลย์ รุ่น KBCH 120	120

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	รูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในขณะที่เปิดวงจรสวิตช์	6
2	รูปคลื่นกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า	7
3	การสับสวิตช์จ่ายไฟเข้าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีการต่อขดลวดแบบDyn1	8
4	ความสัมพันธ์ของมุมต่างๆในขณะเกิดกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า	9
5	วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าขณะเกิดการลัดวงจร แม่เหล็กตกค้าง	12
6	แนวโน้มน้ำกระแสผลต่าง (A) ที่ขนาดกระแสลัดวงจร 13 kA มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง 80 %	14
7	ลักษณะการลัดวงจรชนิดต่างๆ	15
8	วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงทดกระแสขณะเกิดกระแสลัดวงจร	16
9	แผนผังการทำงานของโปรแกรม EMTP/ATP	21
10	แบบจำลองที่ 1 ของหม้อแปลงทดกระแสที่ใช้ใน EMTP	23
11	แบบจำลองที่ 2 ของหม้อแปลงทดกระแสที่ใช้ใน EMTP	23
12	แบบจำลองที่ 3 ของหม้อแปลงทดกระแสที่ใช้ใน EMTP	24
13	การเลือกใช้อิมิตเตอร์เพื่อนำไปใช้คำนวณในโปรแกรม HYSDAT	24
14	เปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองที่ 3 ไม่มีอำนาจแม่เหล็กตกค้าง, เมื่อเลือกใช้อิมิตเตอร์ที่ 1 (รูปคลื่นหมายเลข 4) และ จดที่ 2 (รูปคลื่นหมายเลข 3) เป็นข้อมูลที่จะป้อนให้กับโปรแกรมย่อย HYSDAT	25
15	เปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองต่างๆ มีอำนาจแม่เหล็กตกค้าง	26
16	เปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองต่างๆ มีอำนาจแม่เหล็กตกค้างกลับขั้ว (Reverse Remanence)	26
17	หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส 2 ขดลวด	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง BCTRAN	32
19	การต่อวงจรใช้งานรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	35
20	เส้นกราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	35
21	เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ รุ่น KBCH 120	37
22	เส้นโค้งตอบสนองของแรงดันต่อกระแสกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) (ซ้าย), เส้นโค้งเอาท์พุทในรูปของฟลักซ์ต่อกระแส ($\Psi_{peak} - I_{peak}$) ที่ได้จากโปรแกรมย่อย SATURA ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์	47
23	เส้นโค้งตอบสนองของฟลักซ์แม่เหล็กต่อกระแส ($\Psi_{peak} - I_{peak}$) ที่ได้จากโปรแกรม HYSDAT สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์	48
24	แบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงทดกระแสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์	49
25	เส้นโค้งกระแสกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) (ซ้าย) และเส้นโค้งฟลักซ์ต่อกระแส ($\Psi_{peak} - I_{peak}$) ที่มีผลของฮิสเตอร์รีซิส (ขวา) ของหม้อแปลงทดกระแสด้านที่ใช้งานด้าน 115 kV	50
26	เส้นโค้งกระแสกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) (ซ้าย) และเส้นโค้งฟลักซ์ต่อกระแส ($\Psi_{peak} - I_{peak}$) ที่มีผลของฮิสเตอร์รีซิส (ขวา) ของหม้อแปลงทดกระแสด้านที่ใช้งานด้าน 23.1 kV	51
27	แบบจำลองดิจิทัลของระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่ายที่ใช้ในวิทยานิพนธ์	52
28	รูปคลื่นกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยมีอัตราส่วน X/R ของอิมพีแดนซ์เทวินินของแหล่งกำเนิดเท่ากับ 7.33 และ 20	66
29	รูปคลื่นกระแสลัดวงจรด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เมื่อเกิดลัดวงจรชนิด 1 เฟสลงดิน ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF1	67
30	รูปคลื่นกระแสลัดวงจรด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เมื่อเกิดลัดวงจรชนิดระหว่างเฟส ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF2	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
31	รูปคลื่นกระแสลัดวงจรด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เมื่อเกิดลัดวงจรชนิดสามเฟส ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF3	69
32	รูปคลื่นกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดกระแส กรณีศึกษา O90C30L10	71
33	รูปคลื่นกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดกระแส กรณีศึกษา O90C30L10	72
34	รูปคลื่นกระแสที่เกิดการอิ่มตัวในหม้อแปลงทดกระแสตามค่าอัตราส่วน X/R	76
35	รูปคลื่นกระแสที่เกิดการอิ่มตัวในหม้อแปลงทดกระแสตามค่าของเบอร์เดน	76
36	รูปคลื่นกระแสที่เกิดการอิ่มตัวในหม้อแปลงทดกระแสตามปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง -20% และ -80%	77
37	รูปคลื่นกระแสอิ่มตัวใน CT ตามปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง +20% และ +80%	83
38	Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงานของรีเลย์ ตามกรณีศึกษา B1R80NF1	86
39	Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงานของรีเลย์ ตามกรณีศึกษา C2R80B120F1	89
40	ระดับ 2 nd Harmonic ในกระแสผลต่างตามกรณีศึกษา C2R80B120F1	90
41	กราฟเปรียบเทียบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดลัดวงจรนอกเขตป้องกันและหม้อแปลงทดกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังอิ่มตัว กรณีศึกษากลุ่ม C	96
42	แผนภูมิเปรียบเทียบเวลาการทำงานของรีเลย์ที่ CT Burden ค่าต่างๆ กรณีศึกษากลุ่ม D	96
43	เส้นกราฟเปรียบเทียบเวลาการทำงานของรีเลย์ ที่ CT Burden ค่าต่างๆ กรณีศึกษากลุ่ม D	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ข้อมูลคุณลักษณะ Vrms-Irms ของ CT 300:1 A ระบบ 115 kV Accuracy class : 10P20 ที่ 50 Hz, Burden : 20 VA	108
ก2 ข้อมูลคุณลักษณะ Vrms – Irms ของ CT 1800:1 A ระบบ 22 kV Accuracy class : 5P20 ที่ 50 Hz, Burden : 20 VA	109
ก3 ผลทดสอบ Open Circuit Test ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 115/23.1 kV, 50 MVA, Dyn1 ผลิตภัณฑ์ DAIHEN ใช้งานที่สถานีไฟฟ้าบางแสน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	111
ก4 ข้อมูลผลทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์	112
ข1 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O0C180L10	122
ข2 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O0C270L10	123
ข3 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C0L10	124
ข4 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C270L10	125
ข5 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O180C0L10	126
ข6 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O270C180L10	127
ข7 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O0C30L10	128
ข8 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C30L10	129
ข9 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O0C270L80	130

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข10 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C270L80	131
ข11 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O180C0L80	132
ข12 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O270C80L80	133
ข13 รูปคลื่นกระแสและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จากกรณีศึกษา O90C30L80	134
ข14 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF1	136
ข15 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R80NF1	137
ข16 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF2	138
ข17 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R80NF2	139
ข18 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF3	140
ข19 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R80NF3	141
ข20 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R20PF1	142
ข21 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R80NF1	143
ข22 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R20PF2	144

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข23 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R80NF2	145
ข24 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R20PF3	146
ข25 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R80NF3	147
ค1 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O0C180L10	150
ค2 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O0C270L10	151
ค3 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C0L10	152
ค4 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C270L10	153
ค5 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O180C0L10	154
ค6 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O270C180L10	155
ค7 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O0C30L10	156
ค8 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C30L10	157
ค9 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O0C270L80	158
ค10 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C270L80	159

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก11 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O180C0L80	160
ก12 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O270C180L80	161
ก13 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C30L80	162
ก14 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF1	164
ก15 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R80NF1	165
ก16 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF2	166
ก17 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R80NF2	167
ก18 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF3	168
ก19 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R80NF3	169
ก20 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R20PF1	170
ก21 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R80NF1	171
ก22 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R20PF2	172
ก23 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R80NF2	173

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก24 พุทธกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R20PF3	174
ก25 พุทธกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R80NF3	175
ก26 พุทธกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา C1R80B120F1	177
ก27 พุทธกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา C1R80B120F2	178
ก28 พุทธกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา C1R80B120F3	179
ก29 พุทธกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา C2R80B120F1	180
ก30 พุทธกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา C2R80B120F2	181
ก31 พุทธกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา C2R80B120F3	182
ก32 พุทธกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB1F1	184
ก33 พุทธกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB2F1	185
ก34 พุทธกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB3F1	186
ก35 พุทธกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB1F2	187
ก36 พุทธกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB2F2	188

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก37 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB3F2	189
ก38 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB1F3	190
ก39 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB2F3	191
ก40 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB3F3	192
ง1 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา O0C270L10	195
ง2 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา O0C270L10	196
ง3 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา O270C180L10	197
ง4 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา O270C180L10	198
ง5 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา O90C30L10	199
ง6 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา O90C30L10	200
ง7 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา B1R80NF1	202
ง8 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา B1R80NF1	203
ง9 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา B1R80NF2	204
ง10 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา B1R80NF2	205
ง11 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา B1R80NF3	206
ง12 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา B1R80NF3	207
ง13 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา B2R80NF1	208
ง14 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา B2R80NF1	209
ง15 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา B2R80NF2	210
ง16 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา B2R80NF2	211
ง17 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา B2R80NF3	212
ง18 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา B2R80NF3	213

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง19	รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา C1R80B120F1	215
ง20	Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา C1R80B120F1	216
ง21	รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา C1R80B120F2	217
ง22	Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา C1R80B120F2	218
ง23	รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา C1R80B120F3	219
ง24	Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา C1R80B120F3	220
ง25	รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา DB3F1	222
ง26	Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา DB3F1	223
ง27	รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา DB3F2	224
ง28	Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา DB3F2	225
ง29	รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา DB3F3	226
ง30	Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา DB3F3	227

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Ψ	=	Magnetic Flux
λ	=	Flux Linkage
AC	=	Alternating Current
DC	=	Direct Current
IEEE	=	The Institute of Electrical and Electronics Engineering
EMTP	=	Electromagnetic Transient Program
ATP	=	Alternative Transient Program
CT	=	Current Transformer
SLG	=	Single Line-to-Ground Fault
LL	=	Phase-to-Phase Fault
3PH	=	Three Phase Fault

**การจำลองสถานะปรับตัวชั่วคราวของการลัดวงจรโดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP
เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงาน
ของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง**

**EMTP/ATP-Based Transient Short Circuit Fault Simulation
for Percentage Transformer Differential Relay Performance Testing**

คำนำ

การทดสอบรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยทั่วไปจะทดสอบในช่วงสภาวะอยู่ตัว ซึ่งจะทดสอบภายใต้เงื่อนไขกระแสลัดเลียงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าและการลัดวงจร โดยการทดสอบดังกล่าว ส่วนมากจะไม่พิจารณาภาระโหลดที่เชื่อมต่อด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มุมองศาสับจ่ายบนรูปคลื่นแรงดัน เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงทดกระแส ซึ่งความเป็นจริงเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงทดกระแสจะมีผลต่อรูปคลื่นกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยในสภาพการจ่ายไฟจริงบางครั้งรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทำงานผิดพลาด ในกรณีที่เกิดการปิดกลับอัตโนมัติของเซอกิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทางเนื่องจากเกิดฟอลต์ชั่วคราวที่สายส่งและอุปกรณ์ป้องกันทำงาน ทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง การทดสอบที่พิจารณาผลของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างและมุมสับจ่ายบนรูปคลื่นแรงดันดังกล่าว จำเป็นต้องพิจารณาผลในช่วงสภาวะปรับตัวชั่วคราวซึ่งจะให้ผลการทดสอบที่ตรงตามสถานการณ์ความเป็นจริงมากกว่าการทดสอบด้วยหลักการช่วงสภาวะอยู่ตัว เนื่องจากลักษณะสัญญาณที่ใช้ทดสอบมีความคล้ายคลึงกับรูปคลื่นที่เกิดขึ้นขณะใช้งานจริง วิธีการทดสอบรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในช่วงสภาวะปรับตัวชั่วคราวโดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP จะช่วยให้การทดสอบกระทำได้สะดวกมากยิ่งขึ้น โดยนำข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากการจำลองป้อนเข้าเครื่องทดสอบและแปลงให้เป็นสัญญาณแอนะล็อกเพื่อใช้ทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถนำไปใช้หาค่าเซตตั้งประสิทธิภาพและคัดเลือกรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้ระบบมีความมั่นคงในการจ่ายไฟและไม่ทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างเนื่องจากการทำงานผิดพลาดของรีเลย์

วัตถุประสงค์

1. สร้างกรณีศึกษาแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อเกิดกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าที่เกิดขึ้นจากการปิดกลับอัตโนมัติของเซอกิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทางภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกันของมุมมองการปิดกลับบนรูปคลื่นแรงดัน ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยที่สถานีไฟฟ้าปลายทางมีภาระโหลดค่าต่างๆเชื่อมต่ออยู่ เพื่อหาผลของลักษณะรูปคลื่นกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตามแต่ละกรณีศึกษา
2. สร้างกรณีศึกษาแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อเกิดการลัดวงจรนอกเขตป้องกันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกันของค่าอัตราส่วน X/R ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงทดกระแสและชนิดของการลัดวงจร เพื่อหาผลของลักษณะรูปคลื่นกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตามแต่ละกรณีศึกษา
3. นำผลของลักษณะรูปคลื่นกระแสตามแต่ละกรณีศึกษาในข้อ 1 และ 2 มาใช้เป็นค่าทางด้านปฐมภูมิสำหรับป้อนให้หม้อแปลงทดกระแสที่มีแบบจำลองตามที่กำหนดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมรูปคลื่นกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดกระแส
4. นำรูปคลื่นผลตอบสนองของกระแสด้านทุติยภูมิที่ได้จากแบบจำลองของหม้อแปลงทดกระแสตามที่กำหนดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตามแต่ละกรณีศึกษาในข้อ 3 แปลงเป็นสัญญาณแอนะล็อกป้อนผ่านเครื่องทดสอบรีเลย์ เพื่อทำการตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

การตรวจเอกสาร

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นบริภัณฑ์ที่ใช้ปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้มีระดับแรงดันที่เหมาะสม ที่จะจ่ายไฟให้กับกลุ่มผู้ใช้ไฟต่างๆ หรือทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าจากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่ง ที่ระดับความถี่เดียวกัน โดยวิธีการเปลี่ยนทั้งค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจึงเป็นบริภัณฑ์ด้านทางหลักที่มีบทบาทสำคัญในการจ่ายไฟ อีกทั้งยังเป็นบริภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์อื่นๆ ที่อยู่ภายในสถานีย่อยไฟฟ้า ระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจึงต้องมีความเชื่อถือได้ มีความมั่นคงและต้องสามารถแยกแยะการทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำภายใต้สถานการณ์ต่างๆ เช่น การลัดวงจร การเกิดกระแสล่อเลี้ยง สนามแม่เหล็กพุ่งเข้า ในการออกแบบระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ (> 10 MVA) โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้รีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ (Percentage Differential Relay) เป็นระบบป้องกันหลัก (Primary Protection) ซึ่งเป็นระบบป้องกันแบบหนึ่งหน่วย (Unit Protection) จะทำงานแบบทันทีทันใด (Instantaneous) ไม่หน่วงเวลาเมื่อตรวจจับพบกระแสลัดวงจรในเขตป้องกัน และมีขนาดเกินค่าเซตติ้ง ดังนั้นเมื่อเกิดสิ่งรบกวน (Disturbance) หรือเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีผลต่อรูปคลื่นกระแสที่เป็นสัญญาณแอนะล็อกอินพุตป้อนให้กับรีเลย์ รีเลย์จะต้องตัดสินใจได้อย่างถูกต้องแม่นยำภายในระยะเวลาไม่เกิน 2 ไซเคิล ถ้ารีเลย์ตัดสินใจทำงานผิดพลาดในสภาวะเกิดสิ่งรบกวนภายนอกเขตป้องกันก็จะทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างมีผลกระทบต่อกิจกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้า หรือถ้ารีเลย์ตัดสินใจไม่ทำงานในสภาวะที่เกิดลัดวงจรภายในเขตป้องกันก็จะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังชำรุดเสียหายจนอาจไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อไปได้ ดังนั้นการทดสอบ หรือการตรวจสอบการทำงานของรีเลย์ จึงเป็นสิ่งจำเป็นและมีความสำคัญอย่างมาก เพื่อให้ระบบป้องกันมีความน่าเชื่อถือ

การทดสอบรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปใช้หลักการทางเฟสเซอร์ (Phasor-Based Test) เป็นพื้นฐานในการทดสอบ ซึ่งในบางครั้งผลการตอบสนองของรีเลย์บางตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยหลักการดังกล่าวอาจไม่ตรงตามความเป็นจริงทั้งหมด เนื่องจากการเกิดกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าหรือการเกิดลัดวงจร ช่วงสภาวะแรกคือช่วงสภาวะปรับตัวชั่วคราวแล้วจึงเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ดังนั้นในการทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบในช่วงสภาวะปรับตัวชั่วคราว ซึ่งลักษณะของสัญญาณที่ใช้จะมีความคล้ายคลึงกับรูปคลื่นที่เกิดขึ้นขณะใช้งานจริง จุดมุ่งหมายหลักในการทดสอบรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายในช่วงสภาวะปรับตัวชั่วคราวมี 2 ประการ คือ ประการแรก เพื่อให้มั่นใจได้ว่ารีเลย์จะสามารถทำงานได้อย่าง

ถูกต้องภายใต้สภาวะวิกฤตที่สุด เช่น เกิดการล้มตัวของหม้อแปลงทดกระแส หรือเกิดสภาวะกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า ประการที่สอง เพื่อกำหนดค่าความชันของเส้นคุณสมบัติการทำงานของรีเลย์และกำหนดค่ากระแสผลต่างที่ไม่ขึ้นกับกระแสด้านการทำงานของรีเลย์ (Unrestrained pick up setting) การทดสอบรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในช่วงสภาวะปรับตัวชั่วคราวจะทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ใน 3 กรณี คือ (Stringer *et al.*, 1997)

1. เกิดลัดวงจรนอกเขตป้องกันแบบมีส่วนประกอบกระแสตรงสูงสุดและหม้อแปลงทดกระแสล้มตัว
2. เกิดกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าสูงสุดและมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างภายในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
3. เกิดลัดวงจรภายในเขตป้องกันด้านแหล่งกำเนิดและหม้อแปลงทดกระแสล้มตัว

ค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อลักษณะรูปคลื่นกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

เมื่อระบบไฟฟ้ากำลังเกิดสิ่งรบกวน เช่น การเกิดกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า หรือเกิดการลัดวงจรขึ้น สัญญาณรูปคลื่นกระแสมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างไปจากสภาวะปกติเดิม โดยที่เปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขของสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องและมีผลกระทบต่อการลักษณะของรูปคลื่นกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้น ได้แก่ค่าตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อลักษณะรูปคลื่นกระแสกรณีเกิดกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า
 - 1.1 ค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
 - 1.2 ลักษณะการต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
 - 1.3 มุมองศาการปิดวงจร
 - 1.4 การะโหลดเชื่อมต่อ

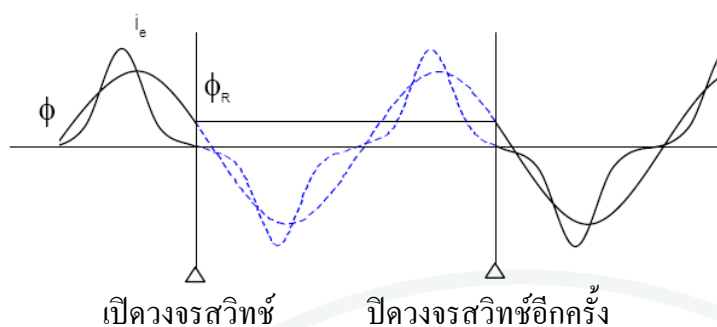
2. ค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อลักษณะรูปคลื่นกระแสกรณีเกิดการลัดวงจร

- 2.1 ค่าอัตราส่วน X/R ของอิมพีแดนซ์
- 2.2 มุมองศาการเกิดลัดวงจรบนรูปคลื่นแรงดัน (Fault Inception Angle)
- 2.3 ค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงทดกระแส
- 2.4 ชนิดของการลัดวงจร
- 2.5 หม้อแปลงทดกระแส

1. ค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อลักษณะรูปคลื่นกระแสกรณีเกิดกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า

1.1 ค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

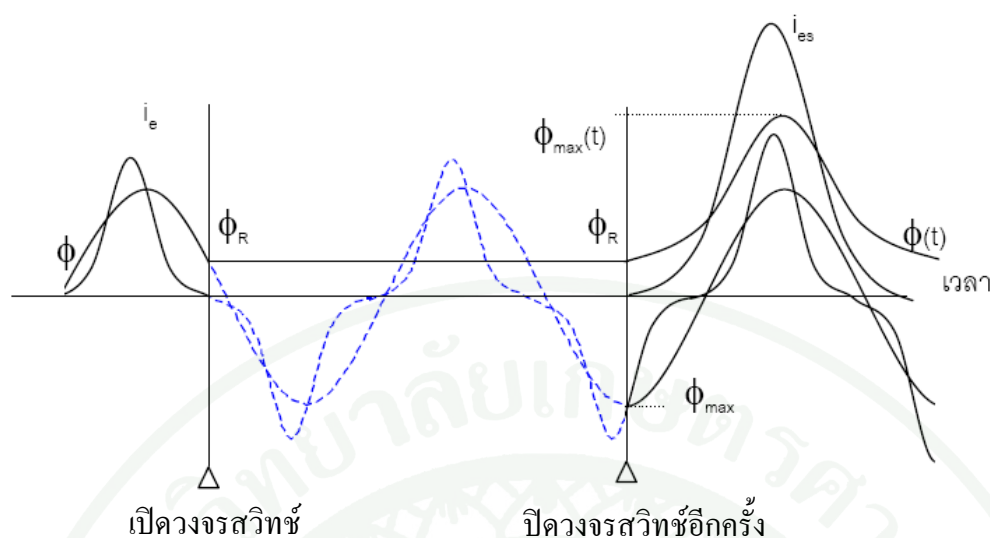
เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังถูกจ่ายไฟเป็นเวลานานจนกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กเข้าสู่สภาวะปกติ จากความสัมพันธ์เส้นแรงแม่เหล็ก กับ แอมแปร์-รอบ ตาม B-H curve จะได้กระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็ก ที่ผิดรูปร่างไปจากรูปคลื่นไซน์ ขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กมีรูปร่างใกล้เคียงหรือเป็นรูปคลื่นไซน์ เมื่อเปิดวงจรสวิตช์ ตรงตำแหน่งในภาพที่ 1 ขณะที่กระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็ก (i_c) เป็นศูนย์ แต่ เส้นแรงแม่เหล็ก ที่เกิดตามวงรอบฮิสเตอร์รีซิสแม่เหล็ก จะยังคงมีค่า ϕ_R ตกค้างอยู่ในแกนเหล็ก ถ้าเวลาผ่านไปปิดวงจรสวิตช์อีกครั้ง ในขณะที่ปิดวงจรสวิตช์บนรูปคลื่นของแรงดันที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก เท่ากับ ϕ_R ที่ตกค้างอยู่ในแกนเหล็ก (เนื่องจาก ϕ จะนำหน้าแรงดันหนึ่งวินาที 90° : $e = d\phi/dt$) จะเกิดกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กต่อเนื่องไปอย่างปกติ เพราะตามปกติ เส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ดังนั้นในการปิดวงจรสวิตช์เพื่อทำการจ่ายไฟ ถ้าสามารถควบคุมตำแหน่งการปิดวงจรสวิตช์บนรูปคลื่นแรงดันให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับการเปิดวงจรสวิตช์ในช่วงแรกก่อนที่จะทำการจ่ายไฟ ก็จะไม่เกิดกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า เนื่องจากกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการปิดวงจรสวิตช์ในครั้งนี้มีรูปคลื่นที่ต่อเนื่องกับรูปคลื่นกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กเดิมในช่วงที่มีการเปิดวงจรสวิตช์ก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามตามข้อปฏิบัติไม่สามารถเลือกจังหวะที่เหมาะสมได้ จึงไม่สามารถควบคุมหรือหลีกเลี่ยงกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าได้



ภาพที่ 1 รูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในขณะที่เปิดวงจรสวิตช์

ในขณะที่ Φ_R ตกค้างเป็นชั่วบวตามเงื่อนไขของการเปิดวงจรสวิตช์ในครั้งแรก และเมื่อมีการปิดวงจรสวิตช์เพื่อจ่ายไฟ โดยแรงดันที่เกิดขึ้นจากการจ่ายไฟจะมีผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กในสถานะปกติที่ค่าขดมีค่าเป็นลบ ($-\Phi_{max}$) ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะเริ่มเพิ่มขึ้นจากเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก (Φ_R) แทนที่จะเริ่มจาก $-\Phi_{max}$ เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็ก ไม่สามารถเพิ่มหรือลดได้ในทันทีทันใด

ตามทฤษฎีจะได้ค่า Φ_{max} ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ $2\Phi_{max} + \Phi_R$ ปริมาณนี้จะเป็นได้ทั้งด้านบวกและลบ จะเห็นได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการปิดวงจรสวิตช์เพื่อทำการจ่ายไฟ มีค่าขดเป็น 2 เท่าของ Φ_{max} ปกติ ดังแสดงในภาพที่ 2 เพราะเส้นแรงแม่เหล็ก จะต้องเริ่มจากสถานะภาพเดิมที่มีอยู่ในแกนก่อนเสมอ จะเปลี่ยนจาก Φ_R เป็น $-\Phi_{max}$ ขณะปิดวงจรสวิตช์ที่ $t=0$ ไม่ได้ โดยในช่วงแรกต้องสร้าง di/dt เพื่อให้เกิดแรงดันเท่ากับแรงดันแหล่งจ่าย กระแสที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กจึงเกิดเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ 1 จะเป็นกระแสที่มีการแกว่งของความถี่เท่ากับความถี่ระบบ และส่วนที่ 2 คือกระแสที่เป็นส่วนประกอบกระแสตรง ซึ่งจะมีรูปร่างเป็น Exponential มี Time Constant เป็น L/R กระแสทั้ง 2 ส่วนจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก ให้มีการแกว่ง โดยเริ่มต้นจาก Φ_R ตกค้าง เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กรวมมีค่าถึงเส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัวของแกนเหล็ก จะทำให้กระแส Inrush พุ่งขึ้นสูงมาก ดังนั้นค่า Time Constant ของวงจร L/R จะไม่คงที่ เนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก



ภาพที่ 2 รูปคลื่นกระแสหลักของแม่เหล็กฟุ้งเข้า

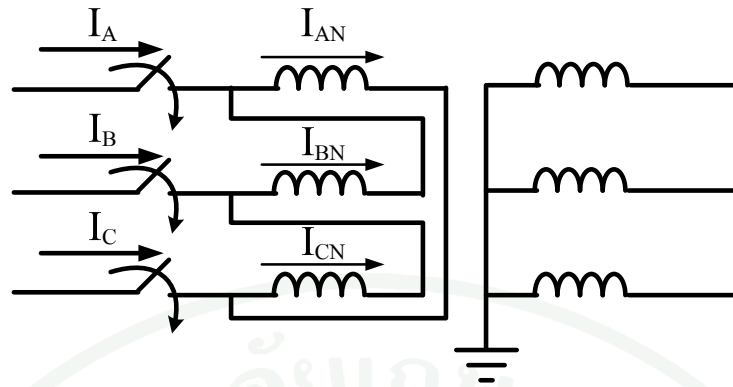
ในการหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1) (Ebner, 2007)

$$\phi_{RES} = \phi_0 \cos(\omega_0 t_{open}) \quad (1)$$

ϕ_{RES}	เส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง
ϕ_0	เส้นแรงแม่เหล็กในสภาวะอยู่ตัว
ω_0	ความเร็วเชิงมุมของเส้นแรงแม่เหล็กในสภาวะอยู่ตัว
t_{open}	ค่าเวลาขณะเปิดวงจรสวิตช์

1.2 ลักษณะการต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ในการสับสวิตช์จ่ายไฟเข้าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีการต่อขดลวดแบบเดลต้า-วาย กระแสล่อเลียงสนามแม่เหล็กฟุ้งเข้าที่เกิดขึ้นจากการสับสวิตช์จ่ายไฟเข้าขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังด้านเดลต้าจะเป็นกระแสสายที่เกิดจากการคำนวณมาจากกระแสเฟสที่ใหญ่ในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทั้ง 3 เฟส ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษากระแสล่อเลียงสนามแม่เหล็กฟุ้งเข้าที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีการต่อขดลวดแบบ Dyn1 ซึ่งมีการเชื่อมต่อใช้งานดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การสับสวิตช์จ่ายไฟเข้าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีการต่อขดลวดแบบ Dyn1

ในการคำนวณหากระแสต่อเล็งขดลวดแม่เหล็กพุ่งเข้าที่เกิดจากการสับสวิตช์จ่ายไฟเข้าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีการต่อขดลวดแบบ Dyn1 สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2), (3) และ (4) (Yacamini and Nasser, 1986)

$$I_A = I_{AN} - I_{BN} \quad (2)$$

$$I_B = I_{BN} - I_{CN} \quad (3)$$

$$I_C = I_{CN} - I_{AN} \quad (4)$$

รูปคลื่นกระแส I_{AN} , I_{BN} และ I_{CN} ขึ้นอยู่กับข้อของรูปคลื่นแรงดันแหล่งจ่าย มุมองศาในการสับจ่ายบนรูปคลื่นแรงดันและเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ค่ากระแส I_{AN} , I_{BN} และ I_{CN} คำนวณได้ตามสมการที่ (5) (Rahman and Gangopadhyay, 1986)

$$i = \frac{\sqrt{2}E \cdot X}{Z^2} \left[\frac{R}{X} \cdot \sin(\omega t' + \lambda) - \cos(\omega t' + \lambda) - e^{\frac{R}{X}(\theta_s - \omega t')} \left\{ \frac{R}{X} \sin(\theta_s + \lambda) - \cos(\theta_s + \lambda) \right\} \right] \quad (5)$$

โดยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสับสวิตช์จ่ายไฟที่มุม $\lambda = \omega$ และปรับแกนเวลาให้เป็น $t' = 0$ ดังนั้น $t' = t - \frac{\lambda}{\omega}$ แทนค่า t' ในสมการที่ (5) จะได้สมการที่ (6)

$$i = \frac{\sqrt{2}E \cdot X}{Z^2} \left[\frac{R}{X} \cdot \sin(\omega t) - \cos(\omega t) - e^{\frac{R}{X}(\omega t - \theta_s - \lambda)} \left\{ \frac{R}{X} \sin(\theta_s + \lambda) - \cos(\theta_s + \lambda) \right\} \right]$$

(6)

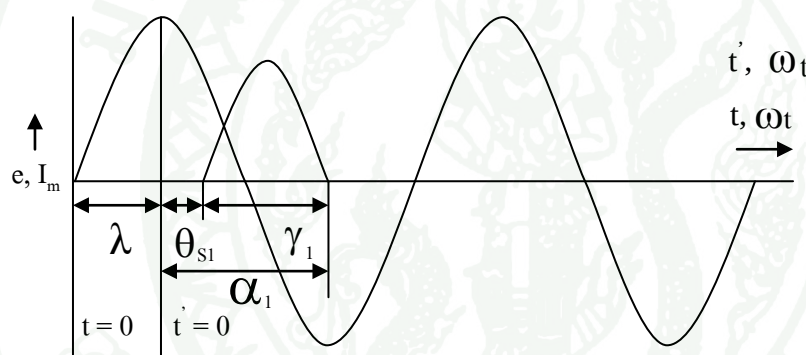
E แรงดันของแหล่งจ่าย (R.M.S.)

R ค่าความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

X ค่ารีแอคแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

θ_s มุมอิมิตัวโดยวัดจาก $t' = 0$



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ของมุมต่างๆในขณะเกิดกระแสล่อเลียงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า

ตามภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง θ_s , λ , α และ γ โดย λ คือมุมในการสับจ่ายไฟเข้าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จากภาพที่ 4 เมื่อค่ากระแสมีค่าเป็นศูนย์ที่มุม $\omega t' = \alpha$, จะได้ว่า

$$\left[\frac{R}{X} \cdot \sin(\omega t) - \cos(\omega t) - e^{\frac{R}{X}(\omega t - \theta_s - \lambda)} \left\{ \frac{R}{X} \sin(\theta_s + \lambda) - \cos(\theta_s + \lambda) \right\} \right] = 0$$

(7)

กำหนดให้

$$\gamma = \alpha - \theta_s$$

(8)

เมื่อ γ คือมุมนำกระแส สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (9)

$$\tan(\alpha + \lambda) = \frac{e^{\frac{R}{X}\gamma} - \frac{R}{X} \sin(\gamma) - \cos(\gamma)}{\frac{R}{X} e^{\frac{R}{X}\gamma} + \sin(\gamma) - \frac{R}{X} \cos(\gamma)} \quad (9)$$

จากสมการที่ (5) กระแสจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ $\frac{di}{dt} = 0$ ถ้ากระแสมีค่ามากที่สุดที่มุม $\omega t' = \beta$

ดังนั้นเมื่อทำการ differential สมการที่ (6) และแทนค่า $\omega t' = \beta$ จะได้

$$\frac{R}{X} \cos(\beta + \lambda) + \sin(\beta + \lambda) + \frac{R}{X} e^{\frac{R}{X}(\theta_s - \beta)} \left\{ \frac{R}{X} \sin(\theta_s + \lambda) - \cos(\theta_s + \lambda) \right\} = 0 \quad (10)$$

จากสมการที่ (6) และ (10) จะได้ค่ากระแสสูงสุด คือ

$$I_{p_max} = \frac{\sqrt{2E}}{X} \cdot \left(\frac{X}{R} \right) \sin(\beta + \lambda) \quad (11)$$

1.3 มุมองศาการบิดวงจร

ในการสับจ่ายไฟเข้าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มุมองศาต่างๆในการสับจ่ายบนรูปคลื่นแรงดัน จะมีผลกับขนาดของกระแสลัดเลียงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าแตกต่างกัน เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นขณะสับจ่ายมีขนาดต่างกัน โดยถ้าเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ขนาดของกระแสลัดเลียงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าก็จะเพิ่มขึ้น ตามเส้นคุณลักษณะ B – H การคำนวณหาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่มุมสับจ่ายไฟต่างๆเป็นไปตามสมการที่ (12), (13) และ (14) (Yacimini and Nasser, 1986)

$$B_a(t) = B_{ar} + B_{max} [\cos(\alpha) - \cos(\omega t + \alpha)] \quad (12)$$

$$B_b(t) = B_{br} + B_{max} \left[\cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (13)$$

$$B_c(t) = B_{cr} + B_{max} \left[\cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) - \cos\left(\omega t + \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (14)$$

α	มุมสับจ่าย
B_{ar}, B_{br}, B_{cr}	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างเฟส A, B และ C ตามลำดับ
B_{max}	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในสภาวะอยู่ตัว

จากสมการที่ (12) พบว่าเมื่อแทนค่า $\alpha = 0$ องศา ทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเฟส A มีค่าสูงที่สุด และจะมีค่าสูงเป็นสองเท่าของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในสภาวะอยู่ตัวที่เวลาครึ่งไซเคิล และเมื่อแทนค่า $\alpha = 90$ องศา ทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าต่ำที่สุด เมื่อความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสูง ค่าเส้นแรงแม่เหล็กก็จะมีค่าสูง ทำให้ค่ากระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กมีค่าสูง เมื่อความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าต่ำ ค่าเส้นแรงแม่เหล็กก็จะมีค่าต่ำ ทำให้ค่ากระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กมีค่าสูง เป็นไปตามสมการที่ (15)

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (15)$$

B	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก
Φ	เส้นแรงแม่เหล็ก
A	พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก

1.4 ภาระโหลดเชื่อมต่อ

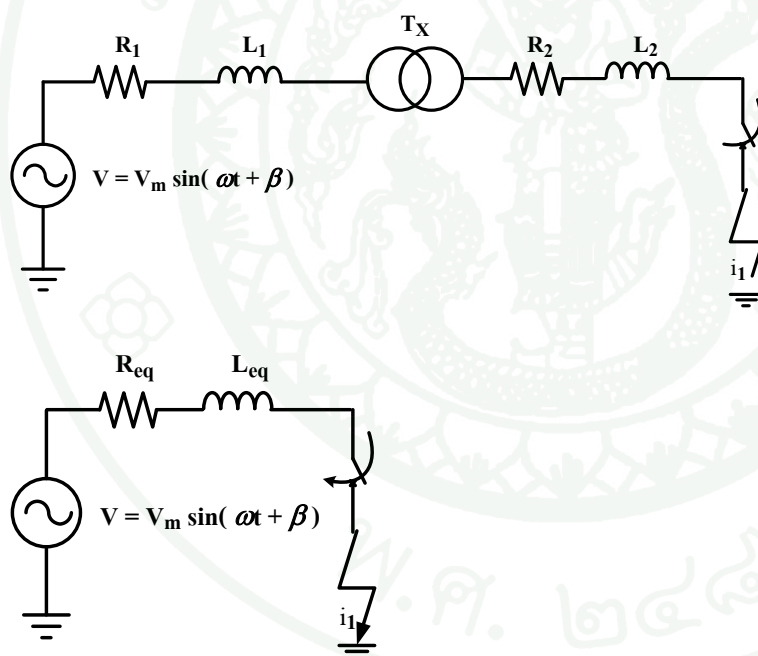
ภาระโหลดที่เชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่สถานีไฟฟ้าปลายทาง จะมีผลต่อปริมาณกระแสต้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งโดยปกติแล้วองค์ประกอบกระแสโหลดในสภาวะปกติจะเป็นองค์ประกอบที่ความถี่มูลฐาน (50 Hz) ซึ่งในกรณีที่มีการปิดกลับวงจรอัตโนมัติที่สถานีไฟฟ้าต้นทางโดยที่สถานีไฟฟ้าปลายทางมีภาระโหลดเชื่อมต่ออยู่ เมื่อพิจารณากระแสที่เกิดขึ้นด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จะมีองค์ประกอบที่เกิดจากกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ารวมกับองค์ประกอบกระแสที่ความถี่มูลฐานที่เกิดจากภาระโหลด ซึ่งในกรณีที่กระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าที่แฝงอยู่ในกระแสผลต่าง ที่เกิดจากการปิดกลับวงจรอัตโนมัติที่มุมมองค่าหนึ่งๆ มีผลน้อย (น้อยกว่าค่าเซตติง 2nd Harmonic Blocking) ประกอบกับปริมาณภาระโหลดที่เชื่อมต่ออยู่มีค่าน้อย ทำให้กระแสด้านการทำงานของรีเลย์มีค่าน้อย ในขณะที่ผลของกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามีมากกว่า ทำให้รีเลย์ทำงาน ในทางตรงกันข้าม ถ้าปริมาณภาระโหลดที่เชื่อมต่อมีปริมาณมาก มีผลให้กระแสด้านการทำงานของรีเลย์มีค่ามากกว่าผลของกระแสหล่อเลี้ยง

สนามแม่เหล็กพุ่งเข้า ทำให้รีเลย์ไม่ทำงาน ส่วนในกรณีที่มุมเปิดและปิดกลับวงจรอัตโนมัติทำให้ผลของกระแสล่อเลียงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าที่แฝงอยู่ในกระแสล่อต่างมีปริมาณมาก (มากกว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking) รีเลย์จะยับยั้งการทำงาน

2. ค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อลักษณะรูปคลื่นกระแสกรณีเกิดการลัดวงจร

2.1 ค่าอัตราส่วน X/R ของอิมพีแดนซ์

ค่าอัตราส่วน X/R คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างค่ารีแอคแตนซ์เทียบกับค่ารีซิสแตนซ์ของ อิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งจ่ายกับจุดที่เกิดการลัดวงจร เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้ากำลังขณะเกิดการลัดวงจรแสดงดังภาพที่ 5 และสามารถคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นได้ตามสมการที่ (17)



ภาพที่ 5 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้ากำลังขณะเกิดการลัดวงจร

$$i_1 = \hat{I}_1 \sin(\omega t + \beta - \varphi) - \hat{I}_1 \sin(\beta - \varphi) e^{\text{Reqt/Leq}} \quad (16)$$

$$\hat{I}_1 = \frac{V_m}{\sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2}} \quad (17)$$

$$\varphi = \tan^{-1}(\omega L_{eq} / R_{eq}) \quad (18)$$

จากสมการที่ (16) ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วยกระแส 2 ส่วน คือ ส่วนประกอบกระแสสลับ (AC Component) และส่วนประกอบกระแสตรง (DC Component) ซึ่งเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดการลัดวงจร ส่งผลแปรผันตรงต่อค่ากระแสลัดวงจรในส่วนประกอบกระแสตรง ดังนั้นเมื่อค่าอัตราส่วน X/R มีค่าเพิ่มมากขึ้นก็ทำให้ส่วนประกอบกระแสตรงเพิ่มขึ้นและมีผลให้ค่ากระแสลัดวงจรในช่วงสภาวะปรับตัวชั่วคราวมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

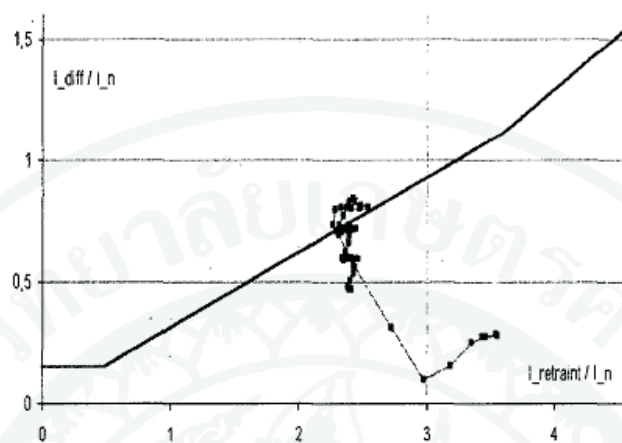
2.2 มุมองศาการเกิดลัดวงจรบนรูปคลื่นแรงดัน

จากสมการที่ (16) เมื่อพิจารณากระแสลัดวงจรส่วนประกอบกระแสตรง เห็นได้ว่าจะมีขนาดมากที่สุดที่ค่า $\hat{I}_1$ หนึ่งๆ ถ้าเทอม $\sin(\beta - \varphi)$ มีค่าเท่ากับ ± 1 หรือ $(\beta - \varphi)$ เท่ากับ $\pm \frac{\pi}{2}$ ดังนั้นเมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นที่มุม $\pm \frac{\pi}{2}$ บนรูปคลื่นแรงดันจะทำให้มีส่วนประกอบกระแสตรงที่มีขนาดมากที่สุดที่ค่า $\hat{I}_1$ ค่าหนึ่งๆ

2.3 ค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงทดกระแส

หม้อแปลงทดกระแสที่ใช้สำหรับระบบป้องกัน โดยทั่วไปแล้วมักจะมีกระแสลัดวงจรไหลผ่าน เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง และเมื่อระบบป้องกันทำงานส่งสัญญาณปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อกำจัดฟอลต์แล้ว ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงทดกระแสจะไม่ลดลงเป็นศูนย์ หรือมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง ซึ่งจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งและคงค้างอยู่ในแกนเหล็ก จนกว่าจะเกิดฟอลต์ครั้งใหม่ เพื่อหักล้างเส้นแรงแม่เหล็กเดิมในกรณีที่มิ้วของเส้นแรงแม่เหล็กหักล้างกัน แต่ถ้าฟอลต์ที่เกิดขึ้นใหม่ทำให้มิ้วของเส้นแรงแม่เหล็กเสริมกัน ก็จะทำให้ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้หม้อแปลงทดกระแสอิ่มตัวและรีเลย์มีโอกาสทำงานผิดพลาดได้ ตามภาพที่ 6 แสดงเส้นคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และแนวโน้มนำเส้นทางเดินของกระแสผลต่างที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเกิด

ฟอลต์ขนาด 13 กิโลแอมแปร์ และอยู่ในขอบเขตทำงานของรีเลย์ เมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง ภายในหม้อแปลงทดกระแส 80% ของเส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัว



ภาพที่ 6 แนวโน้มกระแสผลต่างเฟส A ที่ขนาดกระแสฟอลต์ 13 กิโลแอมแปร์ มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง 80 %

ที่มา: Grunert (2001)

2.4 ชนิดของการลัดวงจร

การลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีด้วยกันหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีลักษณะของการลัดวงจรที่แตกต่างกัน ในที่นี้ทำการพิจารณาเฉพาะการลัดวงจรด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังชนิด 1 เฟสลงดิน (Single Line-to-Ground: SLG), ระหว่างเฟสต่อเฟส (Phase-to-phase: LL) และ สามเฟส (Three Phase: 3PH) ดังภาพที่ 7

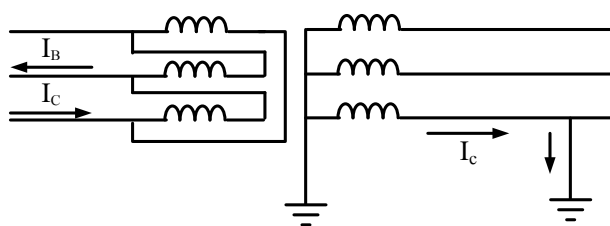


Diagram of SLG fault

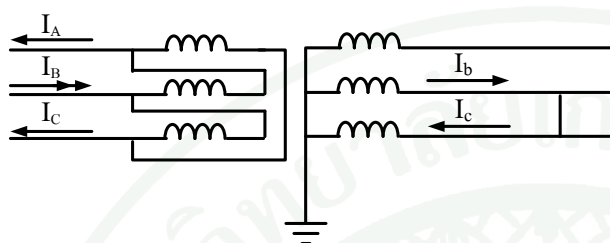


Diagram of LL fault

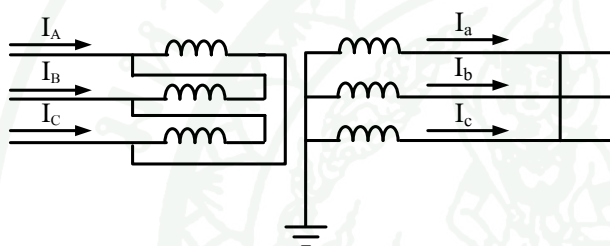
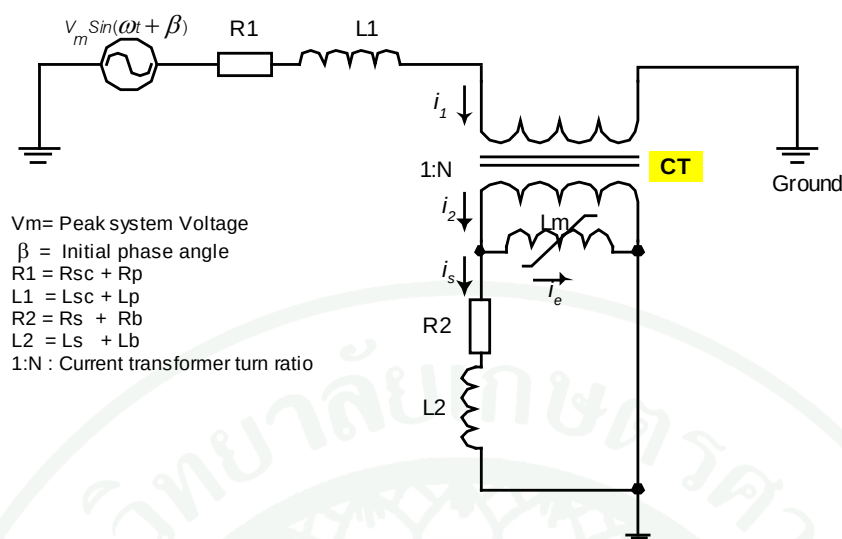


Diagram of 3 Φ fault

ภาพที่ 7 ลักษณะการลัดวงจรชนิดต่างๆ

2.5 หม้อแปลงทดกระแส

หม้อแปลงทดกระแส (Current Transformer) หรือ CT เป็นอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้า เพื่อแปลงปริมาณกระแสที่มีค่ามากให้มีค่าน้อยลง โดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นจนวนคั่นแยกอุปกรณ์ทางด้านแรงดันต่ำออกจากระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแรงดันสูง และเพื่อป้อนปริมาณไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าในระบบแรงดันสูงให้กับอุปกรณ์ทางด้านแรงดันต่ำ การใช้งานหม้อแปลงทดกระแสนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ สำหรับการตรวจวัดและสำหรับการป้องกันการลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดขึ้นสามารถจำลองวงจรสมมูลอย่างง่ายได้ดังภาพที่ 8 เพื่อใช้ในการคำนวณวิเคราะห์หาค่ากระแสและเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นโดยค่ากระแสที่เกิดขึ้นทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดกระแสสามารถคำนวณได้ ตามสมการที่ (19)



ภาพที่ 8 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง และหม้อแปลงทดกระแส
ขณะเกิดกระแสลัดวงจร

ที่มา: พิพัฒน์ (2543)

$$\begin{aligned}
 i_1 &= \hat{I}_1 \sin(\omega t + \beta - \phi) - \hat{I}_1 \sin(\beta - \phi) e^{-R_1 t / L_1} \\
 \hat{I}_1 &= \frac{V_m}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \\
 \phi &= \tan^{-1}(\omega L_1 / R_1) \\
 i_2 &= \hat{I}_2 \sin(\omega t + \beta - \phi) - \hat{I}_2 \sin(\beta - \phi) e^{-R_1 t / L_1} \\
 \hat{I}_2 &= \hat{I}_1 / N
 \end{aligned} \tag{19}$$

เมื่อเกิดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า ช่วงสภาวะแรกที่เกิดขึ้นคือ ช่วงสภาวะปรับตัวชั่วคราว แล้วจึงเข้าสู่ช่วงสภาวะอยู่ตัว ซึ่งค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วยกระแส 2 ส่วน คือ ส่วนประกอบกระแสสลับ (AC Component) และส่วนประกอบกระแสตรง (DC Component) โดยที่ส่วนประกอบกระแสตรงนี้มีอิทธิพลต่อการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กของหม้อแปลงทดกระแส ทำให้เกิดปัญหาการบิดเบี้ยวของรูปคลื่นกระแสทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดกระแส เนื่องมาจากการอิ่มตัวในแกนเหล็กของหม้อแปลงทดกระแส จากสมการที่ (19) ส่วนประกอบกระแสตรงมีขนาดมากที่สุดเมื่อ $(\beta - \phi)$ มีค่าเท่ากับ $\pm \pi/2$ ส่วนเส้นแรงแม่เหล็ก (ψ) ที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (20)

$$\psi = \frac{\hat{I}_2 R_2}{\omega N} \left[\frac{\omega T_1 T_2}{(T_2 - T_1)} (e^{-1/T_2} - e^{-1/T_1}) - \frac{1}{\cos(\theta)} \sin(\omega t + \theta) \right] \quad (20)$$

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

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

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1}$$

จากสมการที่ (20) เส้นแรงแม่เหล็กที่คำนวณได้นั้นมีองค์ประกอบทั้งที่เป็นกระแสสลับและกระแสตรง ซึ่งถ้าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าค่าเส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัวของแกนเหล็ก จะมีผลทำให้รูปคลื่นกระแสทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดกระแสเกิดการบิดเบี้ยวไปจากเดิม โดยที่องค์ประกอบกระแสสลับนั้นแปรผกผันกับค่าตัวประกอบกำลังของเบอร์เดน ดังนั้นเมื่อค่าตัวประกอบกำลังของเบอร์เดนมีค่าน้อยลง ก็ส่งผลให้ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนขององค์ประกอบกระแสสลับมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนขนาดองค์ประกอบกระแสดตรงนั้นขึ้นอยู่กับค่าคงที่เวลา T_1 และ T_2 โดยที่ ค่าคงที่เวลา T_1 มีขนาดแปรผันตามกับค่าอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้าที่ต่ออยู่ทางด้านแรงดันสูง ซึ่งระบบที่มีค่าอัตราส่วน X/R มาก มีผลทำให้ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนขององค์ประกอบกระแสดตรงมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

ค่าตัวแปรที่ใช้เปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ในการทดสอบหาสมรรถนะการตอบสนองของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังต่อสัญญาณกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์นั้น ค่าสัญญาณกระแสที่ใช้ในการทดสอบขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้ากำลังและส่วนประกอบของระบบป้องกันดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ซึ่งจากผลการตอบสนองดังกล่าวของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ค่าตัวแปรที่ใช้เปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ ได้แก่ ค่าตัวแปรบางค่าที่มีความสำคัญดังต่อไปนี้

1. ค่าช่วงเวลาการทำงานของรีเลย์ รีเลย์ต้องใช้เวลาในการทำงานให้น้อยที่สุด เมื่อตรวจพบการลัดวงจรที่อยู่ในเขตป้องกัน เพื่อให้มีการตัดตอนส่วนที่เกิดการลัดวงจรออกจากระบบไฟฟ้ากำลังโดยเร็วที่สุด ซึ่งช่วยลดความเสียหายที่มีต่อระบบไฟฟ้าและไม่ก่อให้เกิดการลุกลามกลายเป็นการลัดวงจรที่รุนแรงยิ่งขึ้น รวมถึงช่วยให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพ ลดช่วงเวลาในการดับไฟ

2. ค่าความแม่นยำเที่ยงตรงในการทำงาน รีเลย์ต้องสามารถแยกแยะระหว่างภาวะที่รีเลย์ต้องทำงานและไม่ควรทำงาน รวมถึงค่าที่รีเลย์ตรวจวัดได้ต้องใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริงที่เกิดขึ้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาสาเหตุและตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรขึ้น

3. ค่าอัตราการผิดพลาดในการตอบสนองของรีเลย์ เป็นข้อมูลทางสถิติที่บ่งบอกถึงความเชื่อถือได้ของรีเลย์ โดยรีเลย์ควรทำงานโดยไม่เกิดความผิดพลาด ซึ่งความเชื่อถือได้ของรีเลย์ส่งผลต่อความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันด้วย

แบบจำลองดิจิทัลโดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP

โปรแกรม EMTP

Electromagnetic Transients Program (EMTP) คือ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับจำลองปรากฏการณ์ทั้งในช่วงสภาวะอยู่ตัว และช่วงสภาวะปรับตัวชั่วคราว หรือ สภาวะทรานเซียนต์ (Transient) ของระบบแม่เหล็กไฟฟ้า, ระบบกลไฟฟ้า และระบบควบคุม รวมถึงระบบไฟฟ้าแบบหลายเฟส เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบต่างๆ

โปรแกรม EMTP ได้รับการพัฒนาและริเริ่มใช้ใน ปี ค.ศ.1968 โดยนักวิจัย Dr. Hermann Dommel ซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่อนำไปใช้งานที่ Bonneville Power Administration (BPA) ในมลรัฐ Oregon ประเทศสหรัฐอเมริกา (พิพัฒน์, 2543) ต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นหลายเวอร์ชัน ซึ่งโปรแกรม EMTP เวอร์ชัน Alternative Program (ATP) นั้นได้รับการพัฒนาในปี ค.ศ.1986 โดย Dr. Scott Meyer เพื่อให้สามารถใช้งานได้ตามเครื่องคอมพิวเตอร์ PC จัดเป็นโปรแกรมในลักษณะที่ไม่แสวงหากำไร (Free Software)

ปัจจุบันโปรแกรม EMTP เป็นที่ยอมรับและเป็นที่นิยมใช้งานอย่างกว้างขวาง ซึ่งโปรแกรม EMTP ได้รับการพัฒนาแบ่งออกเป็น 3 เวอร์ชัน คือ

1. The DCG/EPRI (Development Coordination Group)
2. The ATP (Alternative Transients Program) ถูกพัฒนาโดย The EMTP Centre of Catholic University in Leuven, Belgium.
3. Microtran Power System Analysis Corporation พัฒนาจาก UBC code ใช้งานกับ IBM Compatible Personal Computer

โปรแกรม EMTP/ATP สามารถทำการวิเคราะห์ทั้งแบบการคำนวณเพียงครั้งเดียวและแบบการคำนวณหลายๆ ครั้งอย่างต่อเนื่อง เช่น การวิเคราะห์แบบการจำลอง (Simulation) ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถแสดงผลในรูปแบบตารางตัวเลข และแบบการวาดกราฟ โดยสามารถแบ่งการใช้งานออกเป็นหัวข้อใหญ่ๆ ดังนี้

1. การวิเคราะห์ช่วงสถานะอยู่ตัว ซึ่งเป็นสถานะเริ่มต้นก่อนการวิเคราะห์ช่วงสถานะปรับตัวชั่วคราว สามารถแสดงผลได้โดยตรง เช่น การวิเคราะห์การไหลของโหลด เป็นต้น

2. การวิเคราะห์ช่วงสถานะปรับตัวชั่วคราวสำหรับช่วงเวลาสั้นๆ การวิเคราะห์ในช่วงเวลาไม่เกินครึ่งวินาทีและที่ยาวเกินกว่า ตัวอย่างของการวิเคราะห์ในช่วงเวลาสั้นๆ เช่น การวิเคราะห์แรงดันเกินฟ้าผ่า แรงดันเกินเนื่องจากการสวิตช์ เป็นต้น และส่วนการวิเคราะห์ในช่วงเวลาที่ยาวเกินกว่า เช่น การวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วคราว เป็นต้น

3. การวิเคราะห์ช่วงสถานะปรับตัวชั่วคราวและพลวัตของระบบควบคุม เป็นการวิเคราะห์ที่เทียบได้กับการวิเคราะห์โดยแอนะล็อกคอมพิวเตอร์ที่เริ่มใช้กันมาก่อน ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดย TACS (Transient Analysis of Control System) สามารถเชื่อมการติดต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าได้

4. การวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองและหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โครงสร้างของโปรแกรม EMTP/ATP จะมีโปรแกรมส่วนย่อยที่ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของระบบ ซึ่งสามารถทำการแยกวิเคราะห์โดยอิสระได้ เช่น แบบจำลองสายส่ง เคเบิล สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้ทั้งแบบที่ขึ้นกับความถี่ และไม่ขึ้นกับความถี่ เป็นต้น

โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ ในเทอมของเวลา โดยหลักการพื้นฐานจะทำการแก้สมการอนุพันธ์จากวิธี Trapezoidal rule of Integration ในเทอมของเวลา ส่วนในสถานะที่ค่าเริ่มต้นไม่เท่ากับศูนย์ สามารถกำหนดค่าได้โดยอัตโนมัติจากสถานะอยู่ตัว หรือจากการกำหนดค่าเองของผู้ใช้สำหรับบางอุปกรณ์ ในการคำนวณสามารถนำผลการวิเคราะห์ในช่วงเวลาที่ผ่านไปแล้วมาใช้ในการคำนวณตัวแปรได้ เช่น แรงดันบัสในเวลาต่อมา แต่การคำนวณโดยใช้ผลการวิเคราะห์ที่ผ่านมา อาจเป็นการสะสมข้อผิดพลาดให้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงควรระมัดระวังการใช้ช่วงเวลา (Time Step) ไม่ให้ห่างเกินไปในการคำนวณแต่ละครั้ง พร้อมกับพิจารณารายละเอียดในส่วนประกอบของระบบด้วย หลักการของ EMTP/ATP เมื่อเขียนเป็นเมตริกซ์จะได้รูปแบบดังสมการที่ (21) (ATP Rule Book, 1992)

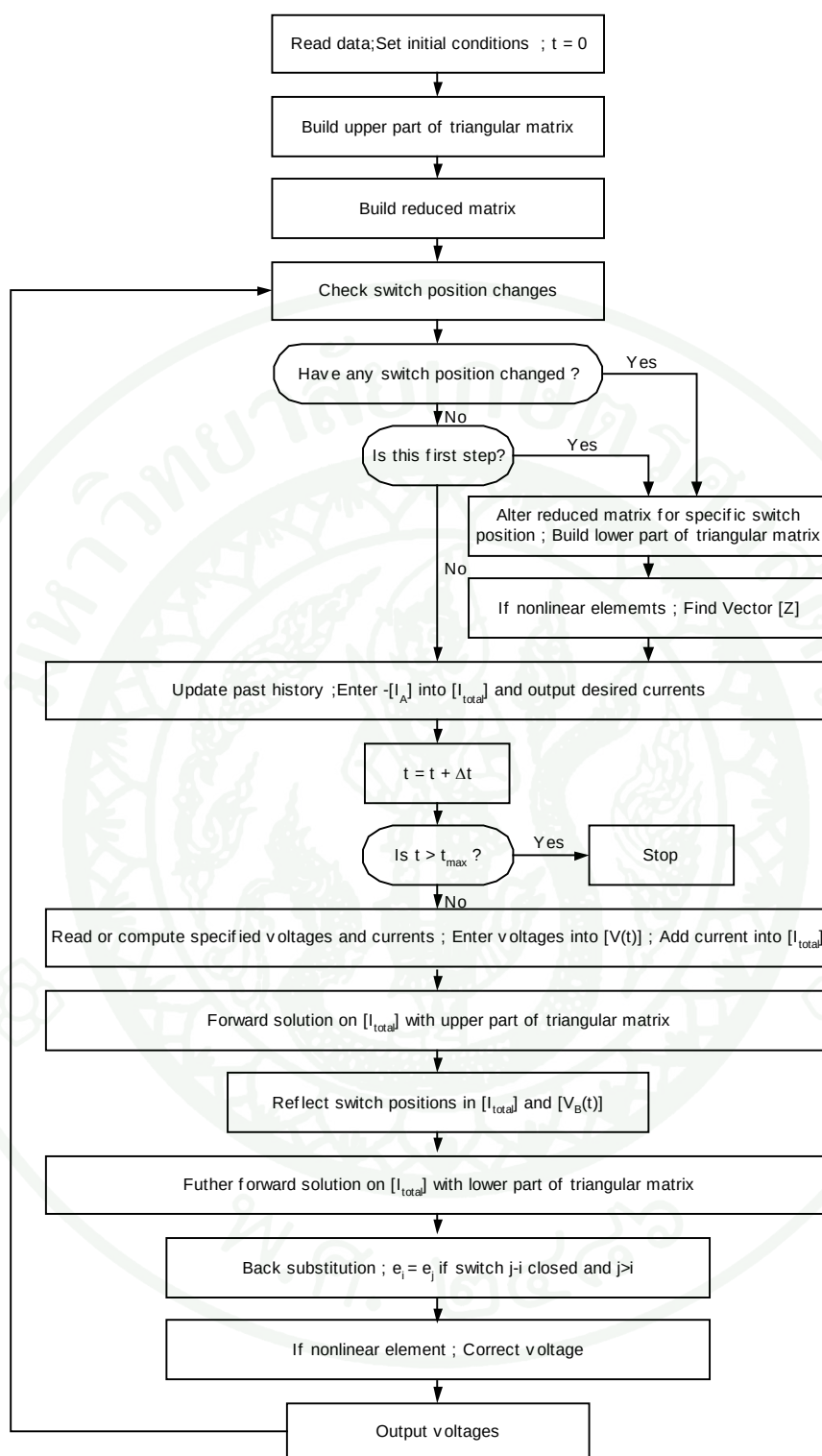
$$[Y][V] = [I] \quad (21)$$

เมื่อ $[Y]$ เป็น Nodal Conductance Matrix ที่เป็นเลขจริง

$[V]$ เป็น Node Voltage Column Vector ที่เป็นเวลาใดๆ

$[I]$ เป็น Current Source Column Vector ที่เป็นค่าของกระแสรวมพุ่งเข้าสู่ปมนั้นจากปมอ้างอิง (reference node) ซึ่งอาจเป็นแหล่งจ่ายกระแสจริงรวมกับแหล่งจ่ายกระแสสมมูลที่แทนค่าแรงดันและกระแสที่คำนวณได้จากเวลาที่ผ่านไป และจะต้องนำมาพิจารณาในการคำนวณที่เวลาขณะนั้น การทำงานของโปรแกรม EMTP/ATP สามารถเขียนเป็นแผนผังแสดงการทำงานดังภาพที่ 9

โปรแกรม EMTP/ATP เป็นโปรแกรมขนาดใหญ่และมีการใช้งานที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อน โดยการป้อนข้อมูลให้กับโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณนั้นประกอบไปด้วย Card ขององค์ประกอบและคำสั่งต่างๆ ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดถูกรวบรวมเอาไว้ในหนังสือคู่มือ ATP Rule Book แต่ปัจจุบันมีการพัฒนา Graphical User Interface (GUI) เช่น ATPDraw ซึ่งสามารถป้อนข้อมูลให้กับโปรแกรมผ่านทางรูปภาพกราฟิกทำให้สะดวกมากขึ้น สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในการสร้างแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP นั้น จะทำการป้อนข้อมูลผ่านทาง ATPDraw



ภาพที่ 9 แผนผังแสดงการทำงานของโปรแกรม EMTP/ATP

ที่มา: พิพัฒน์ (2543)

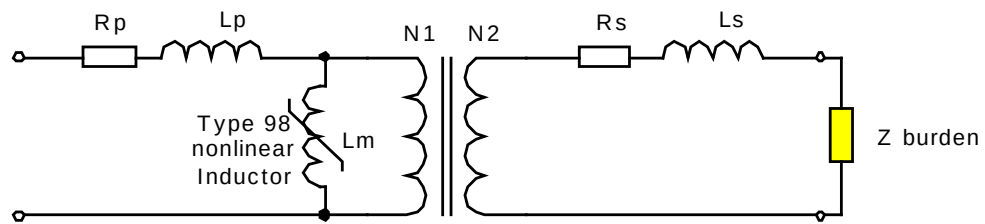
แบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงทดกระแส

ในการศึกษาผลตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแสในช่วงสภาวะปรับตัวชั่วคราว โดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP นั้น สามารถสร้างแบบจำลองหม้อแปลงทดกระแสได้เป็น 3 แบบ โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณลักษณะแตกต่างกัน 2 ชนิด คือ Type – 98 Pseudo – Nonlinear Reactor และ Type – 96 Pseudo – Nonlinear Hysteretic Inductor โดยนำมาต่อขนานกับแบบจำลองหม้อแปลง 1 เฟส 2 ขดลวดแบบอิมิต์ได้ ดังภาพที่ 10, 11 และ 12

แบบจำลองที่ 1 แบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงทดกระแสประกอบด้วยแบบจำลองของหม้อแปลง 1 เฟส 2 ขดลวดแบบอิมิต์ได้เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ในหนังสือคู่มือการใช้งาน โปรแกรม EMTP/ATP (ATP Rule Book) และเพิ่มเติมตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (Type 98 pseudo non-linear inductor) ทางด้านขดลวดแรงดันสูง ซึ่งสามารถกำหนดคุณสมบัติได้โดยการป้อนข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กกับค่ากระแส ($\lambda-i$, flux-current peak) ของหม้อแปลงทดกระแสหรือนำข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแส (V-I, voltage-current rms) มาแปลงให้เป็นข้อมูลความสัมพันธ์ $\lambda-i$ เสียก่อนจึงสามารถป้อนข้อมูลได้ โดยการแปลงข้อมูลนั้นสามารถใช้โปรแกรมย่อย SATURA ที่มีอยู่ในโปรแกรม EMTP/ATP ช่วยทำการแปลงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง V-I ให้เป็น $\lambda-i$ ได้

แบบจำลองที่ 2 นำแบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงทดกระแสแบบที่ 1 มาดัดแปลงโดยกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ทางด้านขดลวดแรงดันต่ำแทนที่ตำแหน่งขดลวดด้านแรงดันสูง ซึ่งข้อดีของการกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ทางด้านขดลวดแรงดันต่ำนั้น ทำให้สะดวกในการหาข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง V-I เนื่องจากตามมาตรฐาน IEEE C57.13 (1993) กำหนดให้ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่าง V-I ทางด้านขดลวดแรงดันต่ำ

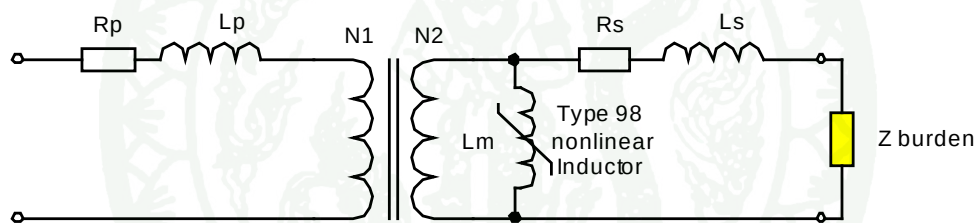
แบบจำลองที่ 3 แบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงทดกระแสมีลักษณะเดียวกับแบบจำลองที่ 2 แต่แตกต่างกันในส่วนของการเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น โดยเลือกใช้ชนิด Type-96 แทน Type-98 เนื่องจากสามารถกำหนดคุณลักษณะทางด้าน Hysteresis และเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (remanence flux) ในแกนเหล็กได้ การคำนวณหาคุณลักษณะทางด้าน Hysteresis จากความสัมพันธ์ระหว่าง V-I สามารถใช้โปรแกรมย่อย HYSDAT ช่วยคำนวณหาได้



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

ภาพที่ 10 แบบจำลองที่ 1 ของหม้อแปลงทดกระแสที่ใช้ใน EMTP

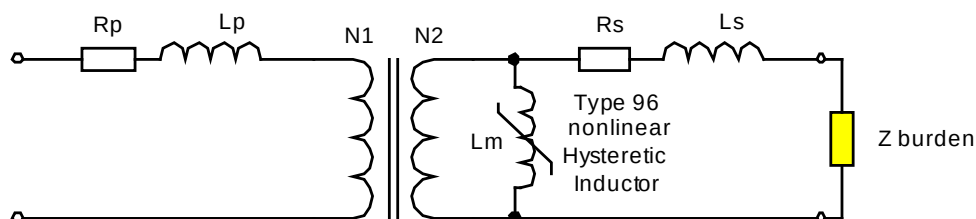
ที่มา: Kezunovic *et al.* (1994)



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

ภาพที่ 11 แบบจำลองที่ 2 ของหม้อแปลงทดกระแสที่ใช้ใน EMTP

ที่มา: Kezunovic *et al.* (1994)

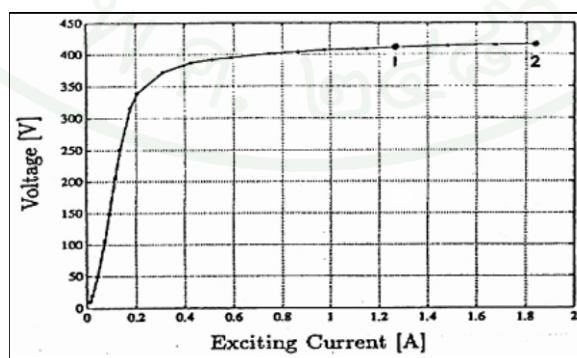


R_p : Transformer primary resistance
 L_p : Transformer primary leakage inductance
 R_s : Transformer secondary resistance
 L_s : Transformer secondary leakage inductance
 L_m : Transformer magnetizing inductance (Type-96 Pseudo nonlinear hysteretic Inductor)
 Z_b : Relay burden + lead impedance
 $N_1:N_2$: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

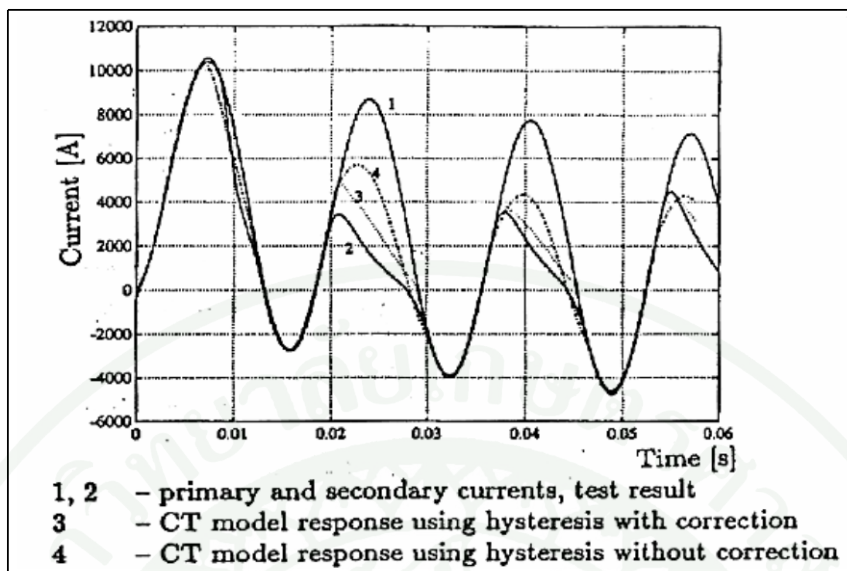
ภาพที่ 12 แบบจำลองที่ 3 ของหม้อแปลงทดกระแสที่ใช้ใน EMTP

ที่มา: Kezunovic *et al.* (1994)

ข้อผิดพลาดเกิดขึ้นจากการเลือกจุดข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง $V-I$ ที่ใช้แปลงให้เป็นข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง $\lambda-i$ เพื่อป้อนให้ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นนำไปใช้วิเคราะห์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงของการอิ่มตัว เนื่องจากโปรแกรมย่อยที่ใช้ในการแปลงข้อมูลนั้น ได้ใช้ข้อมูลลำดับที่ n และ $n-1$ ในการเชื่อมต่อข้อมูล ซึ่งการเลือกจุดข้อมูลที่ห่างเกินไป มีผลให้การแปลงข้อมูลเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น และส่งผลต่อการตอบสนองในช่วงสภาวะปรับตัวชั่วคราวของแบบจำลองหม้อแปลงทดกระแส ดังภาพที่ 13 ในส่วนการคำนวณหาคุณลักษณะด้าน Hysteresis นั้น การเลือกจุดในช่วงของการอิ่มตัวมีผลต่อการคำนวณหาคุณลักษณะ Hysteresis จากภาพที่ 14 เห็นได้ว่าการเลือกจุดที่ 2 นั้นให้ผลการตอบสนองใกล้เคียงมากกว่าการเลือกจุดที่ 1



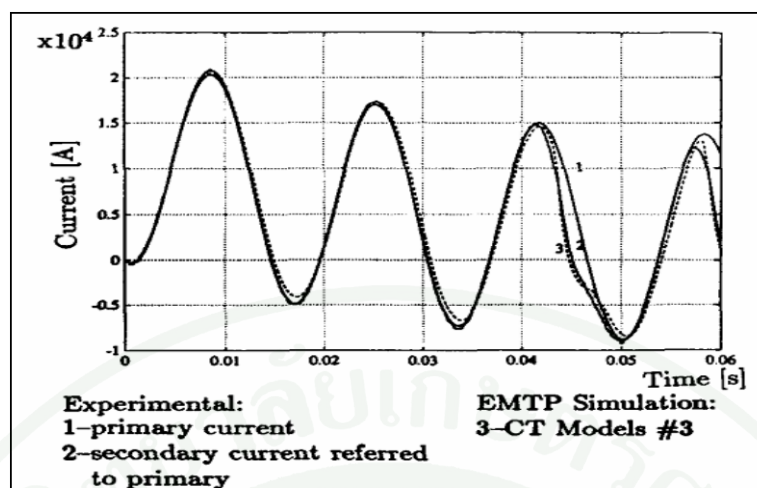
ภาพที่ 13 การเลือกใช้จุดอิ่มตัวเพื่อนำไปใช้คำนวณในโปรแกรม HYSDAT



ภาพที่ 14 เปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองที่ 3
 ไม่มีอำนาจแม่เหล็กตกค้าง, เมื่อเลือกใช้ข้อมูลจุดที่ 1 (รูปคลื่นหมายเลข 4)
 และ จุดที่ 2 (รูปคลื่นหมายเลข 3) เป็นข้อมูลที่จะป้อนให้กับ โปรแกรมย่อย HYSDAT

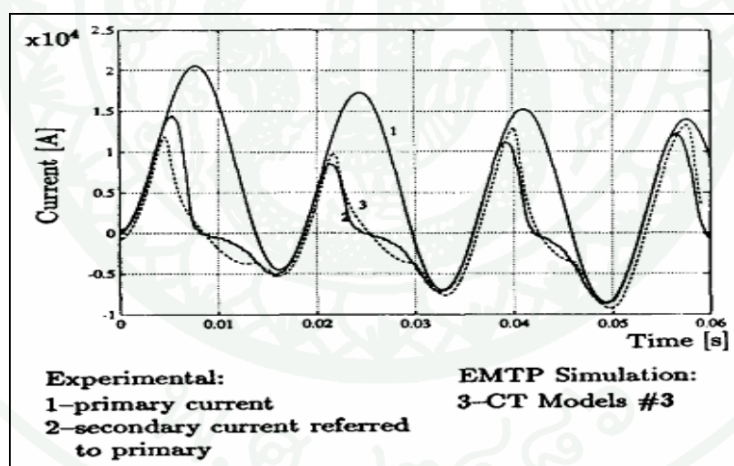
ที่มา: Kezunovic *et al.* (1994)

เมื่อทำการคิดผลของอำนาจแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก (Remanence) จากภาพที่ 15 และ ภาพที่ 16 แสดงให้เห็นว่า เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างทั้งที่มีขั้วเดียวกันและขั้วตรงข้ามกับเส้นแรง แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากสภาวะปรับตัวชั่วคราว มีผลต่อการอิ่มตัวและความผิดเพี้ยนของกระแสทางด้าน ขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดกระแส หากแต่เส้นแรงแม่เหล็กขั้วตรงข้ามกับเส้นแรง แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากสภาวะปรับตัวชั่วคราวให้ผลที่รุนแรงกว่า



ภาพที่ 15 เปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองต่างๆ มีอำนาจแม่เหล็กตกค้าง

ที่มา: Kezunovic *et al.* (1994)



ภาพที่ 16 เปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองต่างๆ มีอำนาจแม่เหล็กตกค้างกลับขั้ว (Reverse Remanence)

ที่มา: Kezunovic *et al.* (1994)

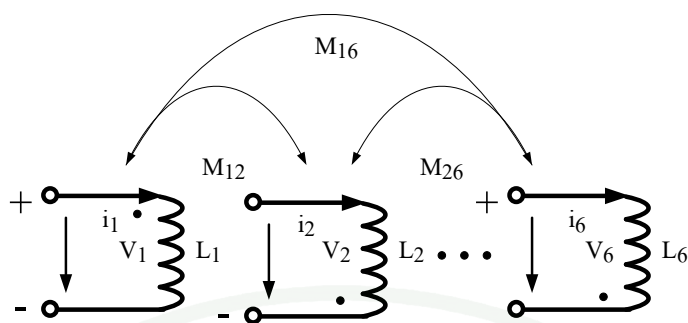
แบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ในการศึกษากระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าและการลัดวงจรที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้ถูกต้องเพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลอง ดังนั้นจึงต้องเลือกรูปแบบในการคำนวณให้เหมาะสมด้วย การคำนวณพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้นมีให้เลือกใช้ด้วยกันหลายรูปแบบ ได้แก่ BCTRAN, Saturable Transformer, X Transformer และ Ideal Transformer แต่สำหรับการศึกษาสถานะปรับตัวชั่วคราวจะใช้แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง BCTRAN ซึ่งเป็นการนำเสนออิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (Impedance Matrix) และ อิมพีแดนซ์เมตริกซ์ผกผัน (Inverse Impedance Matrix) ของหม้อแปลงชนิด 3 เฟส ที่อยู่ในรูปของ Coupled R-L มีการนำค่ารีลักแตนซ์ลำดับศูนย์ของอากาศ (Zero-Sequence Air-Return Path Reluctance) มาคิดด้วย หากต้องการคำนึงถึงผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็กก็สามารถทำได้โดยการต่อตัวรีแอคเตอร์ชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Reactance) ที่เทอร์มินอลของเมตริกซ์ที่ได้จากโปรแกรม BCTRAN และหากให้ต้องการคำนึงถึงผลของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ในแกนเหล็กก็สามารถทำได้โดยการต่อรีแอคเตอร์ที่มีผลของฮิสเทอรีซิส หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “Pseudo-Nonlinear Reactor”

แบบจำลอง BCTRAN สามารถใช้สำหรับหาจลจรเทียบเคียงของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทั้งแบบที่มีแกนเหล็กเป็นชนิด Core และ Shell ทั้ง 2 ขดลวดและ 3 ขดลวด โดยใช้ผลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมาเป็นข้อมูลอินพุต ส่วนเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลอง BCTRAN จะอยู่ในรูปของการต่อร่วมกันของค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำชนิดเชิงเส้น (Couple Linear RL) มาแสดงเป็นวงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงในรูปของเวลา (Time domain) ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ค่าความต้านทานและเมตริกซ์ค่าความเหนี่ยวนำ ตามสมการที่ (22) และ (23)

$$V_i = R_i i_i + \frac{d\lambda_i}{dt} \quad (22)$$

เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$



ภาพที่ 17 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส 2 ขดลวด

เมื่อพิจารณาผลของแม่เหล็กอ้อมตัว λ_i จะเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของกระแสในขดลวด n

$$\lambda_i = \lambda_i(i_1, i_2, i_3, \dots, i_n) \quad (23)$$

สำหรับขดลวด i สมการที่ (22) สามารถขยายโดยใช้กฎลูกโซ่ ดังนี้

$$V_i = R_i i_i + \frac{\partial \lambda_i}{\partial i_1} \frac{di_1}{dt} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial i_2} \frac{di_2}{dt} + \dots + \frac{\partial \lambda_i}{\partial i_n} \frac{di_n}{dt} \quad (24)$$

อนุพันธ์บางส่วนของฟลักซ์เกี่ยวค้อง λ_i เทียบกับกระแสขดลวดจะเป็นค่าตัวเหนี่ยวนำ L_i และ M_{ik}

$$L_i = \frac{\partial \lambda_i}{\partial i_i} \quad M_{ik} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial i_k} \quad (i \neq k) \quad (25)$$

ดังนั้น ถ้าหม้อแปลงเป็นหม้อแปลง 3 เฟส 2 ขดลวด จะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เขียนเป็นความสัมพันธ์เมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$[V] = [R][i] + [L] \left[\frac{di}{dt} \right] \quad (26)$$

หรือ

$$\left[\frac{di}{dt} \right] = [L]^{-1}[V] - [L]^{-1}[R][i] \quad (27)$$

ในหม้อแปลงแบบ 1 เฟส จำนวนขดลวด N ขด ในช่วงสภาวะอยู่ตัว คือ

$$[V] = [Z][i] \quad (28)$$

ค่าของ $[Z]$ ในแนวทแยงมุม (Diagonal Element) จะสามารถหาได้จากผลการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น จากความสัมพันธ์ของ

$$Z_{ij} = f(I_{\text{exetj}}, P_{\text{Fej}}) \quad (29)$$

เมื่อ

I_{exetj} คือ ค่ากระแสกระตุ้นที่วัดได้จากการที่จ่ายกระแสให้กับหม้อแปลง ณ ขดลวดที่ j ขณะทำการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น

P_{Fej} คือ ค่าสูญเสียในแกนเหล็กที่วัดได้จากการที่จ่ายกระแสให้กับหม้อแปลง ณ ขดลวดที่ j ขณะทำการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น

ส่วนค่าของ $[Z]$ แนวที่ไม่ใช่แนวทแยงมุม (Off Diagonal Element) สามารถหาได้จากผลการทดสอบแบบลัดวงจร

$$Z_{jk} = f(P_{\text{Cu,jk}}, V_{jk}^{\text{short}}) \quad (30)$$

เมื่อ

(j,k) คือ คู่ของขดลวดที่ทำการทดสอบแบบลัดวงจร

$P_{\text{Cu,jk}}$ คือ ค่าสูญเสียในขดลวดที่วัดได้ (Copper Loss)

V_{jk}^{short} คือ ค่าแรงดันขณะลัดวงจร (Short Circuit Voltage (pu))

ถ้ากำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์ขณะลัดวงจรเป็น Z_{jk}^{short} ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมสามารถหาได้จาก

$$Z_{jk} = Z_{kj} = \sqrt{(Z_{jj} - Z_{jk}^{\text{short}})Z_{kk}} \quad (31)$$

ซึ่งค่าเมตริกซ์ $[R]$ และ $[L]$ ในสมการที่ (26) สามารถหาได้จากค่าจริง (Real part) และค่าจินตภาพ (Imaginary part) ของเมตริกซ์ $[Z]$ ในสมการที่ (31)

ในส่วน of ค่า $[Z]$ ของหม้อแปลง 3 เฟส จำนวน N ขด ในช่วงสภาวะอยู่ตัวนั้น ยังคงใช้สมการหม้อแปลง 1 เฟส ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่จะต้องมีการเปลี่ยนค่ากระแส แรงดันและอิมพีแดนซ์ จากค่าที่เป็นสเกลาร์มาเป็นเมตริกซ์ ดังนี้

$$i_k \rightarrow [i_{kA}, i_{kB}, i_{kC}]^T \quad (32)$$

$$v_k \rightarrow [v_{kA}, v_{kB}, v_{kC}]^T \quad (33)$$

$$Z_{kj} \rightarrow \begin{bmatrix} Z_{kjs} & Z_{kjm} & Z_{kjm} \\ Z_{kjm} & Z_{kjs} & Z_{kjm} \\ Z_{kjm} & Z_{kjm} & Z_{kjs} \end{bmatrix} \quad (34)$$

A, B, C การบ่งบอกถึงเฟส

Z_{kjs} ค่าอิมพีแดนซ์ตัวเองระหว่างขดลวด k และขดลวด j ซึ่งก็คือค่า อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างขดลวด 2 ขด

Z_{kjm} ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างขดลวด k และขดลวด j ซึ่งก็คือค่า อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างขดลวด 2 ขดที่ต่างเฟสกัน

ในสมการที่ (34) จะใช้สำหรับหาค่าอิมพีแดนซ์ โดยใช้ผลการทดสอบทั้งแบบลำดับศูนย์และลำดับบวก จากนั้นทำการแปลงให้เป็นค่าอิมพีแดนซ์ตัวเอง (Self Impedance) และอิมพีแดนซ์ร่วม (Mutual Impedance) โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$Z_s = \frac{1}{3}(Z_0 + 2Z_1) \quad (35)$$

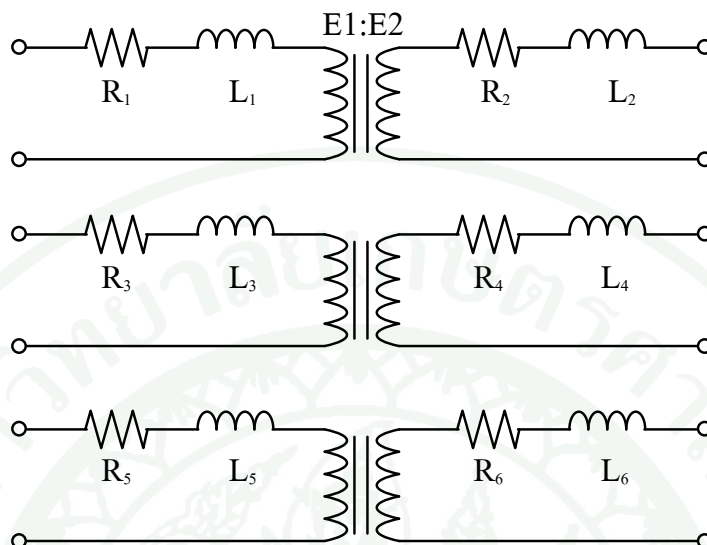
$$Z_m = \frac{1}{3}(Z_0 - Z_1) \quad (36)$$

ดังนั้น เอาท์พุทที่ได้จากโปรแกรมย่อย BCTRAN จะอยู่ในรูปของเมตริกซ์ R และ L โดยมีขนาด 6x6 สำหรับหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \quad (38)$$

จากสมการที่ (37) และ (38) สามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ตามภาพที่ 18



ภาพที่ 18 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง BCSTRAN

หลักการการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

รีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มีหลักการการทำงานคือ เปรียบเทียบผลต่างกระแสที่ไหลเข้าและออกหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยนำกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดกระแส ที่ติดตั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แบ่งเป็นกระแส 2 ส่วน ได้แก่ กระแสผลต่าง (Differential Current) หรือกระแสที่ทำให้รีเลย์ทำงาน (Operating Current) และกระแสด้านการทำงาน (Restraint Current หรือ Bias Current) ดังภาพที่ 19 โดยกระแสผลต่างคือ กระแสที่เป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิในเฟสเดียวกัน กระแสด้านการทำงานคือ กระแสเฉลี่ยของขนาดกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ รีเลย์จะทำงานเมื่อกระแสผลต่างมีขนาดมากกว่าค่าเซตตั้งกระแสเริ่มทำงานและอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ ดังภาพที่ 20

$I_{diff>}$ เป็นค่ากระแสผลต่างเริ่มทำงานของรีเลย์ รีเลย์จะทำงานทันทีทันใด (Instantaneous) เมื่อตรวจจับค่ากระแสผลต่างมีค่าสูงกว่าค่าเซตตั้ง และอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ โดยกระแสผลต่างที่เกิดขึ้นจะต้องมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 น้อยกว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking ถ้ารีเลย์ตรวจจับกระแสผลต่างได้มากกว่าค่าเซตตั้งและอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงาน แต่มี

ระดับฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่แฝงอยู่ในกระแสผลต่างมากกว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking รีเลย์จะยับยั้งการทำงานทันที วัตถุประสงค์ที่ออกแบบให้รีเลย์ยับยั้งการทำงานเมื่อตรวจพบองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 สูงกว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking เนื่องจาก การเกิดองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 มักเกิดจากการเริ่มจ่ายไฟเข้าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในครั้งแรกที่ไม่มีภาระโหลด เชื่อมต่อด้านทุติยภูมิ ดังนั้นผลรวมของกระแสจะไม่เท่ากับศูนย์ ทำให้มีกระแสผลต่างบางส่วนเกิดขึ้น แต่โดยปกติทั่วไปแล้ว ในการจ่ายไฟเข้าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะมีกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า (Inrush Current) เกิดขึ้น ซึ่งจะมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 สูง การออกแบบระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจึงนิยมใช้การตรวจจับองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 มายับยั้งการทำงาน เพื่อป้องกันการทำงานผิดพลาดของรีเลย์ ในสภาวะเริ่มจ่ายไฟเข้าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในครั้งแรก

$I_{diff>>}$ เป็นค่ากระแสผลต่างทำงานของรีเลย์ ในสภาวะที่เกิดการลัดวงจรแบบรุนแรงภายในเขตป้องกัน จะมีการทำงานแบบทันทีทันใด เมื่อรีเลย์ตรวจจับค่ากระแสผลต่างมีค่าสูงกว่าค่าเซตตั้ง $I_{diff>>}$ และมีการออกแบบให้ระดับของฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ไม่สามารถยับยั้งการทำงานของรีเลย์ เมื่อระดับกระแสผลต่างมีค่าสูงกว่าค่าเซตตั้ง $I_{diff>>}$ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้รีเลย์ทำงานทันทีทันใดเมื่อเกิดลัดวงจรในเขตป้องกันแบบรุนแรง ป้องกันความเสียหายที่อาจลุกลามทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเสียหายได้

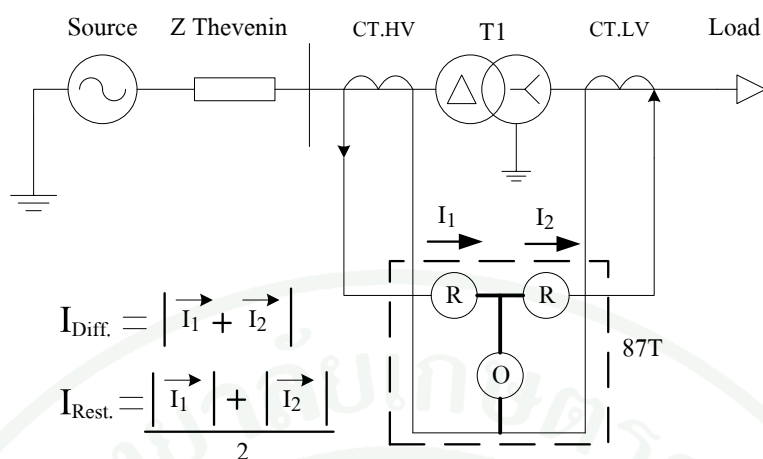
I_{T1} เป็นค่ากระแสด้านการทำงานที่เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์เริ่มเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบมีความชันระหว่างกระแสผลต่างและกระแสด้านการทำงาน มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความมั่นคงในการทำงานให้กับรีเลย์ ในกรณีที่ระดับกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสูงขึ้นเนื่องจากสภาวะ โหลดที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีความแตกต่างของกระแสด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิที่ไหลเข้ารีเลย์มากขึ้น เนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการแปลงกระแสของหม้อแปลงทดกระแสที่สภาวะโหลดสูงมีมากขึ้น หรือเกิดจากตำแหน่งของชุดควบคุมเทปแรงดันอัตโนมัติของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (On Load Tap Changer) ไม่ได้อยู่ในตำแหน่งแรงดันพิกัด มีผลทำให้ค่ากระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเปลี่ยนแปลงไป ไม่ตรงตามค่าการคำนวณเซตตั้งของรีเลย์ ซึ่งโดยปกติทั่วไปจะคำนวณค่าเซตตั้งที่เทปตำแหน่งที่ทำให้แรงดันด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังอยู่ที่ค่าพิกัดแรงดัน ดังนั้นในสภาวะโหลดสูงขึ้น จำเป็นต้องปรับเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ให้มีค่ากระแสผลต่างเพิ่มมากขึ้น เพื่อป้องกันการทำงานผิดพลาดในสภาวะโหลดสูงขึ้น

I_{T2} เป็นค่ากระแสด้านการทำงานที่เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์เปลี่ยนแปลงจากความสัมพันธ์เชิงเส้นตำแหน่งแรกเข้าสู่ความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบมีความชันตำแหน่งที่สอง โดยความชันตำแหน่งที่สองมีค่าสูงกว่าความชันตำแหน่งแรก มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความมั่นคงในการทำงานให้กับรีเลย์ ในกรณีที่เมื่อเกิดลัดวงจรนอกเขตป้องกันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าสูงมากกว่ากระแสโหลดหลายเท่า ความคลาดเคลื่อนในการแปลงกระแสของหม้อแปลงทดกระแสเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นค่ากระแสผลต่างของรีเลย์จะต้องถูกปรับตั้งให้มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เพื่อป้องกันการดำเนินงานผิดพลาดในสถานะเกิดลัดวงจรนอกเขตป้องกันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

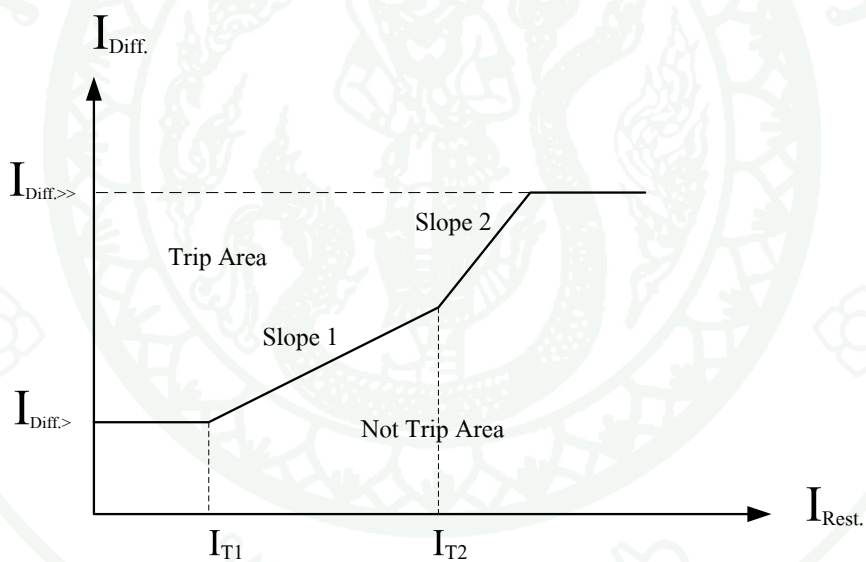
Slope 1 เป็นค่าความชันของเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ ในสถานะโหลดเพิ่มสูงขึ้น มีวัตถุประสงค์เพื่อยกเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ให้มีค่ากระแสผลต่างเริ่มทำงานสูงขึ้น ป้องกันการดำเนินงานผิดพลาดของรีเลย์ที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนในการแปลงกระแสของหม้อแปลงทดกระแสและความคลาดเคลื่อนของกระแสที่เกิดจากตำแหน่งเทพของชุดควบคุมเทพแรงดันอัตโนมัติไม่ได้อยู่ในตำแหน่งแรงดันพิกัด

Slope 2 เป็นค่าความชันของเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ ในสถานะเกิดลัดวงจรนอกเขตป้องกันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มีวัตถุประสงค์เพื่อยกเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ให้มีค่ากระแสผลต่างเริ่มทำงานสูงขึ้น ซึ่งโดยปกติทั่วไปจะมีความชันมากกว่า Slope 1 เพื่อป้องกันการดำเนินงานผิดพลาดของรีเลย์ที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนในการแปลงกระแสของหม้อแปลงทดกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรนอกเขตป้องกัน

นอกจากนี้รีเลย์ยังมีฟังก์ชันตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 (Second Harmonics) กระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 จะเกิดขึ้นเมื่อทำการจ่ายไฟเข้าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในสถานะจ่ายไฟครั้งแรกหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะไม่มีกระแสโหลดเชื่อมต่ออยู่ ดังนั้นจะมีเฉพาะกระแส I_1 ไม่มีกระแส I_2 ตามภาพที่ 19 เป็นผลให้มีกระแสผลต่างมากเป็น 2 เท่าของกระแสด้านการทำงาน เมื่อรีเลย์ตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกส์ที่แฝงอยู่ในกระแสผลต่างโดยมีอัตราส่วนของส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 กับฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 1 (Fundamental Frequency) เกินค่าเซตตั้ง รีเลย์จะต้องยับยั้งการทำงานเนื่องจากกระแสล่อเลี้ยวสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าเป็นกระแสในช่วงสถานะปรับตัวชั่วคราว (Transient Current) ที่เกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของแรงดันไฟฟ้าไม่ใช้การลัดวงจร



ภาพที่ 19 การต่อวงจรใช้งานรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง



ภาพที่ 20 เส้นกราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

หลักการทำงานของรีเลย์รุ่น SEL 587

หลักการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง รุ่น SEL 587 เหมือนกับรายละเอียดที่กล่าวไว้ในเบื้องต้นทุกประการ ซึ่งสามารถสรุปโดยย่อ ได้ดังนี้ (Schweitzer Engineering Laboratories, 2010)

รีเลย์จะทำงานเมื่อเกิดเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

1. ค่ากระแสผลต่างมีค่าสูงกว่าค่าเซตตั้งกระแสผลต่างเริ่มทำงาน ($I_{diff.>}$) และอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ โดยตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 ได้น้อยกว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking และรีเลย์ทำงานแบบทันทีทันใด
2. ค่ากระแสผลต่างสูงกว่าค่าเซตตั้ง กระแสผลต่างแบบรุนแรง ($I_{diff.>>}$) โดยไม่มีผลของฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 มาขัดยั้งการทำงานของรีเลย์ และรีเลย์ทำงานแบบทันทีทันใด

รีเลย์จะไม่ทำงานเมื่อเกิดเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

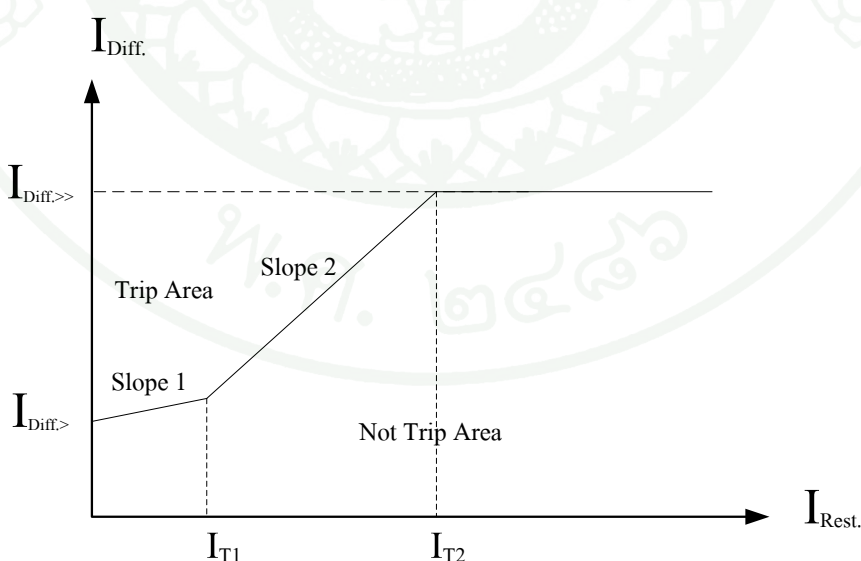
1. ค่ากระแสผลต่างมีค่าต่ำกว่าค่าเซตตั้งกระแสผลต่างเริ่มทำงาน ($I_{diff.>}$) หรืออาจมีค่ากระแสผลต่างมากกว่า $I_{diff.>}$ แต่อยู่ใต้เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์
2. ค่ากระแสผลต่างมีค่าสูงกว่าค่าเซตตั้งกระแสเริ่มทำงาน และอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ แต่มีระดับฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 สูงกว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking โดยจะขัดยั้งการทำงานในเฟสอื่นๆด้วย ถ้ารีเลย์ตรวจพบระดับฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 ได้เพียงเฟสเดียวก็ตาม แต่เฟสนั้นต้องมีค่ากระแสผลต่างสูงกว่าค่าเซตตั้ง $I_{diff.>}$ และอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ แต่มีค่าต่ำกว่า $I_{diff.>>}$ ส่วนเฟสอื่นๆ ถึงแม้จะมีค่ากระแสผลต่างมากกว่าค่าเซตตั้ง $I_{diff.>}$ และอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงาน รีเลย์จะขัดยั้งการทำงานในทุกเฟส ซึ่งเงื่อนไขนี้เรียกชื่อว่า “Cross Blocking” แต่จะต้องปรับตั้งค่าเซตตั้ง Independent Harmonic Blocking (IHBL) เป็น NO เพื่อเปิดใช้ฟังก์ชัน Cross Blocking

หลักการทํางานของรีเลย์รุ่น KBCH 120

รีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง รุ่น KBCH 120 จะมีหลักการทํางานคล้ายคลึงกับรีเลย์รุ่น SEL 587 มีข้อแตกต่างกัน สรุปได้ดังนี้ (Areva, 2002)

1. เส้นกราฟการทํางานของรีเลย์ แตกต่างกัน โดยเส้นกราฟการทํางานของรีเลย์ KBCH 120 จะเป็นตามภาพที่ 21 โดยค่า I_{T1} จะถูกตรึงค่าไว้ที่ค่า I_N ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนความชันของเส้นกราฟการทํางาน Slope 1 ถูกตรึงค่าไว้ที่ 20% ความชันของเส้นกราฟการทํางาน Slope 2 ถูกตรึงค่าไว้ที่ 80% ไม่สามารถปรับตั้งค่าได้

2. เทคนิคการตรวจจับระดับฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 จะใช้วิธีที่เรียกชื่อว่า “Waveform Recognition” หรือ “Gap Detection” โดยรีเลย์จะตรวจจับขนาดของกระแสในแต่ละ 1/4 ไซเคิลซึ่งจะมีค่ามากและน้อยสลับกัน ซึ่งโดยปกติแล้วถ้ากระแสผลต่างไม่มีองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 ผสมอยู่ ขนาดของลูกคลื่นในแต่ละ 1/4 ไซเคิลจะมีค่าไม่น้อยกว่าขนาดของลูกคลื่นก่อนหน้า 1/4 ไซเคิลที่อยู่ติดกัน เมื่อตรวจพบว่า ในแต่ละ 1/4 ไซเคิล ขนาดของลูกคลื่นมีค่า มาก – น้อย สลับกัน โดยลูกคลื่นที่มีค่าน้อยอยู่นานเกินกว่า 1/4 ไซเคิล ซึ่งเกิดจากผลของฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 รีเลย์จะยับยั้งการทํางาน โดยไม่คำนึงถึงปริมาณของฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 ที่เกิดขึ้นในกระแสผลต่าง



ภาพที่ 21 เส้นกราฟการทํางานของรีเลย์รุ่น KBCH 120

หลักการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง รุ่น KBCH 120 สามารถสรุปโดยย่อ ได้ดังนี้

รีเลย์จะทำงานเมื่อเกิดเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

1. ค่ากระแสผลต่างมีค่าสูงกว่าค่าเซตตั้งกระแสผลต่างเริ่มทำงาน ($I_{diff.>}$) และอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ โดยตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 ด้วยเทคนิค Gap Detection ถ้าในทุกๆ 5 msec ลูกคลื่นมีขนาดสม่ำเสมอ และไม่มีช่วงที่ลูกคลื่นมีค่าน้อยกว่าลูกคลื่นก่อนหน้า $1/4$ ไซเคิล รีเลย์จะทำงานและทำงานแบบทันทีทันใด
2. ค่ากระแสผลต่างสูงกว่าค่าเซตตั้ง กระแสผลต่างแบบรุนแรง ($I_{diff.>>}$) โดยไม่มีผลของฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 มายับยั้งการทำงานของรีเลย์ และรีเลย์ทำงานแบบทันทีทันใด

รีเลย์จะไม่ทำงานเมื่อเกิดเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

1. ค่ากระแสผลต่างมีค่าต่ำกว่าค่าเซตตั้งกระแสผลต่างเริ่มทำงาน ($I_{diff.>}$) หรืออาจมีค่ากระแสผลต่างมากกว่า $I_{diff.>}$ แต่อยู่ใต้เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์
2. ค่ากระแสผลต่างมีค่าสูงกว่าค่าเซตตั้งกระแสเริ่มทำงาน และอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ แต่ในทุกๆ 5 msec ลูกคลื่นมีขนาด มาก – น้อย สลับกันโดยลูกคลื่นที่มีค่าน้อยอยู่นานเกินกว่า $1/4$ ไซเคิล ซึ่งเกิดจากผลของฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 รีเลย์จะยับยั้งการทำงานเฉพาะในเฟสนั้น ส่วนเฟสอื่นๆ ที่มีกระแสผลต่างสูงกว่าค่าเซตตั้ง $I_{diff.>}$ และอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ แต่มีค่าต่ำกว่า $I_{diff.>>}$ และมีระยะ Gap ของลูกคลื่นที่มีค่าน้อย เกิดขึ้นในระยะเวลาที่ต่ำกว่า 5 msec. รีเลย์จะทำงานในเฟสนั้นๆ จากคุณสมบัติดังกล่าวมานี้แสดงให้เห็นว่า รีเลย์ รุ่น KBCH 120 ไม่มีฟังก์ชัน “Cross Blocking”

รายละเอียดค่าเซตตั้งการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ของรีเลย์ รุ่น SEL 587 และ KBCH 120 แสดงไว้ในภาคผนวก ก

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. Software ประกอบด้วย

- 1.1 Watcom ATP-EMTP (Alternative Transient Program) Release 2010
- 1.2 ATPDraw Windows version 5.7p2
- 1.3 ATP Analyzer Version 4.13
- 1.4 OMICRON Test Universe V2.40 SR 1
- 1.5 OMICRON Advanced TransPlay
- 1.6 Microsoft Windows

2. Hardware ประกอบด้วย

- 2.1 เครื่องทดสอบรีเลย์แบบ 3 เฟส ยี่ห้อ OMICRON รุ่น CMC256-6
- 2.2 รีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จำนวน 2 ตัว ประกอบด้วย
 - 2.2.1 รีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ ไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor Based) ยี่ห้อ SEL (Schweitzer Engineering Laboratories) รุ่น SEL 587 จำนวน 1 ตัว
 - 2.2.2 รีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ ไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor Based) ยี่ห้อ GEC รุ่น KBCH 120 จำนวน 1 ตัว
- 2.3 เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

วิธีการ

แบบจำลองดิจิทัลของ CT, หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

1. แบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าวงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ได้มาจากโปรแกรมย่อย BCTRAN จะไม่คำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็ก แต่หากต้องการผลของความไม่เป็นเชิงเส้นก็สามารถทำได้โดยการต่อค่าอินดักแตนซ์ชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้นชนิด 96 (Pseudo Nonlinear Inductance Type 96) ที่เทอร์มินอลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีขดลวดใกล้เคียงกับแกนเหล็กมากที่สุด ซึ่งจะให้ผลของอินทิเกรตของแรงดัน หรือค่าฟลักซ์มีค่าใกล้เคียงกับค่าฟลักซ์ในแกนเหล็กแต่จะต้องระบุค่ากระแสกระตุ้นลำดับบวกเป็นศูนย์ $I_{ex,dir} = 0$ หรือให้เหลือแค่เฉพาะในส่วนค่าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) เพื่อไม่ให้มี Magnetizing Inductance ซ้อนกัน ดังนั้นในการหาค่ากระแสกระตุ้นลำดับบวกที่คิดเฉพาะค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะเป็นไปตามสมการที่ (39)

$$I_{cu,dir} \approx \frac{P_{ex,dir}}{\sqrt{3} U_{ex,dir}} \quad (39)$$

$I_{cu,dir}$ ค่ากระแสที่สูญเสียไปในแกนเหล็กจากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับบวก

$P_{ex,dir}$ ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับบวก

$U_{ex,dir}$ ค่าแรงดันกระตุ้นที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับบวก

สำหรับการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์สามารถหาค่ากระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ที่คิดเฉพาะค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะเป็นไปตามสมการที่ (40)

$$I_{cu,har} \approx \frac{P_{ex,har}}{3 U_{ex,har}} \quad (40)$$

$I_{cu,dir}$ ค่ากระแสที่สูญเสียไปในแกนเหล็กจากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น
ลำดับศูนย์

$P_{ex,dir}$ ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์

$U_{ex,dir}$ ค่าแรงดันกระตุ้นที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์

สำหรับรายละเอียดผลการคำนวณหาค่ากระแสกระตุ้นที่คิดเฉพาะค่าสูญเสียในแกนเหล็ก
สำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในงานวิจัย
นี้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังพิกัด 50 MVA 50 Hz และมีข้อมูลที่อยู่สถานีไฟฟ้าบางแสน ของการไฟฟ้า
ส่วนภูมิภาค ซึ่งผลิตจากบริษัทไคเฮ็น อิเล็กทริก จำกัด มีผลทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

Description	Data
Power rating / Winding connection	50.0 MVA / Dyn1
Voltage rating	115.0 / 23.1 kV
Current rating	251.02 / 1249.67 A
Positive Sequence Test (Direct Measurements):	
Excitation losses (Open HV)	24.7 kW
Excitation current	2.41 A
Excitation voltage (Energized at rated voltage)	23.1 kV
Short-circuit losses (Short LV)	142.6 kW
Short-circuit current (Energized at rated current)	251 A
Short-circuit voltage	16.74 kV

ที่มา: Daihen Electric (1998)

จากข้อมูลในตารางที่ 1 เป็นข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบทั้งแบบจ่ายกระแสกระตุ้นและการ
ทดสอบแบบลัดวงจร ซึ่งมีเฉพาะการทดสอบลำดับบวก จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปทำการ
คำนวณหาค่าพารามิเตอร์สำหรับป้อนให้กับโปรแกรม BCTRAN (BCTRAN สำหรับ ATPDraw
V5.7p4 คำนวณให้อัตโนมัติเมื่อเลือกการต่ออินดักเตอร์ไว้ที่ภายนอก) ดังนั้น ข้อมูลที่ใช้ในการป้อน
ให้กับโปรแกรม BCTRAN ที่มีการคำนวณค่ากระแสกระตุ้นลำดับบวกค่าใหม่ เป็นดังนี้

```

BEGIN NEW DATA CASE
ACCESS MODULE BCTRAN
$ERASE
C Excitation test data card
C < FREQ >> IEXPOS >> SPOS >> LEXPOS >> IEXZERO >> SZERO >> LEXZERO >> <<<<<<
2 50..049400494 50. 24.7 0 2 2 0
C Winding data cards
C >> VRAT >> R >>> PHASE1 >> PHASE2 >> PHASE3 >
1 115. T1HV2AT1HV2CT1HV2BT1HV2AT1HV2CT1HV2B
2 13.3367912 T1LV1A T1LV1B T1LV1C
C Short-circuit test data cards
C <<< PIJ >> ZPOSIJ >> SPOS >> ZZEROIJ >> SZERO >>>>
1 2 142.6 14.56 50. 14.56 50. 0 1
BLANK card ending short-circuit test data
$PUNCH
BLANK card ending BCTRAN data
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD

```

จากข้อมูลการป้อนให้โปรแกรมย่อย BCTRAN ข้างต้น โปรแกรม EMTP/ATP จะคำนวณและแสดงในรูปของ R-L Couple Matrix 6x6 ดังนี้

```

C <++++>> Cards punched by support routine on 16-Sep-12 14.11.57 <++++>>
C ACCESS MODULE BCTRAN
C $ERASE
C C Excitation test data card
C C < FREQ >> IEXPOS >> SPOS >> LEXPOS >> IEXZERO >> SZERO >> LEXZERO >> <<<<<<
C C 2 50..049400494 50. 24.7 0 2 2 0
C C Winding data cards
C C >> VRAT >> R >>> PHASE1 >> PHASE2 >> PHASE3 >
C C 1 115. T1HV2AT1HV2CT1HV2BT1HV2AT1HV2CT1HV2B
C C 2 13.3367912 T1LV1A T1LV1B T1LV1C
C C Short-circuit test data cards
C C <<< PIJ >> ZPOSIJ >> SPOS >> ZZEROIJ >> SZERO >>>>
C C 1 2 142.6 14.56 50. 14.56 50. 0 1
C BLANK card ending short-circuit test data
$VINTAGE, 1,
1T1LV1A 21603.628447221
2T1LV1B 0.0
21603.628447221
3T1LV1C 0.0
0.0
21603.628447221

```

```

USE RL
$UNITS, 0.50E+02 , 0.
1T1HV2AT1HV2C      1.131531 -.3814608333E18
2T1LV1A             0.0 -.4423881291E17
                    .01521855715828 -.5130467919E16
3T1HV2BT1HV2A      0.0 -.3814608337E18
                    0.0 -.4423881295E17
                    1.131531 -.3814608333E18
4T1LV1B             0.0 -.4423881295E17
                    0.0 -.5130467924E16
                    0.0 -.4423881291E17
                    .01521855715828 -.5130467919E16
5T1HV2CT1HV2B      0.0 -.3814608337E18
                    0.0 -.4423881295E17
                    0.0 -.3814608337E18
                    0.0 -.4423881295E17
                    1.131531 -.3814608333E18
6T1LV1C             0.0 -.4423881295E17
                    0.0 -.5130467924E16
                    0.0 -.4423881295E17
                    0.0 -.5130467924E16
                    0.0 -.4423881291E17
                    .01521855715828 -.5130467919E16
$VINTAGE, 0,
$UNITS, -1.,-1.
USE RL
C ----- << case separator >> -----

```

จากนั้นหาค่ารีแอกเตอร์ชนิดไม่เป็นเชิงเส้น และมีผลของฮิสเตอร์รีซิส (Type 96) มาต่อที่เทอร์มินอลของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้โปรแกรมย่อย SATURA และ HYSDAT โปรแกรมย่อย SATURA เป็นโปรแกรมสำหรับเปลี่ยนเส้นโค้งของกระแสกระตุ้นต่อแรงดันกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) ที่ได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น ไปเป็นเส้นโค้งของฟลักซ์แม่เหล็กต่อกระแส ($\Psi_{peak} - I_{peak}$) โดยการนำผลจากการทดสอบมาพลอตให้เป็นเส้นโค้งของกระแสกระตุ้นต่อแรงดันกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปป้อนให้กับโปรแกรมย่อย SATURA ในลักษณะของจุดการทำงาน หลังจากนั้นโปรแกรมหาค่าจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนเส้นโค้งของกระแสกระตุ้นต่อแรงดันกระตุ้น ไปเป็นเส้นโค้งของฟลักซ์แม่เหล็กต่อกระแส ($\Psi_{peak} - I_{peak}$) ของแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง รายละเอียดผลในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ป้อนเป็นอินพุตให้กับโปรแกรมย่อย SATURA สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในงานวิจัย แสดงไว้ในตารางที่ 2

ส่วนวิธีการหาค่ากระแสที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กอย่างเดียว โดยตัดกระแสที่เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็กออก สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (41), (42) และ (43)

$$I_{ex,w} \approx I_{ex} \text{ (harmonics neglected)} \quad (41)$$

$$I_{m,w} \approx \sqrt{I_{ex,w}^2 - I_{cu,w}^2} \quad (42)$$

$$I_{m,w} = \sqrt{I_{ex,w}^2 - (P_{ex,w} / U_{ex,w})^2} \quad (43)$$

$I_{ex,w}$ กระแสกระตุ้นที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น

$I_{cu,w}$ กระแสที่เป็นส่วนของการสูญเสียไปในแกนเหล็กต่อเฟส

$P_{ex,w}$ กำลังสูญเสียที่อ่านได้จากการทดสอบต่อเฟส

$U_{ex,w}$ แรงดันกระตุ้นที่วัดได้ต่อเฟสจากการทดสอบ

$I_{m,w}$ กระแสที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กต่อเฟส

หลังจากที่ได้ค่า $I_{m,w}$ ครบทุกจุดการทำงานบนเส้นโค้งกระแสกระตุ้น (Excitation Curve) แล้ว ให้ปรับค่ากระแสและแรงดันที่สร้างสนามแม่เหล็กให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ โดยหาได้จากสมการที่ (44) และ (45)

$$I_{rms} (PU) = \frac{I_{rms}}{I_{base}} \quad (44)$$

$$V_{rms} (PU) = \frac{V_{rms}}{V_{base}} \quad (45)$$

โดยที่ข้อมูลอินพุตทั้งหมดที่จะนำไปป้อนให้กับโปรแกรมย่อย SATURA แสดงไว้ในตาราง

ที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณหาค่ากระแสและแรงดันที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับโปรแกรมย่อย

SATURA ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (แรงดันเบสที่ $\frac{23.1}{\sqrt{3}}$ kV, $\frac{50}{3}$ MVA)

$U_{ex(L-L)}$ kV	$U_{ex(Phase)}$ kV	I_{ex} (A)	P_{ex} (kW)	$I_{m,w}$ (A)	$U_{ex(Phase)}$ (PU)	$I_{m,w}$ (PU)
20.79	12.00	1.25	18.90	1.1345	0.90	0.00090781
21.94	12.67	1.70	21.60	1.6022	0.95	0.00128210
23.10	13.34	2.41	24.70	2.3296	1.00	0.00186416
24.25	14.00	3.56	28.60	3.4943	1.05	0.00279617
25.41	14.67	5.46	33.30	5.4073	1.10	0.00432698

หลังจากนั้นนำค่า $U_{ex(Phase)}$ (PU) และ $I_{m,w}$ (PU) ป้อนเป็นอินพุตสำหรับโปรแกรมย่อย SATURA ดังต่อไปนี้

BEGIN NEW DATA CASE

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

C 1 2 3 4 5 6 7 8

SATURATION

\$ERASE

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

50.0 13.34 16.67 1 1

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

0.00090781 0.90

0.0012821 0.95

0.00186416 1.00

0.00279617 1.05

0.00432698 1.10

9999

\$PUNCH

BLANK card ending all "SATURATION" data cases

BEGIN NEW DATA CASE

หลังจากที่รันโปรแกรม ATP จะได้เอาที่พุดออกมาในพันช์ไฟล์ (Punch File) ซึ่งจะมีค่าของ
กระแส และฟลักซ์ออกมาเป็นจำนวนจุดเท่ากับจำนวนจุดของอินพุต ดังนี้

C <++++++> Cards punched by support routine on 01-Jul-12 15.39.36 <++++++>

C SATURATION

C \$ERASE

C C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678

C 50.0 13.34 16.67 1 1

C C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678

C 0.00090781 0.90

C 0.0012821 0.95

C 0.00186416 1.00

C 0.00279617 1.05

C 0.00432698 1.10

C 9999

-1.25473809E+01 -6.60562081E+01

-7.88081397E+00 -6.30536532E+01

-5.01409151E+00 -6.00510983E+01

-3.42590514E+00 -5.70485434E+01

-1.60431532E+00 -5.40459885E+01

1.60431532E+00 5.40459885E+01

3.42590514E+00 5.70485434E+01

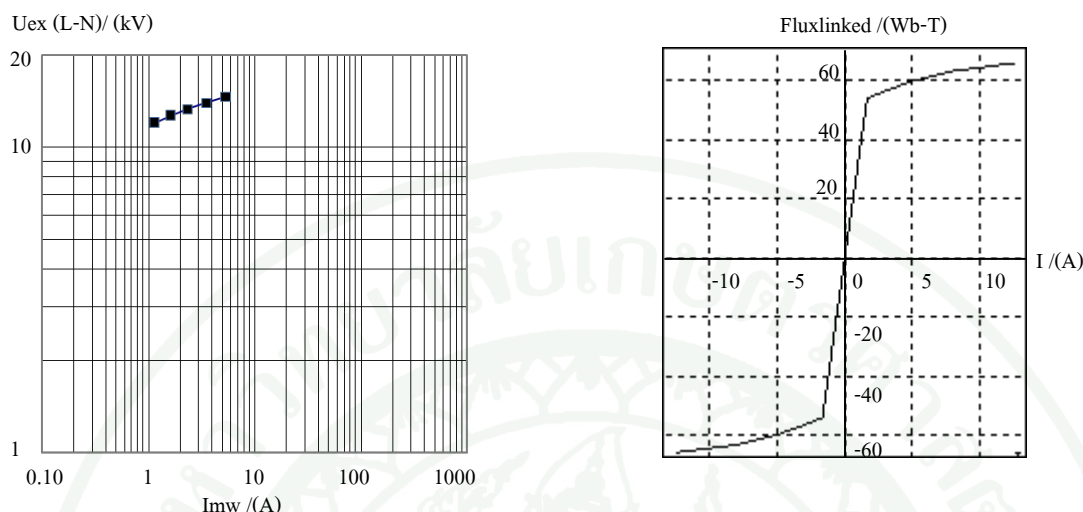
5.01409151E+00 6.00510983E+01

7.88081397E+00 6.30536532E+01

1.25473809E+01 6.60562081E+01

9999

เส้นโค้งเอาต์พุตที่ได้จากโปรแกรมย่อย SATURA แสดงไว้ในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 เส้นโค้งตอบสนองของแรงดันต่อกระแสกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) (ซ้าย), เส้นโค้งเอาต์พุตในรูปของฟลักซ์ต่อกระแส ($\Psi_{peak} - I_{peak}$) ที่ได้จากโปรแกรมย่อย SATURA ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

สังเกตได้ว่าเอาต์พุตที่ได้มาจากโปรแกรมย่อย SATURA เป็นค่ายอด (Peak) แต่เนื่องจากเอาต์พุตที่ได้จากโปรแกรมย่อย SATURA อยู่ในลักษณะความเป็นเชิงเส้นแบบช่วง (Piecewise linear) ซึ่งจะไม่มีความต่อเนื่องในช่วงการทำงาน และในบางครั้งอาจได้ค่าตอบสนองไม่ถูกต้อง อีกทั้งไม่นำผลของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Effect) ของแกนเหล็กมาคิด ซึ่งในโปรแกรม EMTP/ATP ได้มีโปรแกรมย่อยที่ชื่อ HYSDAT ซึ่งใช้สำหรับสร้างเส้นโค้งที่มีผลของฮิสเทอรีซิส ปกติแล้วขนาดของฮิสเทอรีซิสจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพจำนวนขดลวดของหม้อแปลง โดยโปรแกรมดังกล่าวจะให้ผลตอบสนองของฟลักซ์และกระแสอ้างอิงตามแกนเหล็กหม้อแปลงชนิด Armco ซึ่งทำมาจากเหล็กซิลิกอน (Oriented Silicon Steel) โดยสิ่งที่ต้องป้อนให้กับโปรแกรมหาค่าคือค่ากระแส และฟลักซ์แม่เหล็ก ณ จุดอิ่มตัว ซึ่งสามารถจะเลือกจุดดังกล่าวได้จากเอาต์พุตของโปรแกรมย่อย SATURA รายละเอียดของอินพุตที่จะต้องป้อนให้กับโปรแกรม HYSDAT สำหรับรีแอกเตอร์ที่นำมาต่อที่เทอร์มินอลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มีรายละเอียด ดังนี้

BEGIN NEW DATA CASE

HYSTERESIS

\$ERASE

C 345678901234567890

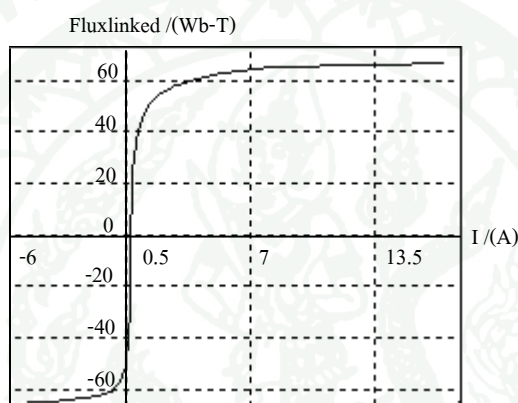
1 4

12.547 66.056

\$PUNCH

BLANK

BEGIN NEW DATA CASE

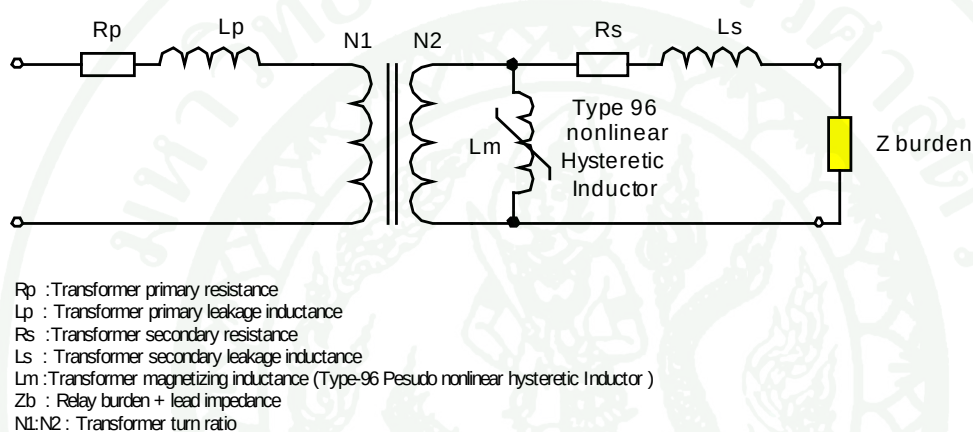


ภาพที่ 23 เส้นโค้งตอบสนองของฟลักซ์แม่เหล็กต่อกระแส ($\Psi_{\text{peak}} - I_{\text{peak}}$) ที่ได้จากโปรแกรม HYSDAT สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

2. แบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงทดกระแส

ในโปรแกรม EMTP/ATP จะมีโปรแกรมย่อยที่ชื่อ Ideal Transformer และ Saturable Transformer สำหรับโปรแกรมย่อยที่ชื่อ Ideal Transformer จะไม่คำนึงถึงผลของค่าสูญเสียในแกนเหล็ก และผลของค่าสูญเสียในขดลวดหม้อแปลง ส่วนโปรแกรมย่อย Saturable Transformer จะนำผลของค่าสูญเสียในแกนเหล็กและผลของค่าสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลงมาคิด อีกทั้งยังได้คำนึงถึงผลของการอิ่มตัวในแกนเหล็กโดยจะมีการต่ออาร์แอกเตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Pseudo Nonlinear Reactor) ไว้ที่ด้านปฐมภูมิภายในแบบจำลอง แต่อย่างไรก็ตามอาร์แอกเตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอยู่ในโปรแกรมย่อย Saturable Transformer จะไม่มีผลของฮิสเตอร์รีซิส ดังนั้นในการที่จะทำให้หม้อแปลงทดกระแสที่ได้จากโปรแกรมย่อยดังกล่าวคำนึงถึงผลของการอิ่มตัวในแกนเหล็ก และผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก สามารถทำได้โดยการต่อ

รีแอคเตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิด 96 (Pseudo Nonlinear Reactor Type 96) ไว้ที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ในภาพที่ 24 ได้แสดงถึงแบบจำลองของหม้อแปลงทดกระแสที่ใช้โปรแกรมย่อย Saturable Transformer ส่วนที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะมีรีแอคเตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิด 96 มาต่อ (Nawikavatan *et al.*, 2009) เพื่อทำหน้าที่เป็นผลตอบสนองของแกนเหล็กของหม้อแปลงทดกระแส ซึ่งจะมีผลตอบสนองแบบไม่เป็นเชิงเส้นและมีผลของฮิสเตอร์รีซิส จากนั้นจะมีค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับด้านทุติยภูมิ ซึ่งจะแสดงถึงค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟและอิมพีแดนซ์ของรีเลย์



ภาพที่ 24 แบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงทดกระแสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

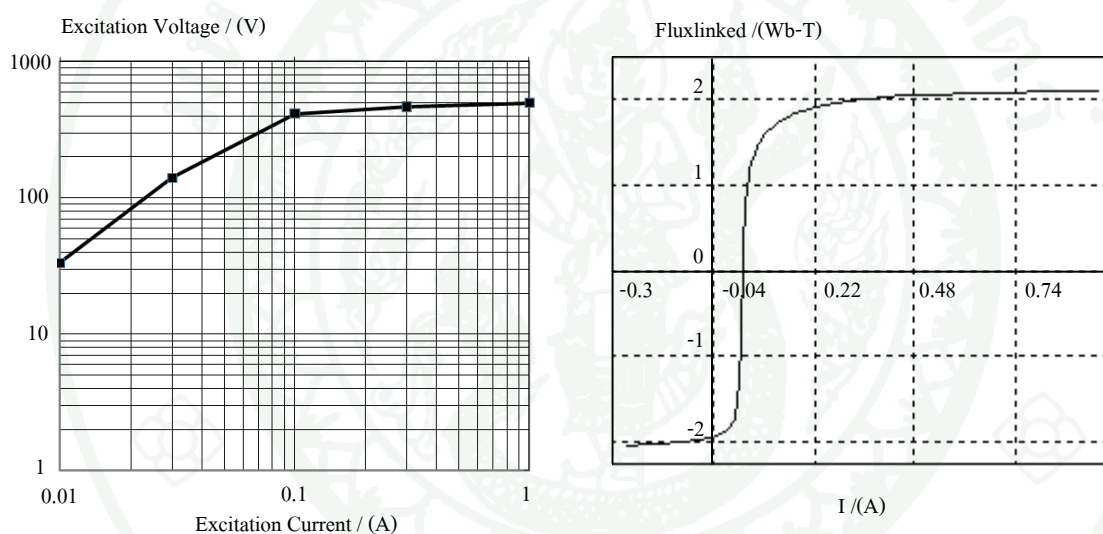
ที่มา: Kezunovic *et al.* (1994)

สำหรับขั้นตอนในการหารีแอคเตอร์มาต่อที่ภายนอกของหม้อแปลงเพื่อให้มีผลของฮิสเตอร์รีซิสของแกนเหล็กจะกระทำเหมือนขั้นตอนการหารีแอคเตอร์สำหรับสภาวะกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

สำหรับหม้อแปลงทดกระแสที่ใช้ป้อนสัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นหม้อแปลงทดกระแสที่ใช้งานกับรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังระบบ 115 / 23.1 kV และใช้อยู่ที่สถานีไฟฟ้าบางแสน ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีข้อมูลแสดงไว้ในตารางที่ 3 โดยเส้นโค้งกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงทดกระแสที่ใช้แต่ละตัวได้แสดงไว้ในภาพที่ 25 และ 26

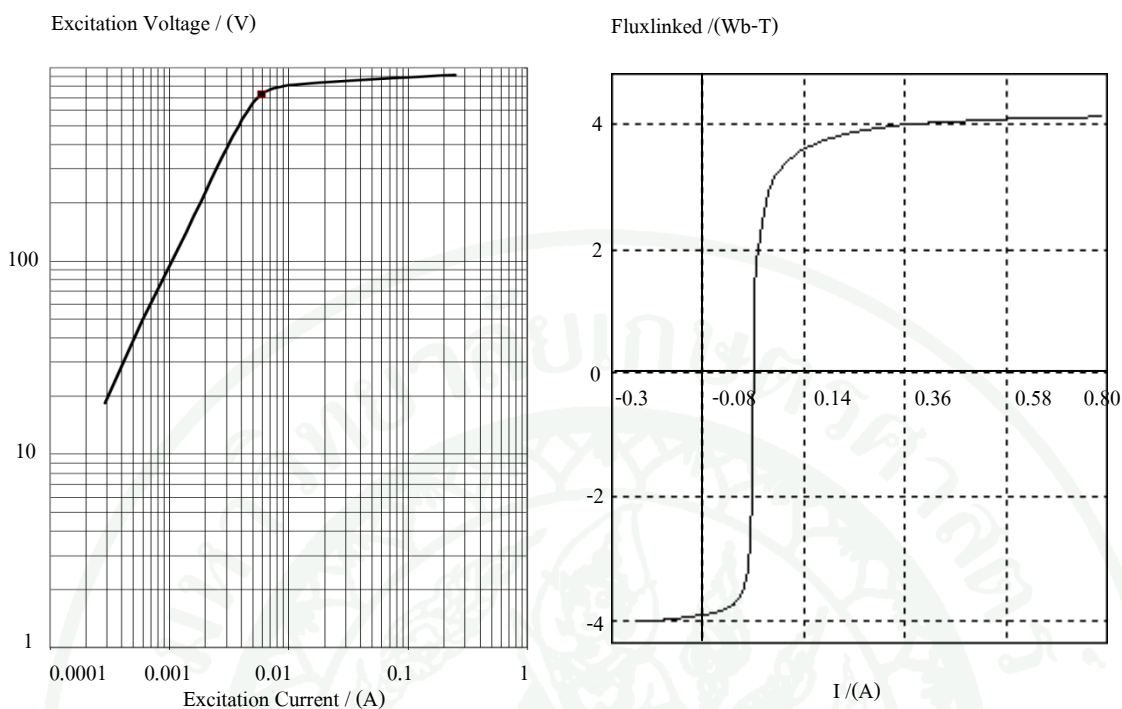
ตารางที่ 3 ข้อมูลหม้อแปลงทดกระแสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

แรงดันที่ใช้งาน (kV)	วัตถุประสงค์	ชนิด ขนาด และผลิตภัณฑ์
115	เป็นหม้อแปลงทดกระแสที่ต่อใช้งานด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	หม้อแปลงทดกระแส 300/1 A Class 10P20 20 VA 50 Hz ผลิตภัณฑ์ FAGET
23.1	เป็นหม้อแปลงทดกระแสที่ต่อใช้งานด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	หม้อแปลงทดกระแส 1800/1 A Class 5P20 20 VA 50 Hz ผลิตภัณฑ์ AEG



ภาพที่ 25 เส้นโค้งกระแสกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) (ซ้าย) และเส้นโค้งฟลักซ์ต่อกระแส

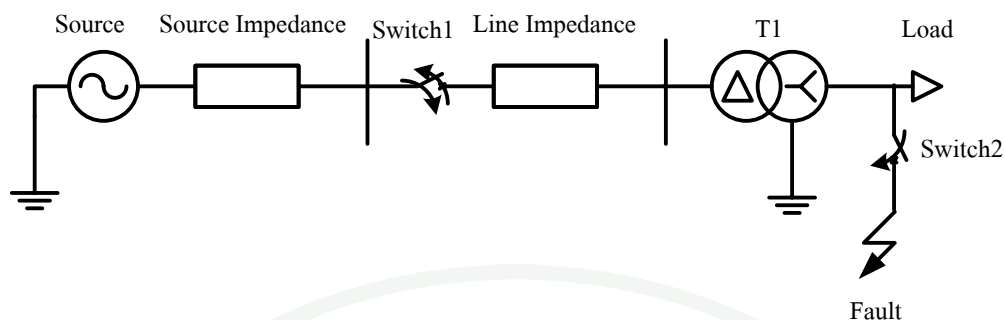
($\psi_{peak} - I_{peak}$) ที่มีผลของฮิสเตอร์รีซิส (ขวา) ของหม้อแปลงทดกระแสด้านที่ใช้งานด้าน 115 kV



ภาพที่ 26 เส้นโค้งกระแสกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) (ซ้าย) และเส้นโค้งฟลักซ์ต่อกระแส ($\psi_{peak} - i_{peak}$) ที่มีผลของฮิสเตอร์รีซิส (ขวา) ของหม้อแปลงทดกระแสด้านที่ใช้งานด้าน 23.1 kV

3. แบบจำลองดิจิทัลของระบบไฟฟ้ากำลัง

แบบจำลองดิจิทัลของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย ซึ่งอ้างอิงข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ จากวงจรจ่ายไฟจริงที่สถานีไฟฟ้าบางแสนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยข้อมูลรายละเอียดค่าพารามิเตอร์แสดงไว้ในภาคผนวก ก แบบจำลองดิจิทัลของระบบไฟฟ้ากำลังแสดงไว้ดังภาพที่ 27 ซึ่งมีรายละเอียดของการใช้องค์ประกอบต่างๆ ในโปรแกรม EMTP/ATP ดังตารางที่ 4



ภาพที่ 27 แบบจำลองดิจิทัลของระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่ายที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 4 องค์ประกอบต่างๆ ของแบบจำลองดิจิทัลระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในโปรแกรม EMTP/ATP

Parameter	ATP-EMTP Card
Source	Three Phase Cosine Function Type 14
Source Impedance	Symmetric RL Coupled Line
Line Impedance	RLC-pi Equivalent 3 phase sequence
Switch1,2	Time Controlled Switch
Transformer T1	BCTRAN with Nonlinear Type 96
Load	RLC Δ 3 Phase

รายละเอียดของแบบจำลองดิจิทัลระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วยส่วนของแหล่งกำเนิด, อิมพีแดนซ์เทวินินของแหล่งกำเนิด, อิมพีแดนซ์ของสายส่ง, หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและสวิตช์เพื่อใช้ในการกำหนดลักษณะมุมมองการเปิด-ปิดวงจรของเซอกิตเบรกเกอร์และใช้ในการกำหนดชนิดของการลัดวงจรที่เกิดขึ้น

ศึกษาลักษณะรูปคลื่นกระแส เมื่อเกิดกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

กำหนดขอบเขตกรณีศึกษาเพื่อใช้ศึกษาลักษณะรูปคลื่นกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าที่เกิดขึ้น ตั้งแต่ช่วงที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้ภาระโหลดตามปกติและสายส่งของสถานีไฟฟ้าต้นทางที่จ่ายไฟให้สถานีไฟฟ้าที่มีหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังติดตั้งใช้งานอยู่เกิดเหตุการณ์ฟลัด ทำให้ระบบป้องกันสายส่งที่สถานีไฟฟ้าต้นทางทำงาน สั่งเซอกิตเบรกเกอร์ปลด

วงจรสายส่งออกเป็นระยะเวลา 1 วินาที (ตามหลักเกณฑ์การปรับตั้งค่าเซตตั้งของรีเลย์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค) และปิดกลับเพื่อจ่ายไฟคืนระบบ

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดเงื่อนไข ให้มีการเปิดวงจรและปิดกลับวงจรเซอกิตเบรกเกอร์ที่มุมมองสาต่างๆบนรูปคลื่นแรงดัน เพื่อพิจารณาผลของกระแสลัดเลียงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าโดยรวมผลของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่เกิดขึ้นที่สถานีไฟฟ้าปลายทาง ภายใต้เงื่อนไขที่มีภาระโหลดค่าต่างๆเชื่อมต่อด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตลอดเวลา ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 5

ศึกษาลักษณะรูปคลื่นกระแส เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง

กำหนดขอบเขตกรณีศึกษาเพื่อใช้ศึกษาลักษณะรูปคลื่นกระแสของการลัดวงจรที่เกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงสภาวะก่อนเกิดการลัดวงจรจนเข้าสู่ช่วงสภาวะปรับตัวชั่วคราว หรือสภาวะทรานเซียนต์ และล่วงเลยถึงช่วงสภาวะอยู่ตัว สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดเงื่อนไขการลัดวงจรที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะปัจจัยต่างๆ เพื่อใช้สร้างแบบจำลองดิจิทัลของระบบไฟฟ้ากำลังโดยโปรแกรม EMTP/ATP ซึ่งการลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีเงื่อนไขเปลี่ยนแปลงตามค่าอัตราส่วน X/R ชนิดของการลัดวงจร รวมถึงผลกระทบของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงทดกระแสที่มีผลต่อการอิ่มตัวของ CT โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 6

ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแสเมื่อเกิดกระแสลัดเลียงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

นำผลของลักษณะรูปคลื่นกระแสเมื่อเกิดกระแสลัดเลียงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าตามกรณีศึกษาที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 5 ที่ได้จากแบบจำลองดิจิทัลของระบบไฟฟ้ากำลังมาป้อนให้แบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงทดกระแส ตามที่กำหนดในวิทยานิพนธ์นี้ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ชื่อและขอบเขตของกรณีศึกษากลุ่ม A

กรณีศึกษา	โหลด (% TP)	มุมมองสา		หมายเหตุ
		เปิดวงจร	ปิดวงจร	
O0C0L10	10	0	0	Fault: Max. DC Offset
O0C30L10	10	0	30	Fault at Voltage Zero
O0C90L10	10	0	90	Fault Location: 50% Z Line
O0C180L10	10	0	180	Fault Type: SLG
O0C270L10	10	0	270	Duration: 100 msec
O90C0L10	10	90	0	Dead Time for A/R: 1.0 sec
O90C30L10	10	90	30	
O90C90L10	10	90	90	
O90C180L10	10	90	180	Remanance Flux in TP & CT
O90C270L10	10	90	270	: Depend on Point On Wave
O180C0L10	10	180	0	of CB Open
O180C30L10	10	180	30	Load CT Burden (115 & 23.1 kV): 0.06 Ω
O180C90L10	10	180	90	
O180C180L10	10	180	180	
O180C270L10	10	180	270	
O270C0L10	10	270	0	
O270C30L10	10	270	30	
O270C90L10	10	270	90	
O270C180L10	10	270	180	
O270C270L10	10	270	270	
O0C0L80	80	0	0	
O0C30L80	80	0	30	
O0C90L80	80	0	90	
O0C180L80	80	0	180	
O0C270L80	80	0	270	

ตารางที่ 5 (ต่อ)

กรณีศึกษา	โหลด (% TP)	มุมมองเสา		หมายเหตุ
		เปิดวงจร	ปิดวงจร	
O90C0L80	80	90	0	
O90C30L80	80	90	30	
O90C90L80	80	90	90	
O90C180L80	80	90	180	
O90C270L80	80	90	270	
O180C0L80	80	180	0	
O180C30L80	80	180	30	
O180C90L80	80	180	90	
O180C180L80	80	180	180	
O180C270L80	80	180	270	
O270C0L80	80	270	0	
O270C30L80	80	270	30	
O270C90L80	80	270	90	
O270C180L80	80	270	180	
O270C270L80	80	270	270	

หมายเหตุ O หมายถึง OPEN เป็นมุมมองเสาเปิดวงจรของเซอกิตเบรกเกอร์

C หมายถึง CLOSE เป็นมุมมองเสาปิดวงจรของเซอกิตเบรกเกอร์

L หมายถึง LOAD เป็นเปอร์เซ็นต์ภาระโหลดที่เชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง

นำผลของลักษณะรูปคลื่นกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นตามกรณีศึกษาที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 6 และ 7 ที่ได้จากแบบจำลองดิจิทัลของระบบไฟฟ้ากำลังมาป้อนให้แบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงทดกระแส ตามที่กำหนดในวิทยานิพนธ์นี้ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ชื่อและขอบเขตของกรณีศึกษากลุ่ม B

กรณีศึกษา	X/R	Rem. Flux In CT (%)	Fault	หมายเหตุ
B1R20PF1	7.33	+20	SLG	Fault : Max. DC Offset at Voltage Zero
B1R80PF1	7.33	+80	SLG	
B1R20NF1	7.33	-20	SLG	Fault Location: low side bus
B1R80NF1	7.33	-80	SLG	Fault Type: As Table
B1R20PF2	7.33	+20	L-L	Duration: 100 msec
B1R80PF2	7.33	+80	L-L	
B1R20NF2	7.33	-20	L-L	Remanance Flux in TP: 0 %
B1R80NF2	7.33	-80	L-L	
B1R20PF3	7.33	+20	3PH	Remanance Flux in CT: As Table
B1R80PF3	7.33	+80	3PH	
B1R20NF3	7.33	-20	3PH	Load CT Burden (115 kV):
B1R80NF3	7.33	-80	3PH	0.06 Ω
B2R20PF1	20	+20	SLG	
B2R80PF1	20	+80	SLG	Load CT Burden (23.1 kV):
B2R20NF1	20	-20	SLG	2 + j 2.89 Ω
B2R80NF1	20	-80	SLG	

ตารางที่ 6 (ต่อ)

กรณีศึกษา	X/R	Rem. Flux In CT (%)	Fault	หมายเหตุ
B2R80PF2	20	+80	L-L	
B2R20NF2	20	-20	L-L	
B2R80NF2	20	-80	L-L	
B2R20PF3	20	+20	3PH	
B2R80PF3	20	+80	3PH	
B2R20NF3	20	-20	3PH	
B2R80NF3	20	-80	3PH	

ตารางที่ 7 ชื่อและขอบเขตของกรณีศึกษากลุ่ม C

กรณีศึกษา	X/R	Rem. Flux In CT (%)	Fault	หมายเหตุ
C1R80B120F1	7.33	80	SLG	Fault: Max. DC Offset
C2R80B120F1	20	80	SLG	at Voltage Zero
C1R80B120F2	7.33	80	L-L	Fault Location: low side bus
C2R80B120F2	20	80	L-L	Fault Type: As Table
C1R80B120F3	7.33	80	3PH	Duration: 100 msec
C2R80B120F3	20	80	3PH	

Load CT Burden (115 kV): 0.06 Ω

Load CT Burden (23.1 kV): 120% (24 Ω)

ตารางที่ 8 ชื่อและขอบเขตกรณีศึกษากลุ่ม D

กรณีศึกษา	X/R	Fault	No. of Test	Burden (Ohm)	หมายเหตุ
DB1F1	7.33	SLG	30	0.06	Fault : Max DC Offset
DB2F1	7.33	SLG	30	10	at Voltage Zero
DB3F1	7.33	SLG	30	20	Fault Location: In
DB1F2	7.33	L-L	30	0.06	Zone low side TP
DB2F2	7.33	L-L	30	10	Fault Type: As Table
DB3F2	7.33	L-L	30	20	Duration: 100 msec
DB1F3	7.33	3PH	30	0.06	
DB2F3	7.33	3PH	30	10	Remanance Flux in TP
DB3F3	7.33	3PH	30	20	& CT: 0 %
					Load CT Burden (115 kV): As Table
					Load CT Burden (23.1 kV): 100% (20 Ω)

ทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ผลการตอบสนองของรูปคลื่นกระแสที่ได้จากแบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงทดสอบ โดยโปรแกรม EMTP/ATP จะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ข้อมูลที่มีนามสกุลเป็น .ADF ที่สามารถนำไปใช้งานทดสอบรีเลย์ได้โดยผ่านการแปลงไฟล์ข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ COMTRADE โดยใช้โปรแกรม Converter หลังจากได้ไฟล์ข้อมูล COMTRADE แล้ว สามารถนำไปทดสอบรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้ โดยใช้โปรแกรม Advanced Transplay ซึ่งสามารถนำเข้าไฟล์ COMTRADE ได้โดยตรง และใช้เครื่องทดสอบรีเลย์ผลิตภัณฑ์ OMICRON รุ่น CMC256-6 แปลงให้เป็นสัญญาณแอนะล็อกที่มีรูปคลื่นเหมือนกับรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองด้วย

โปรแกรม EMTP/ATP เพื่อใช้ทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกัน หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเชิงพาณิชย์จำนวน 2 ตัว ซึ่งประกอบด้วยรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ ไมโครโพรเซสเซอร์ ยี่ห้อ SEL รุ่น SEL 587 และรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบดิจิทัล ยี่ห้อ GEC ALSTOM รุ่น KBCH 120 รีเลย์ทั้งสองมีคุณลักษณะการปรับตั้งค่าเซตติ่งการทำงานแตกต่างกันบางฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชัน Second Harmonics Blocking ของ GEC ALSTOM รุ่น KBCH 120 มีค่าปรับตั้งไว้ที่ 20% และไม่สามารถปรับตั้งได้ และค่าความชัน (Slope) ของเส้นคุณลักษณะการทำงานของ GEC ALSTOM รุ่น KBCH 120 มีค่าเซตติ่งความชันที่ 1 ที่ค่า 20% และความชันที่ 2 มีค่า 80% ไม่สามารถปรับตั้งได้ เนื่องจากรีเลย์ GEC รุ่น KBCH 120 เป็นรุ่นที่ผลิตออกมานานแล้ว ส่วนรีเลย์ SEL รุ่น SEL 587 เป็นรีเลย์รุ่นยุคกลางที่สามารถปรับตั้งค่าการทำงาน ฟังก์ชัน Second Harmonics Blocking และความชันของเส้นคุณลักษณะการทำงานได้ตามต้องการ โดยกำหนดแผนการทดสอบตามขอบเขตกรณีศึกษาที่กำหนดไว้ในตารางที่ 5, 6 และ 7 การทดสอบได้มุ่งเน้นไปที่ความน่าเชื่อถือในการทำงานของฟังก์ชัน Second Harmonics Blocking และในกรณีเกิดลัดวงจรนอกเขตป้องกันแล้วหม้อแปลงตกระแสอิ่มตัว (Turner, 2011) ซึ่งในกรณี Second Harmonics Blocking นั้น รีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเคยมีประวัติการทำงานผิดพลาด เนื่องจากสถานีไฟฟ้าต้นทางทำงานแบบเปิด-ปิดกลับอัตโนมัติแล้วทำให้รีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่สถานีไฟฟ้าปลายทางทำงาน เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง

ตามกรณีศึกษา กลุ่ม A เป็นการกำหนดมุมมองสาในการเปิดและปิดวงจรของเซอกิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทางในกรณีเกิดฟอลต์ขึ้นที่สายส่งแล้วอุปกรณ์ป้องกันสายส่งของสถานีไฟฟ้าต้นทางทำงานโดยมีช่วงเวลาในการปิดกลับ 1 วินาที ตามกฎเกณฑ์การปรับตั้งค่าเซตติ่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งในระหว่างเวลา 1 วินาทีนี้ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่สถานีไฟฟ้าปลายทางยังมีโหลดเชื่อมต่ออยู่ ซึ่งโดยปกติแล้วเมื่อครบเวลา 1 วินาที สถานีไฟฟ้าต้นทางจะต้องสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้ากลับคืนได้ในกรณีที่เกิดฟอลต์แบบชั่วคราว และโหลดที่สถานีไฟฟ้าปลายทางยังสามารถรับพลังงานไฟฟ้าได้ตามปกติ แต่มีบางครั้งที่สถานีไฟฟ้าต้นทางปิดกลับมานั้น รีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของสถานีไฟฟ้าปลายทางทำงาน สั่งเซอกิตเบรกเกอร์เปิดวงจรทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง

กรณีศึกษากลุ่ม B กำหนดให้เกิดการลัดวงจรนอกเขตป้องกันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และหม้อแปลงทดกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้สำหรับรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังอิมตัว โดยกำหนดค่า X/R ที่ค่าใช้งานจริงที่สถานีไฟฟ้าบางแสนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และทดลองเพิ่มค่า X/R รวมถึงพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างภายในแกนเหล็กของหม้อแปลงทดกระแส โหลดเบอร์ดนของหม้อแปลงทดกระแส 2Ω 9.2 mH (ตามมาตรฐาน IEEE/ANSI Class C400) ภายใต้เงื่อนไขการเกิดฟอลต์แบบต่างๆ เพื่อศึกษาผลตอบสนองของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทั้ง 2 ตัว

กรณีศึกษากลุ่ม C มีความคล้ายคลึงกับกรณีศึกษากลุ่ม B แตกต่างกันที่ค่าโหลดเบอร์ดนของหม้อแปลงทดกระแส โดยทดลองเพิ่มเป็น 120% ของโหลดเบอร์ดนปกติของหม้อแปลงทดกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (20Ω) เพื่อศึกษาผลตอบสนองของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทั้ง 2 ตัว

กรณีศึกษากลุ่ม D กำหนดให้เกิดการลัดวงจรในเขตป้องกันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยทดลองปรับค่าโหลดเบอร์ดนของหม้อแปลงทดกระแสเป็น 3 ค่า คือ 0.06, 10 และ 20Ω ภายใต้เงื่อนไข X/R มีค่าเท่ากับ 20 และเฟสลัดวงจรเป็น SLG, L-L และ 3PH โดยทดสอบการทำงานตามกรณีศึกษา โดยแต่ละกรณีศึกษาทดสอบการทำงานจำนวน 30 ครั้ง เพื่อศึกษาผลตอบสนองด้านเวลาการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทั้ง 2 ตัว

สถานที่ทำวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กองอุปกรณ์ป้องกันและรีเลย์ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระยะเวลาการทำวิจัย

การวิจัยเริ่มตั้งแต่ เดือน มีนาคม 2555 สิ้นสุด เดือน กันยายน 2555

ผลและวิจารณ์

ลักษณะของรูปคลื่นกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

การศึกษาลักษณะของรูปคลื่นกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าในระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดจากการปิดกลับอัตโนมัติของเซอกิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทางที่มุมมองาต่างๆบนรูปคลื่นแรงดันและหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่สถานีไฟฟ้าปลายทางมีการะโหลดเชื่อมต่อ โดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP สร้างแบบจำลองดิจิทัลของระบบไฟฟ้ากำลังตามกรณีศึกษากรุป A ที่กำหนดไว้ 40 กรณีศึกษา ดังตารางที่ 5 นั้น มีรายละเอียดตัวอย่างของผลการศึกษารูปคลื่นกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าแสดงไว้ในภาคผนวก ข และจากการศึกษาในแต่ละกรณีศึกษาพบว่า ลักษณะของรูปคลื่นกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามีลักษณะที่แตกต่างกันแปรเปลี่ยนไปตามค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างขึ้นอยู่กับมุมมองการเปิดวงจรของเซอกิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทาง นอกจากนี้ลักษณะรูปคลื่นกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ายังขึ้นอยู่กับมุมมองการปิดกลับวงจรอัตโนมัติของเซอกิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทางและปริมาณการะโหลดเชื่อมต่อที่สถานีไฟฟ้าปลายทาง ซึ่งมีผลต่อการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยสรุปผลการศึกษตามปัจจัยต่างๆ ดังนี้

ค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ในสภาวะปกติที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับการะโหลด มุมเฟสเซอร์ของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะล้าหลังมุมแรงดันแหล่งจ่าย 90 องศา ดังนั้นเมื่อแรงดันแหล่งจ่ายได้รับผลกระทบที่เกิดจากการลัดวงจรที่สายส่งของสถานีไฟฟ้าต้นทางและระบบป้องกันทำงานสั่งเปิดวงจรเซอกิตเบรกเกอร์ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่สถานีไฟฟ้าปลายทางแบบไม่สมมาตร โดยเฟสที่เกิดการลัดวงจรจะมีปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างน้อยที่สุดเนื่องจากการลัดวงจรทำให้แรงดันลดต่ำกว่าเฟสอื่นๆ ซึ่งปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กจะแปรผันตามขนาดแรงดันแหล่งจ่าย โดยปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในเฟสที่เกิดการลัดวงจรและเฟสที่ไม่เกิดการลัดวงจรจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับมุมมองการเปิดวงจรของเซอกิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทาง เมื่อพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างที่เฟส A ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดเมื่อเซอกิตเบรกเกอร์เปิดวงจรที่มุม 0 องศา หรือ 180 องศาบนรูปคลื่นแรงดันเฟส A กล่าวคือ เมื่อเซอกิตเบรกเกอร์เปิดวงจรที่มุม 0 องศา จะทำให้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างสูงสุดชั่วเวลา

เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กกล้าหลังมูมแรงดันแหล่งจ่าย 90 องศา ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าอยู่ที่ค่ายอดในทิศทางลบ และเมื่อเซอกิตเบรกเกอร์เปิดวงจรที่มุม 180 องศา ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าอยู่ที่ค่ายอดในทิศทางบวก ซึ่งค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่ตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จะมีผลโดยตรงกับขนาดของกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า คือ เมื่อเซอกิตเบรกเกอร์ปิดกลับที่มุมองศาที่ทำให้ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างเดิม ทำให้ค่ากระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามีค่ามาก ในทางตรงกันข้าม ถ้าทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการปิดกลับอัตโนมัติของเซอกิตเบรกเกอร์ อยู่ในทิศทางที่หักล้างกับเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างเดิม ทำให้ค่ากระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามีค่าต่ำลงตามไปด้วย

ลักษณะการต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ในกรณีหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีการต่อขดลวดด้านปฐมภูมิแบบเคลด้า กลุ่มเวกเตอร์ Dyn1 แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเฟส A จะเป็นแรงดันเฟส A – C ของแหล่งกำเนิด มีมุมเฟส -30 องศา ดังนั้น ถ้าต้องการให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดในขดลวดเฟส A จะต้องปิดกลับวงจรเซอกิตเบรกเกอร์ที่มุม 30 องศา เพื่อให้แรงดันเฟส A – C ที่ตกคร่อมขดลวดเฟส A ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มีมุมเฟส 0 องศา ซึ่งทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด ตามสมการที่ (12) ส่วนในกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีการต่อขดลวดด้านปฐมภูมิแบบวาย แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเฟส A จะเป็นแรงดันเฟส A ของแหล่งกำเนิด ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวดเฟส A จะมีปริมาณสูงสุดเมื่อเปิดวงจรเซอกิตเบรกเกอร์ที่มุม 0 องศา

จากการศึกษาพบว่าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีการต่อขดลวดด้านปฐมภูมิแบบเคลด้า กลุ่มเวกเตอร์ Dyn1 มุมองศาในการปิดกลับอัตโนมัติที่มุม 30 องศา มี 3 กรณี ตามกรณีศึกษา O0C30L10, O90C30L10 และ O90C30L80 มีผลต่อการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

มุมมองสาปิตวงจร

มุมมองสาปิตวงจร มีผลอย่างมากต่อขนาดกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า ซึ่งจากการศึกษาตามกรณีศึกษากลุ่ม A พบว่ามุมมองสาปิตวงจรที่มุมต่างๆบนรูปคลื่นแรงดันทำให้เกิดกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าที่ค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับมุมมองในการเปิดวงจรเซอกิตเบรกเกอร์ก่อนหน้า ที่จะมีการปิดกลับ เนื่องจากมุมมองในการเปิดวงจรทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างตามสมการที่ (1) ดังนั้น เมื่อเซอกิตเบรกเกอร์ปิดกลับวงจรที่มุมมองาหนึ่งๆจะทำให้เกิดผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างเดิมรวมกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นใหม่ ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองมีทิศทางเสริมกันก็จะทำให้ขนาดกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามีค่าสูง ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองมีทิศทางหักล้างกันก็จะทำให้ขนาดกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามีค่าต่ำ ซึ่งขนาดกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าจะมีผลต่อการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังหรือไม่ ขึ้นอยู่กับผลต่างของกระแสสายที่เกิดขึ้นด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในขณะที่ปิดกลับวงจรอัตโนมัติ

ภาระโหลดที่เชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่สถานีไฟฟ้าปลายทาง

ภาระโหลดที่เชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่สถานีไฟฟ้าปลายทาง จะมีผลต่อปริมาณกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งโดยปกติแล้วองค์ประกอบกระแสโหลดในสภาวะปกติจะเป็นองค์ประกอบที่ความถี่มูลฐาน (50 Hz) ซึ่งในกรณีที่มีการปิดกลับวงจรอัตโนมัติที่สถานีไฟฟ้าต้นทางโดยที่สถานีไฟฟ้าปลายทางมีภาระโหลดเชื่อมต่ออยู่ เมื่อพิจารณากระแสที่เกิดขึ้นด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จะมีองค์ประกอบที่เกิดจากกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ารวมกับองค์ประกอบกระแสที่ความถี่มูลฐานที่เกิดจากภาระโหลด ซึ่งในกรณีที่กระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าที่แฝงอยู่ในกระแสผลต่าง ที่เกิดจากการปิดกลับวงจรอัตโนมัติที่มุมมองาหนึ่งๆ มีผลน้อย (น้อยกว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking) ประกอบกับปริมาณภาระโหลดที่เชื่อมต่ออยู่มีค่าน้อย (10%) ทำให้กระแสด้านการทำงานของรีเลย์มีค่าน้อย ในขณะที่ผลของกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามีมากกว่า ทำให้รีเลย์ทำงาน ในทางตรงกันข้าม ถ้าปริมาณภาระโหลดที่เชื่อมต่อมีปริมาณมาก (80%) มีผลให้กระแสด้านการทำงานของรีเลย์มีค่ามากกว่าผลของกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า ทำให้รีเลย์ไม่ทำงาน ส่วนในกรณีที่มุมเปิดและปิดกลับวงจรอัตโนมัติที่ทำให้ผลของกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าที่แฝงอยู่ในกระแสผลต่างมีปริมาณมาก (มากกว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking) รีเลย์จะยับยั้งการทำงาน ผลทดสอบ

สมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ตามกรณีศึกษา
กลุ่ม A แสดงไว้ในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลง
ไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษากลุ่ม A

กรณีศึกษา	ผลตอบสนองของรีเลย์				โหลด (% TP)
	SEL 587	เฟสทำงาน	KBCH 120	เฟสทำงาน	
O0C180L10	TRIP	A, C	NOT TRIP	-	10
O0C270L10	TRIP	C	TRIP	C	10
O90C0L10	TRIP	A	NOT TRIP	-	10
O90C270L10	TRIP	B	NOT TRIP	-	10
O180C0L10	TRIP	A	NOT TRIP	-	10
O270C180L10	TRIP	A	TRIP	A	10
O0C30L10	TRIP	C	NOT TRIP	-	10
O90C30L10	TRIP	B	TRIP	B	10
O0C270L80	TRIP	C	NOT TRIP	-	80
O90C270L80	TRIP	B	NOT TRIP	-	80
O180C0L80	TRIP	A	NOT TRIP	-	80
O270C180L80	TRIP	A	NOT TRIP	-	80
O90C30L80	TRIP	B	NOT TRIP	-	80

ผลการวิเคราะห์การทำงานของรีเลย์ รุ่น SEL 587 ตามกรณีศึกษากลุ่ม A โดยใช้โปรแกรม
ATP Analyzer พบว่าในทุกกรณีที่รีเลย์ทำงาน ระดับ 2nd Harmonic ในกระแสผลต่างของเฟสที่
ทำงาน มีค่าต่ำกว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking (15%) และมี Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้าน
การทำงาน อยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ ส่วนในกรณีที่รีเลย์ไม่ทำงาน เกิดจาก 2 ปัจจัย
กล่าวคือ ปัจจัยแรก ระดับ 2nd Harmonic ในเฟสที่มี Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงานอยู่
เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ มีค่าสูงกว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking ปัจจัยที่สอง คือ
Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงานอยู่ใต้เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์

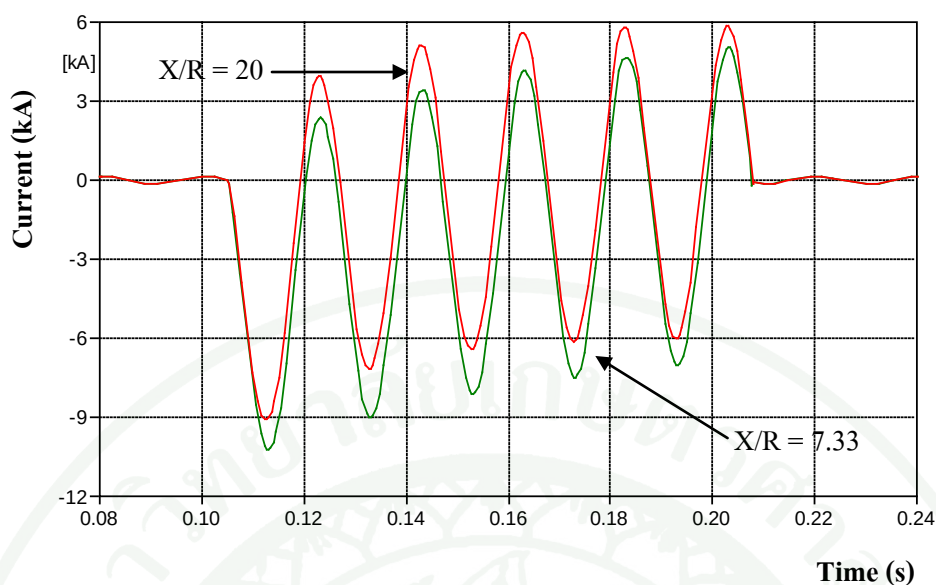
ผลการวิเคราะห์การทำงานของรีเลย์ รุ่น KBCH 120 ตามกรณีศึกษากลุ่ม A โดยใช้โปรแกรม ATP Analyzer พบว่าในทุกกรณีที่รีเลย์ทำงาน ระยะห่างระหว่างลูกคลื่นแต่ละไซเคิล ในกระแสผลต่างของเฟสที่ทำงาน มีค่าต่ำกว่า 5 msec และมี Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน อยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ ส่วนในกรณีที่รีเลย์ไม่ทำงาน เกิดจาก Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงานอยู่ใต้เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์

ลักษณะของรูปคลื่นกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง

การศึกษาลักษณะของรูปคลื่นกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP สร้างแบบจำลองดิจิทัลของระบบไฟฟ้ากำลังตามกรณีศึกษากลุ่ม B, C และ D รวมทั้งสิ้น 39 กรณีศึกษา ดังตารางที่ 6 ถึง 8 นั้น มีรายละเอียดตัวอย่างรูปคลื่นกระแส ตามผลการศึกษาแสดงไว้ในภาคผนวก ข และจากการศึกษาในแต่ละกรณีศึกษาพบว่า ลักษณะของรูปคลื่นกระแสลัดวงจรมีลักษณะที่แตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วน X/R และชนิดของการลัดวงจร ซึ่งปัจจัยต่างๆดังกล่าวมานี้ มีผลต่อการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยสรุปผลการศึกษาตามปัจจัยต่างๆ ดังนี้

อัตราส่วน X/R

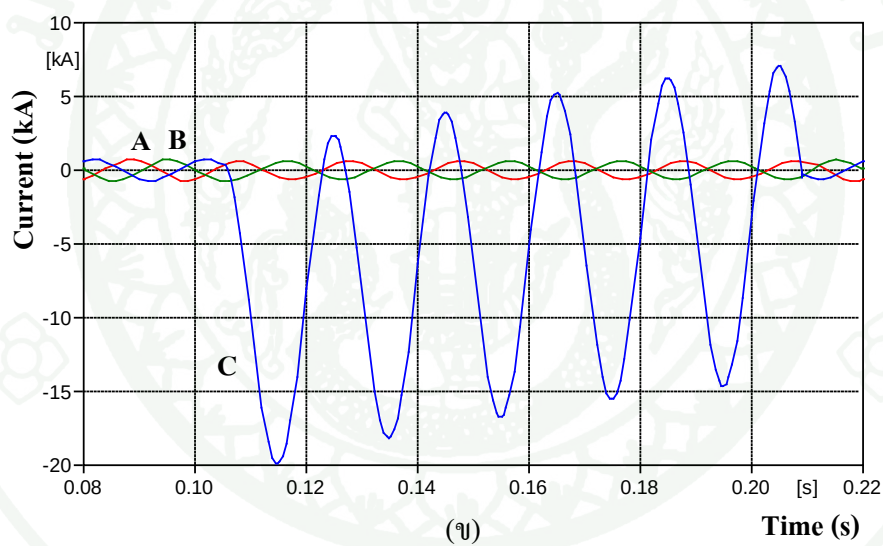
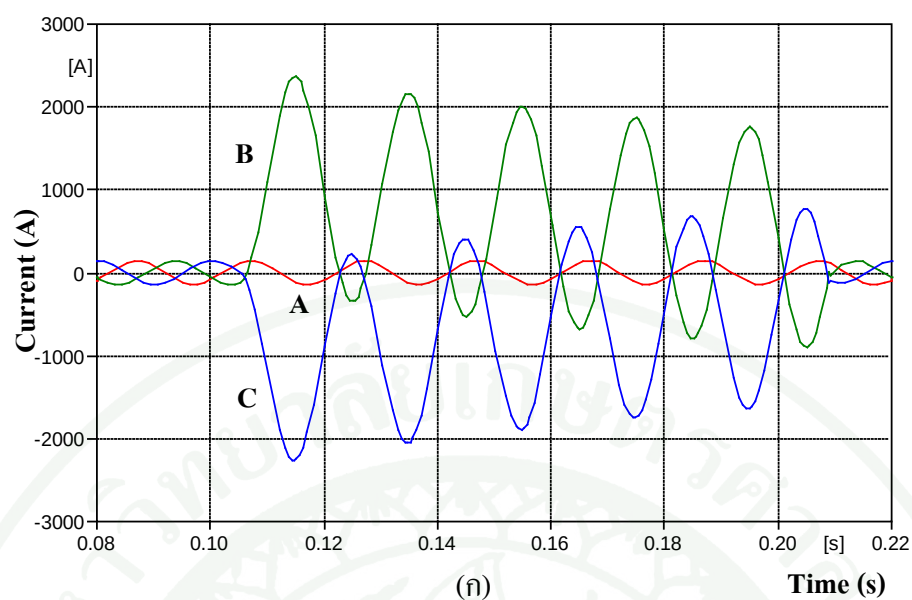
เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ค่ากระแสลัดวงจรในขณะที่มีออฟเซต กระแสตรงสูงสุดจะประกอบด้วยส่วนประกอบกระแสสลับ และส่วนประกอบกระแสตรง ซึ่งค่าอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดการลัดวงจรมีผลแปรผันตรงต่อค่ากระแสลัดวงจรในส่วนประกอบกระแสตรงตามสมการที่ (16) ซึ่งจากผลการศึกษา กำหนดให้ค่าอัตราส่วน X/R มีค่าเท่ากับ 7.33 และ 20 พบว่า เมื่อค่าอัตราส่วน X/R มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมีผลให้ค่ากระแสลัดวงจรสูงขึ้นตามไปด้วยและเวลาที่ใช้ปรับตัวของรูปคลื่นกระแสเพื่อเข้าสู่ช่วงสภาวะอยู่ตัวก็ใช้เวลานานขึ้น ดังภาพที่ 25 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี



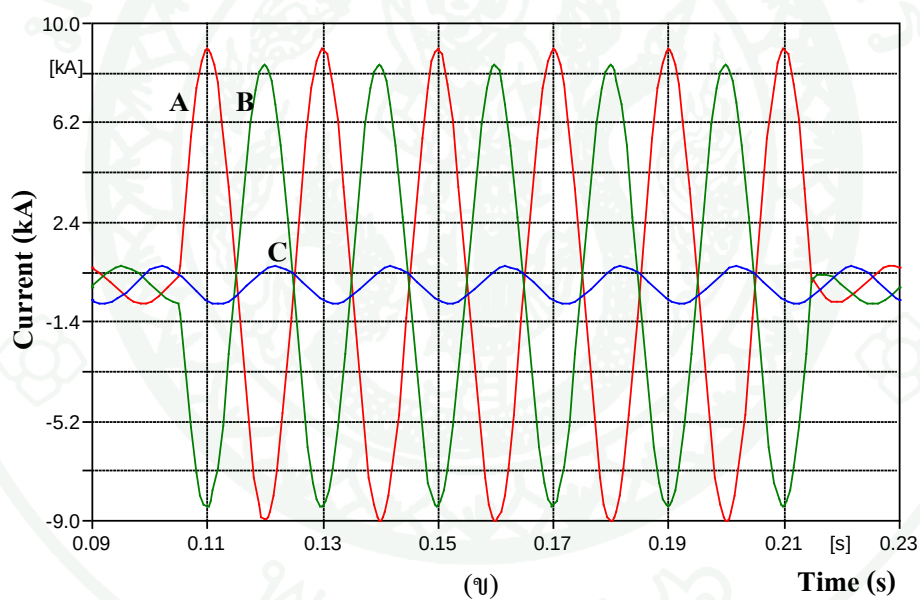
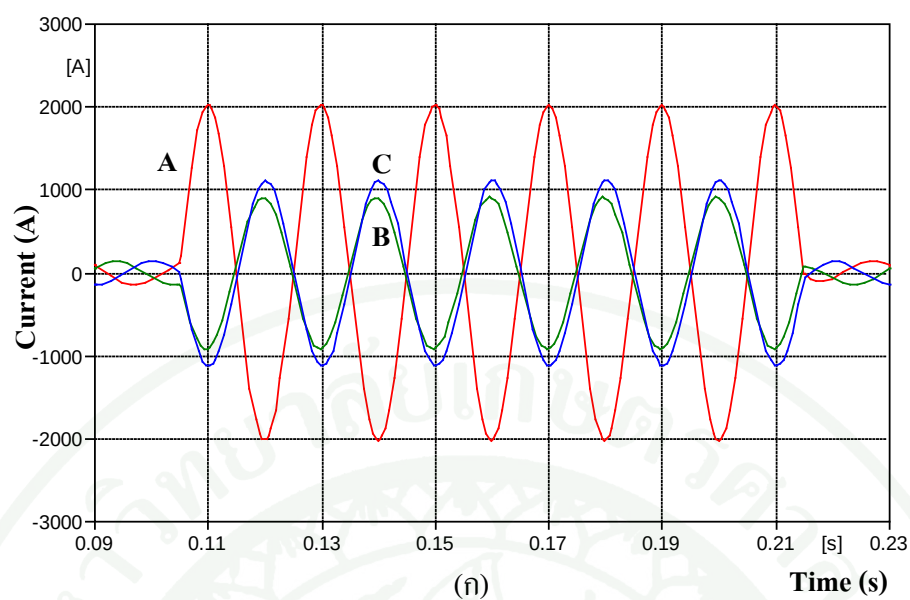
ภาพที่ 28 รูปคลื่นกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยมีอัตราส่วน X/R ของอิมพีแดนซ์เทวินินของแหล่งกำเนิดเท่ากับ 7.33 และ 20

ชนิดของการลัดวงจร

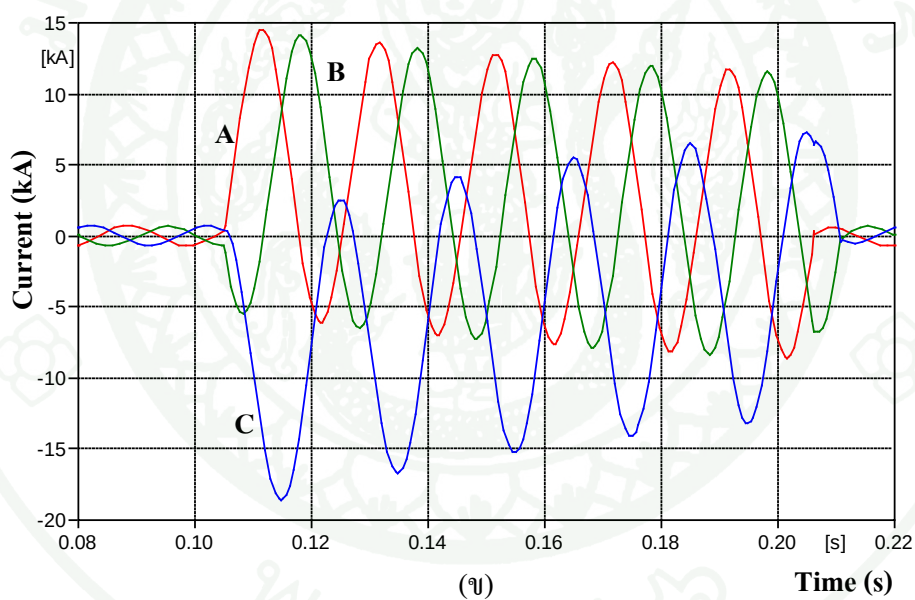
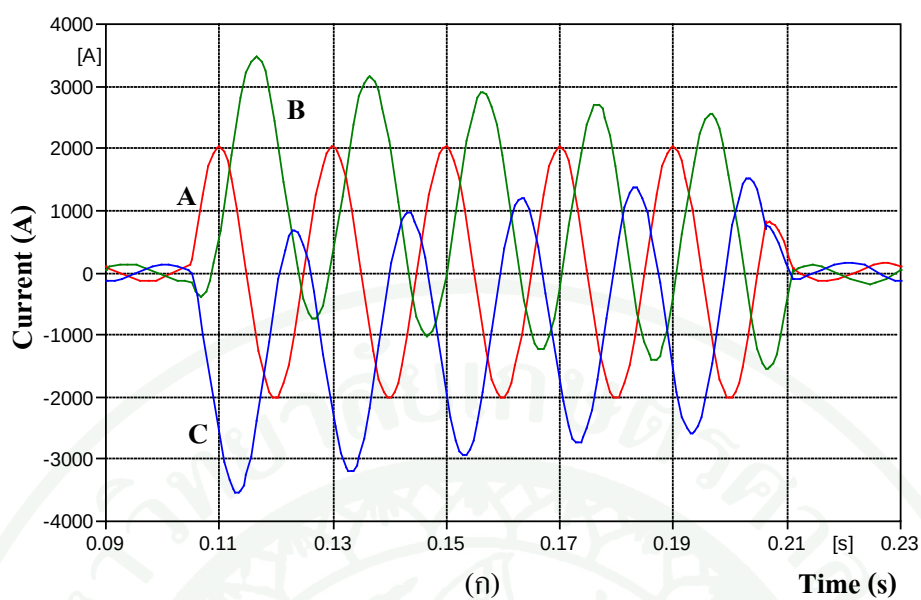
การลัดวงจรมีด้วยกันหลายชนิด โดยแต่ละชนิดมีลักษณะของการลัดวงจรที่แตกต่างกันซึ่งมีผลให้ค่ากระแสลัดวงจร ณ จุดที่ติดตั้งรีเลย์ในเฟสที่เกิดการลัดวงจรมีความแตกต่างกันตามแต่ละชนิดของการลัดวงจร จากผลการศึกษาพบว่า ค่ากระแสเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันตามแต่ละชนิดของการลัดวงจร โดยลักษณะของรูปคลื่นกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเกิดลัดวงจรด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ดังภาพที่ 29, 30 และ 31



ภาพที่ 29 รูปคลื่นกระแสลัดวงจรด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เมื่อเกิด
ลัดวงจรชนิด 1 เฟสลงดิน ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF1



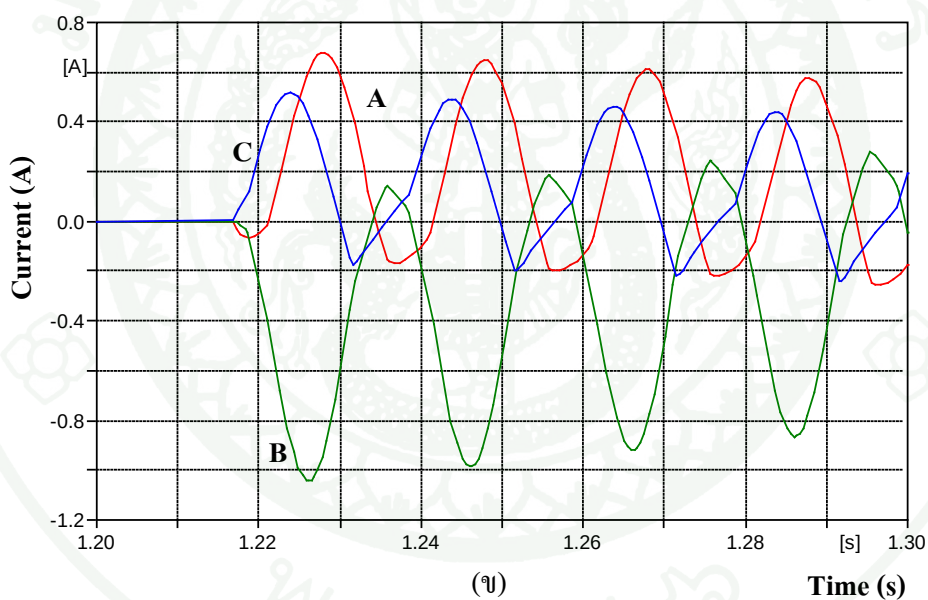
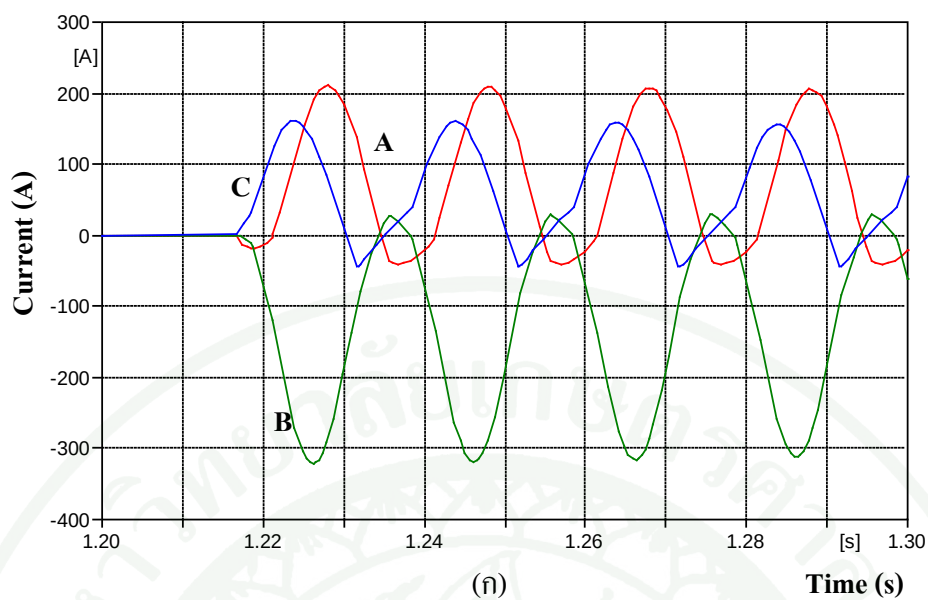
ภาพที่ 30 รูปคลื่นกระแสลัดวงจรด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เมื่อเกิด
ลัดวงจรชนิดระหว่างเฟส ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF2



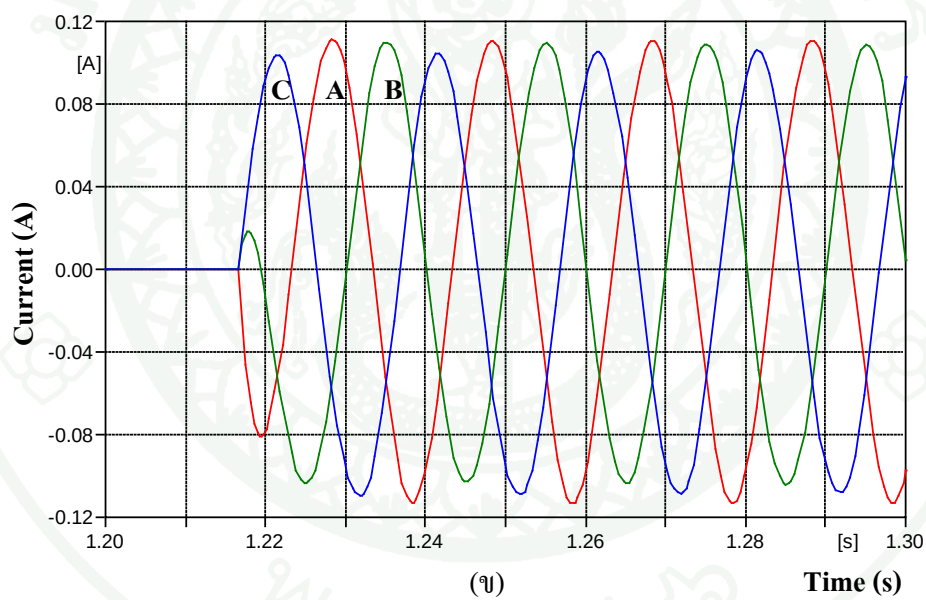
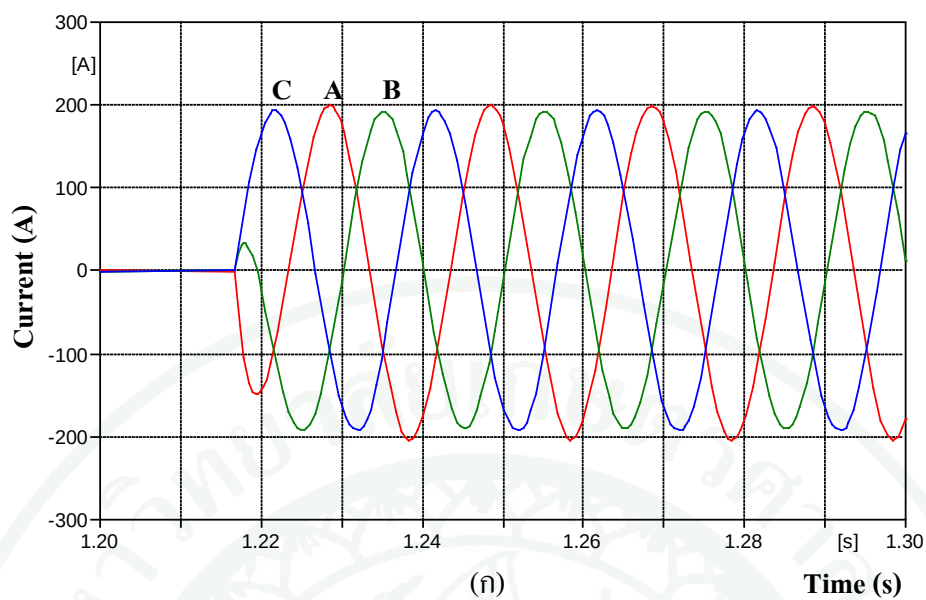
ภาพที่ 31 รูปคลื่นกระแสลัดวงจรด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เมื่อเกิด
ลัดวงจรชนิดสามเฟส ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF3

พฤติกรรมการตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแส เมื่อเกิดกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแส เมื่อเกิดกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้จากการนำผลของลักษณะรูปคลื่นกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าที่เกิดจากการปิดกลับวงจรอัตโนมัติของเซอกิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าดันทางตามกรณีศึกษากลุ่ม A ในตารางที่ 5 มาป้อนให้แบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงทดกระแส ที่ถูกสร้างด้วยโปรแกรม EMTP/ATP ซึ่งพบว่ารูปคลื่นกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดกระแสมีรูปคลื่นคล้ายคลึงกับรูปคลื่นกระแสด้านปฐมภูมิ เนื่องจากขนาดกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าที่เกิดขึ้นมีขนาดไม่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสลัดวงจร รวมถึงเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงทดกระแสที่เกิดจากการปิดกลับอัตโนมัติของเซอกิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าดันทางมีค่าไม่สูง ดังนั้นจึงไม่มีผลทำให้รูปคลื่นกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดกระแสผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นกระแสด้านปฐมภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 32 และ 33 ส่วนรายละเอียดตัวอย่างรูปคลื่นกระแสพฤติกรรมตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแสเมื่อเกิดกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า แสดงในภาคผนวก ก



ภาพที่ 32 รูปคลื่นกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กฟุ้งเข้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดกระแส กรณีศึกษา O90C30L10



ภาพที่ 33 รูปคลื่นกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กฟุ้งเข้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และ
ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดกระแส กรณีศึกษา O90C30L10

พฤติกรรมการตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง

การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแส เมื่อเกิดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้จากการนำผลของลักษณะรูปคลื่นกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจรตามกรณีศึกษากลุ่ม B, C และ D ในตารางที่ 6 ถึง 9 มาป้อนให้แบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงทดกระแส ที่ถูกสร้างด้วยโปรแกรม EMTP/ATP ซึ่งระดับความรุนแรงและการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสทางด้านพฤติกรรมของหม้อแปลงทดกระแสอันเนื่องมาจากการอึดตัวของหม้อแปลงทดกระแส โดยมีตัวอย่างรูปคลื่นกระแสพฤติกรรมตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง แสดงในภาคผนวก ค ส่วนปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการอึดตัวของหม้อแปลงทดกระแส มีดังนี้

อัตราส่วน X/R

ขณะเกิดการลัดวงจร เส้นแรงแม่เหล็ก (Ψ) ที่เกิดขึ้น เนื่องมาจากกระแสลัดวงจรที่ไม่สมมาตรที่มีออฟเซตกระแสดตรงสูงสุดประกอบด้วยส่วนประกอบกระแสสลับ (Ψ_{AC}) และส่วนประกอบกระแสดตรง (Ψ_{DC}) ดังสมการที่ (46)

$$\Psi = \Psi_{AC} + \Psi_{DC} \quad (46)$$

และเนื่องจาก
$$\frac{\Psi_{DC}}{\Psi_{AC}} = \frac{X}{R} \quad (47)$$

ดังนั้น
$$\Psi = \Psi_{AC} \left(1 + \frac{X}{R} \right) \quad (48)$$

จากสมการที่ (46) ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของหม้อแปลงทดกระแสแปรผันโดยตรงกับอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้ากำลังขณะเกิดการลัดวงจร สำหรับกรณีศึกษาได้กำหนด ให้อัตราส่วน X/R มีค่าเท่ากับ 7.33 และ 20 ดังนั้นมีค่าผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเท่ากับ 8.33 และ 21 เท่าของเส้นแรงแม่เหล็กสมมาตร ซึ่งในกรณีที่เกิดกระแสลัดวงจรไม่สมมาตรที่มีออฟเซตกระแสดตรงสูงสุดและมีขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กสมมาตรเพียงแค่ 3 เท่าของเส้นแรงแม่เหล็กในสภาวะปกติ ก็ทำให้ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 24.99 และ 63 เท่าของเส้นแรงแม่เหล็กในสภาวะปกติ ซึ่งมีขนาดมากพอที่จะทำให้เกิดการอึดตัวในแกนเหล็กของหม้อแปลงทดกระแส

จากการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังพบว่า ค่าอัตราส่วน X/R เมื่อมีค่าสูงมากขึ้นมีโอกาสให้เกิดการอิมตัวในหม้อแปลงทดกระแสเร็วขึ้น ดังภาพที่ 34 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี

ขนาดของเบอร์เดน

จากสมการที่ (49) เส้นแรงแม่เหล็กที่คำนวณได้นั้นมีองค์ประกอบทั้งที่เป็นกระแสสลับและกระแสดรง ซึ่งถ้าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าค่าเส้นแรงแม่เหล็กอิมตัวของแกนเหล็ก จะมีผลทำให้รูปคลื่นกระแสด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดกระแสเกิดการผิดเพี้ยนไปจากเดิม โดยที่องค์ประกอบกระแสสลับนั้นแปรผกผันกับค่าตัวประกอบกำลังของเบอร์เดน ดังนั้นเมื่อค่าตัวประกอบกำลังของเบอร์เดนมีค่าน้อยลง ก็ส่งผลให้ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนขององค์ประกอบกระแสสลับมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนขนาดองค์ประกอบกระแสดรงนั้นขึ้นอยู่กับการที่เวลา T_1 และ T_2 โดยที่ ค่าคงที่เวลา T_1 มีขนาดแปรผันตามกับค่าอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้าที่ต่ออยู่ทางด้านแรงดันสูง ซึ่งระบบที่มีค่าอัตราส่วน X/R มาก มีผลทำให้ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนขององค์ประกอบกระแสดรงมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

$$\psi = \frac{I_2 R_2}{\omega N} \left[\frac{\omega T_1 T_2}{(T_2 - T_1)} (e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1}) - \frac{1}{\cos(\theta)} \sin(\omega t + \theta) \right]$$

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

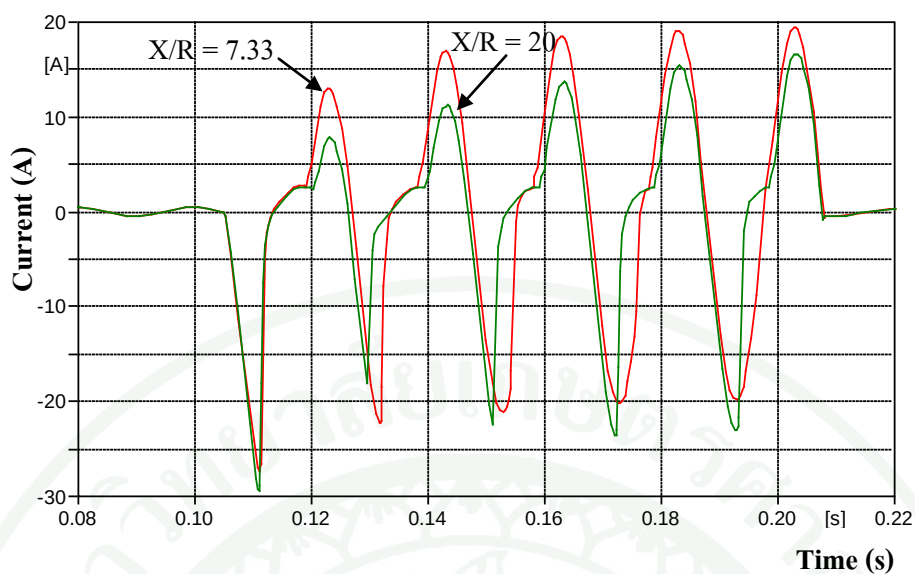
$$T_2 = \frac{L_2 + L_m}{R_2}$$

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1}$$

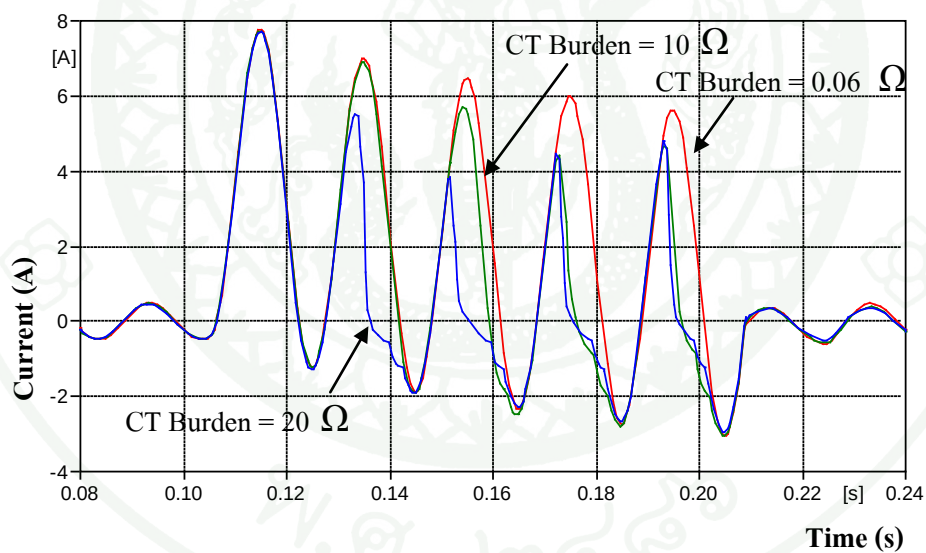
ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าขนาดของเบอร์เดนมีผลทำให้ค่าคงที่เวลาทางด้านทุติยภูมิเปลี่ยนแปลงและมีผลต่อขนาดและเวลาที่เกิดเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด จากกรณีศึกษาได้กำหนดให้เบอร์เดนมีค่าเท่ากับ 0.06, 10 และ 20 โอห์ม ซึ่งจากการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแสพบว่า ขนาดของเบอร์เดนยิ่งมากขึ้นก็ส่งผลให้เกิดการอิมตัวในหม้อแปลงทดกระแสรุนแรงมากขึ้น ดังภาพที่ 35

เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงทดกระแส

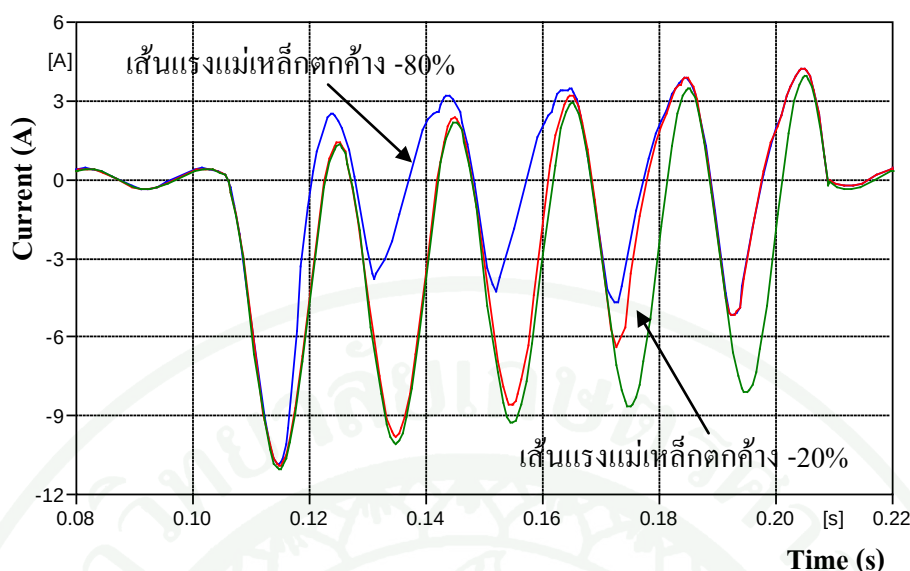
เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านหม้อแปลงทดกระแส ด้านปฐมภูมิมีขนาดสูงเป็นจำนวนหลายเท่าของกระแสโหลดปกติ ทำให้ค่ากระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดกระแสมีขนาดสูงขึ้นตามอัตราส่วนทดกระแส ผลที่เกิดขึ้นคือ เมื่อกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดกระแสสูงขึ้น ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมขั้วทุติยภูมิของหม้อแปลงทดกระแสมีค่าสูงขึ้น ซึ่งในทางทฤษฎี เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของหม้อแปลงทดกระแส จะแปรผันตามค่าแรงดันที่ตกคร่อมขั้วทุติยภูมิของหม้อแปลงทดกระแส เมื่อระบบป้องกันทำงานสั่งเซอกิตเบรกเกอร์ปลดวงจรเพื่อกำจัดกระแสลัดวงจรออก แต่คุณสมบัติของแกนเหล็กที่ใช้ทำหม้อแปลงทดกระแส จะไม่สามารถลดปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กตามการลดลงของกระแสลัดวงจรได้ทั้งหมดทำให้มีปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนตกค้างอยู่ในแกนเหล็กของหม้อแปลงทดกระแส ซึ่งปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ตกค้างจะขึ้นอยู่กับมุมมองของเซอกิตเบรกเกอร์ที่ทำการตัดกระแสลัดวงจรบนรูปคลื่นแรงดัน ดังนั้นเมื่อเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรขึ้นอีกครั้งหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างที่มีอยู่เดิมจะไปรวมกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นใหม่ ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองมีทิศทางที่เสริมกันก็จะส่งผลให้หม้อแปลงทดกระแสอิ่มตัวได้รวดเร็วขึ้น แต่ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองมีทิศทางที่หักล้างกัน ก็จะส่งผลให้หม้อแปลงทดกระแสมีโอกาสอิ่มตัวลดลง ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงทดกระแส เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กที่ตกค้างเดิมกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นใหม่มีทิศทางเสริมกันจะมีผลทำให้รูปคลื่นกระแสผิดเพี้ยนมากกว่าผลของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างเดิมมีทิศทางหักล้างกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งจะมีผลต่อกระแสกระตุ้นที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้กระแสที่ไหลเข้ารีเลย์ลดลง ตามภาพที่ 36 พบว่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง -80% จะมีผลทำให้รูปคลื่นกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดกระแสผิดเพี้ยนมากกว่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง -20% ซึ่งจะส่งผลให้กระแสที่ไหลเข้ารีเลย์มีขนาดลดลงและรูปคลื่นผิดเพี้ยน



ภาพที่ 34 รูปคลื่นกระแสที่เกิดการอิ่มตัวในหม้อแปลงทดสอบตามค่าอัตราส่วน X/R



ภาพที่ 35 รูปคลื่นกระแสที่เกิดการอิ่มตัวในหม้อแปลงทดสอบตามค่าของเบอร์เดน



ภาพที่ 36 รูปคลื่นกระแสที่เกิดการอิ่มตัวในหม้อแปลงทดสอบตามปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง -20% และ -80%

ผลทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเชิงพาณิชย์ จำนวน 2 ตัวตามแผนการทดสอบ เพื่อนำผลการตอบสนองมาใช้เปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายใต้เงื่อนไขกระแสลัดเล็งสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าและการลัดวงจรที่แตกต่างกันตามกรณีศึกษาที่กำหนดไว้ โดยมุ่งเน้นไปที่ความน่าเชื่อถือและเวลาในการทำงาน ผลการทดสอบตามกรณีศึกษากระแสลัดเล็งสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามีรายละเอียดดังตารางที่ 9 ส่วนผลทดสอบตามกรณีศึกษาการลัดวงจรมีรายละเอียดดังตารางที่ 16, 17 และเส้นกราฟในภาพที่ 41, 42 และ 43 โดยปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีดังต่อไปนี้

กรณีกระแสไหลเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า

เส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

จากการทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง พบว่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เกิดขึ้นจากมุมมองเสาการเปิดวงจรของเซอกิตเบรกเกอร์ ซึ่งจากผลการทดสอบตามตารางที่ 9 พบว่ามุมเปิดวงจรของเซอกิตเบรกเกอร์ที่มีผลให้รีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทำงาน เกิดขึ้นกับทุกมุมตามกรณีศึกษา คือ มุม 0, 90, 180 และ 270 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากปริมาณฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 ที่เกิดขึ้นในกระแสผลต่าง โดยใช้โปรแกรม ATP Analyzer พบว่า ปริมาณฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 ของทุกกรณีศึกษาที่รีเลย์ SEL 587 ทำงาน มีปริมาณต่ำกว่าระดับฮาร์มอนิกส์ที่ปรับตั้งไว้ (15%) ประกอบกับปริมาณกระแสผลต่างที่เกิดขึ้นมีขนาดเกินค่าเซตตั้งและอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ จึงมีผลให้รีเลย์ทำงาน ส่วนในกรณีที่รีเลย์ KBCH 120 มีการทำงาน เนื่องจาก ระยะห่างระหว่างลูกคลื่นมีค่าน้อยกว่า 5 ms. และปริมาณกระแสผลต่างที่เกิดขึ้นมีขนาดเกินค่าเซตตั้งและอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ จึงมีผลให้รีเลย์ทำงาน ส่วนผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ATP Analyzer แสดงไว้ในตารางที่ 10 และ 11

มุมมองเสาปิดวงจร

จากการทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง พบว่า มุมองศาปิดวงจรที่เกิดจากการปิดกลับอัตโนมัติของเซอกิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทาง จากผลการทดสอบตามตารางที่ 9 พบว่ามุมปิดกลับวงจรของเซอกิตเบรกเกอร์ที่มีผลให้รีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทำงาน เกิดขึ้นกับมุม 0, 30, 180 และ 270 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากปริมาณฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 ที่เกิดขึ้นในกระแสผลต่าง โดยใช้โปรแกรม ATP Analyzer แล้วพบว่า ปริมาณฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 ของทุกกรณีศึกษาที่รีเลย์ทำงาน มีปริมาณต่ำกว่าระดับฮาร์มอนิกส์ที่ปรับตั้งไว้ ประกอบกับปริมาณกระแสผลต่างที่เกิดขึ้นมีขนาดเกินค่าเซตตั้งและอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ จึงมีผลให้รีเลย์ทำงาน ส่วนผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ATP Analyzer แสดงไว้ในตารางที่ 10

ภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

จากการทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง พบว่า ปริมาณภาระโหลดที่เชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในขณะที่เกิดการปิดกลับวงจรอัตโนมัติของเซอกิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทางมีผลต่อการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยปริมาณโหลดที่เชื่อมต่อ 10% มีจำนวนครั้งการทำงานของรีเลย์มากกว่าปริมาณโหลดที่เชื่อมต่อ 80% ซึ่งเมื่อใช้โปรแกรม ATP Analyzer วิเคราะห์ปริมาณกระแสผลต่างแล้วพบว่าที่ปริมาณโหลด 10% มีขนาดกระแสผลต่างที่เกิดขึ้นมากกว่าปริมาณโหลด 80% ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ไว้ในตารางที่ 10 ส่วนรูปคลื่นกระแสผลต่างและ Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงานของรีเลย์แสดงไว้ในภาคผนวก ง

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ในกระแสผลต่างแปรผันตามมุมมองเสาเปิดวงจร, มุมมองเสาปิดวงจร และปริมาณภาระโหลดเชื่อมต่อ กรณีศึกษากลุ่ม A (เฉพาะกรณีที่รีเลย์ทำงาน)

กรณีศึกษา	% 2 nd Harmonic/Fund. In differential current Phase A			% 2 nd Harmonic/Fund. In differential current Phase B			% 2 nd Harmonic/Fund. In differential current Phase C		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	Cycle no.								
O0C180L10	15.25	14.92	12.98	56.33	56.66	57.23	15.02	16.41	17.98
Point on slope	EXCEED			BELOW			EXCEED		
O0C270L10	27.16	27.40	28.21	9.89	11.77	13.31	10.72	11.05	12.24
Point on slope	BELOW			EXCEED			EXCEED		
O90C0L10	16.66	17.71	19.62	14.46	14.35	13.19	58.65	58.45	59.98
Point on slope	EXCEED			EXCEED			BELOW		
O90C270L10	30.16	30.84	31.99	14.68	15.27	17.32	14.03	13.70	15.18
Point on slope	BELOW			EXCEED			EXCEED		
O180C0L10	14.63	14.52	12.86	52.22	56.63	57.11	15.15	16.36	18.35

ตารางที่ 10 (ต่อ)

กรณีศึกษา	% 2 nd Harmonic/Fund.			% 2 nd Harmonic/Fund.			% 2 nd Harmonic/Fund.		
	In differential current			In differential current			In differential current		
	Phase A			Phase B			Phase C		
Point on slope	EXCEED			BELOW			EXCEED		
O270C180L10	11.87	13.23	15.77	11.95	12.72	14.84	27.02	25.43	26.37
Point on slope	EXCEED			EXCEED			BELOW		
O0C30L10	58.67	59.46	60.13	15.82	16.84	20.43	17.60	17.68	15.89
Point on slope	BELOW			EXCEED			EXCEED		
O90C30L10	12.03	12.84	15.23	10.29	10.96	10.56	22.83	23.08	24.32
Point on slope	EXCEED			EXCEED			EXCEED		
O0C270L80	21.44	23.84	23.97	8.53	9.08	8.78	10.34	12.39	13.51
Point on slope	BELOW			EXCEED			EXCEED		
O90C270L80	31.34	31.57	31.79	16.24	16.61	18.86	14.70	13.58	16.11
Point on slope	BELOW			EXCEED			BELOW		
O180C0L80	17.48	18.07	19.38	42.79	42.91	43.02	18.61	19.04	19.85
Point on slope	EXCEED			BELOW			EXCEED		
O270C180L80	13.06	14.76	16.11	13.60	14.44	15.40	24.34	24.19	25.61
Point on slope	EXCEED			BELOW			BELOW		
O90C30L80	14.97	14.95	16.06	10.96	12.59	13.90	21.81	21.97	22.35
Point on slope	BELOW			EXCEED			BELOW		

หมายเหตุ EXCEED หมายถึง ค่ากระแสผลต่างอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์
 BELOW หมายถึง ค่ากระแสผลต่างอยู่ใต้เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์กระแสผลต่างและระยะห่างระหว่างลูกคลื่นในกระแสผลต่างแปรผันตามมุมมองเสาเปิดวงจร, มุมมองเสาปิดวงจร และปริมาณภาระโหลดเชื่อมต่อ กรณีศึกษา กลุ่ม A (เฉพาะกรณีทีรีเลย์ KBCH 120 ทำงาน)

กรณีศึกษา	Gap			Gap			Gap		
	In differential current			In differential current			In differential current		
	Phase A			Phase B			Phase C		
Cycle no.	1	2	3	1	2	3	1	2	3
O0C270L10	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Point on slope	BELOW			BELOW			EXCEED		
O270C180L10	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Point on slope	EXCEED			BELOW			BELOW		
O90C30L10	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Point on slope	BELOW			EXCEED			BELOW		

หมายเหตุ B หมายถึง Gap ระหว่างลูกคลื่นน้อยกว่า 5 msec

E หมายถึง Gap ระหว่างลูกคลื่นมากกว่า 5 msec

กรณีเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง

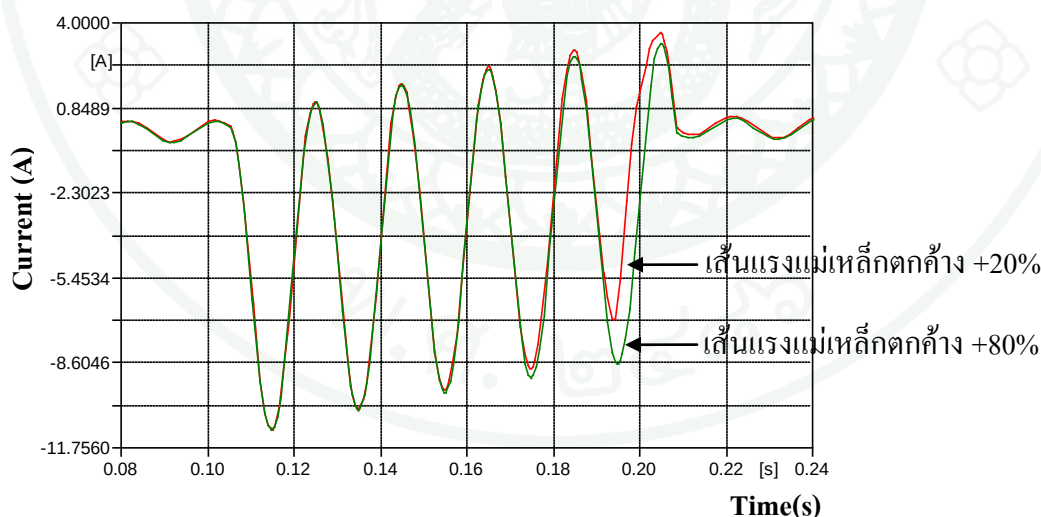
ทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเชิงพาณิชย์จำนวน 2 ตัว ตามแผนการทดสอบ เพื่อนำผลการตอบสนองมาใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายใต้เงื่อนไขการลัดวงจรที่แตกต่างกันตามกรณีศึกษากลุ่ม B, C และ D โดยมุ่งเน้นไปที่ความน่าเชื่อถือและเวลาในการทำงาน สำหรับผลการทดสอบตามกรณีศึกษากลุ่ม B มีรายละเอียดดังตารางที่ 12 และ 13 ผลการทดสอบตามกรณีศึกษากลุ่ม C มีรายละเอียดดังตารางที่ 14 ส่วนผลการทดสอบตามกรณีศึกษากลุ่ม D มีรายละเอียดดังตารางที่ 15 โดยปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มีดังต่อไปนี้

การอิมตัวของ CT

กรณีศึกษากลุ่ม B

กรณีศึกษากลุ่ม B เป็นการทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยจำลองการลัดวงจรนอกเขตป้องกันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และกำหนดให้หม้อแปลงทดกระแสมีโหลดเบอร์เดน $2 + j 2.89 \Omega$ เชื่อมต่อด้านทุติยภูมิ โดยปรับเปลี่ยนค่า X/R 7.33 และ 20 และกำหนดให้หม้อแปลงทดกระแสมีปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง $\pm 20\%$ และ $\pm 80\%$ ซึ่งสามารถจำลองการทดสอบรีเลย์ตามชนิดการลัดวงจรได้ 24 กรณีจากการทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังพบว่า การอิมตัวของ CT มีผลต่อการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ดังตารางที่ 11 พบว่ารีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทั้ง 2 ตัว ไม่ทำงาน ซึ่งเมื่อวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ATP Analyzer แล้วพบว่า ในกรณีที่เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างใน CT แบบขั้วบวก จะไม่ทำให้หม้อแปลงทดกระแสอิมตัวมากนัก และพบว่ากรณีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง $+20\%$ จะให้ผลการอิมตัวของ CT มากกว่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง $+80\%$ เนื่องจาก การจำลองกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นเป็นการจำลองมุมมองจากการลัดวงจรที่มุม 90 องศา ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กใน CT ในขณะที่เกิดลัดวงจรมีทิศทางเพิ่มขึ้นในแนวแกนขั้วลบ ดังนั้นเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างใน CT ก่อนเกิดการลัดวงจร ถ้ามีปริมาณมากในทิศทางขั้วบวก จะช่วยลดผลการอิมตัวของ CT ส่วนในกรณีที่เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างใน CT ก่อนเกิดการลัดวงจร ถ้ามีปริมาณเพิ่มขึ้นในทิศทางลบ จะช่วยเสริมให้ CT อิมตัวได้ง่ายขึ้น ดังนั้น เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างใน CT ปริมาณ $+20\%$ จึงให้ผลการอิมตัว CT มากกว่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างใน CT 80% ดังภาพที่ 34 ในทำนองเดียวกัน กรณีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างใน CT ถ้ามีปริมาณมากในทิศทางลบ เช่น -80% จะให้ผลการอิมตัว CT มากกว่า -20% ดังภาพที่ 33 ดังนั้น สามารถสรุปผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATP Analyzer ได้ว่า ในกรณีที่ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างใน CT $+20\%$ และ $+80\%$ รีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทั้ง 2 ตัวจะไม่ทำงาน เนื่องจาก ในกรณีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง $+20\%$ ทำให้ Locus ของกระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงานอยู่ใต้เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ โดยกระแสผลต่างที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากผลของการอิมตัวของ CT บางส่วนเนื่องมาจากเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง $+20\%$ แต่ปริมาณของกระแสผลต่างที่เกิดขึ้นไม่มากพอที่จะทำให้รีเลย์ทำงาน ซึ่งมีผลให้รีเลย์ไม่ทำงานในกรณีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง $+20\%$ ส่วนในกรณีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างใน CT $+80\%$ Locus ของกระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงานอยู่ใต้เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ โดยกระแสผลต่างที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก อาจกล่าวได้ว่าไม่เกิดกระแสผลต่างเลย เนื่องจากไม่เกิดการอิมตัวของ CT ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

+80% ช่วยชดเชยเส้นแรงแม่เหล็กในขณะเกิดการลัดวงจร ทำให้รูปคลื่นกระแสด้านทุติยภูมิของ CT ไม่ผิดเพี้ยน ซึ่งมีผลทำให้รีเลย์ไม่ทำงานในกรณีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง +80% ในกรณีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างใน CT -20% การลัดวงจรนอกเขตป้องกันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และหม้อแปลงทดกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังอ้อมตัว พบว่ารีเลย์ทั้ง 2 ตัวให้ผลการทดสอบเหมือนกัน คือ ไม่เกิดการ ทำงานผิดพลาด ซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ATP Analyzer พบว่าผลการอ้อมตัวของหม้อแปลงทดกระแสทำให้เกิดกระแสผลต่างที่มีขนาดมากกว่าค่าเซตตั้ง แต่ลักษณะรูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 ในกระแสผลต่างมากกว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking ของรีเลย์รุ่น SEL 587 ทำให้รีเลย์ยับยั้งการทำงาน ส่วนรีเลย์รุ่น KBCH 120 จะใช้วิธีตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 โดยใช้หลักการวัดช่องว่าง (Gap) ระหว่างรูปคลื่น ถ้ารูปคลื่นมีช่องว่างห่างกันมากกว่า 1/4 ไซเคิล (5 msec) รีเลย์จะยับยั้งการทำงาน ผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ATP Analyzer ตามกรณีศึกษา กลุ่ม B ในกรณีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างใน CT -20% และ -80% ซึ่งให้ผลการอ้อมตัวของ CT มากกว่า +20% และ +80% แสดงในตารางที่ 12 และ 13 ส่วนภาพที่ 38 แสดงตัวอย่าง Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงานของรีเลย์ ตามกรณีศึกษา B1R80NF1 ซึ่งพบว่าเฟส A อยู่ใต้เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ เฟส B และ C อยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์แต่มีปริมาณ 2nd Harmonic เกินค่าเซตตั้งทำให้รีเลย์ไม่ทำงาน



ภาพที่ 37 รูปคลื่นกระแสอ้อมตัวใน CT ตามปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง +20% และ +80%

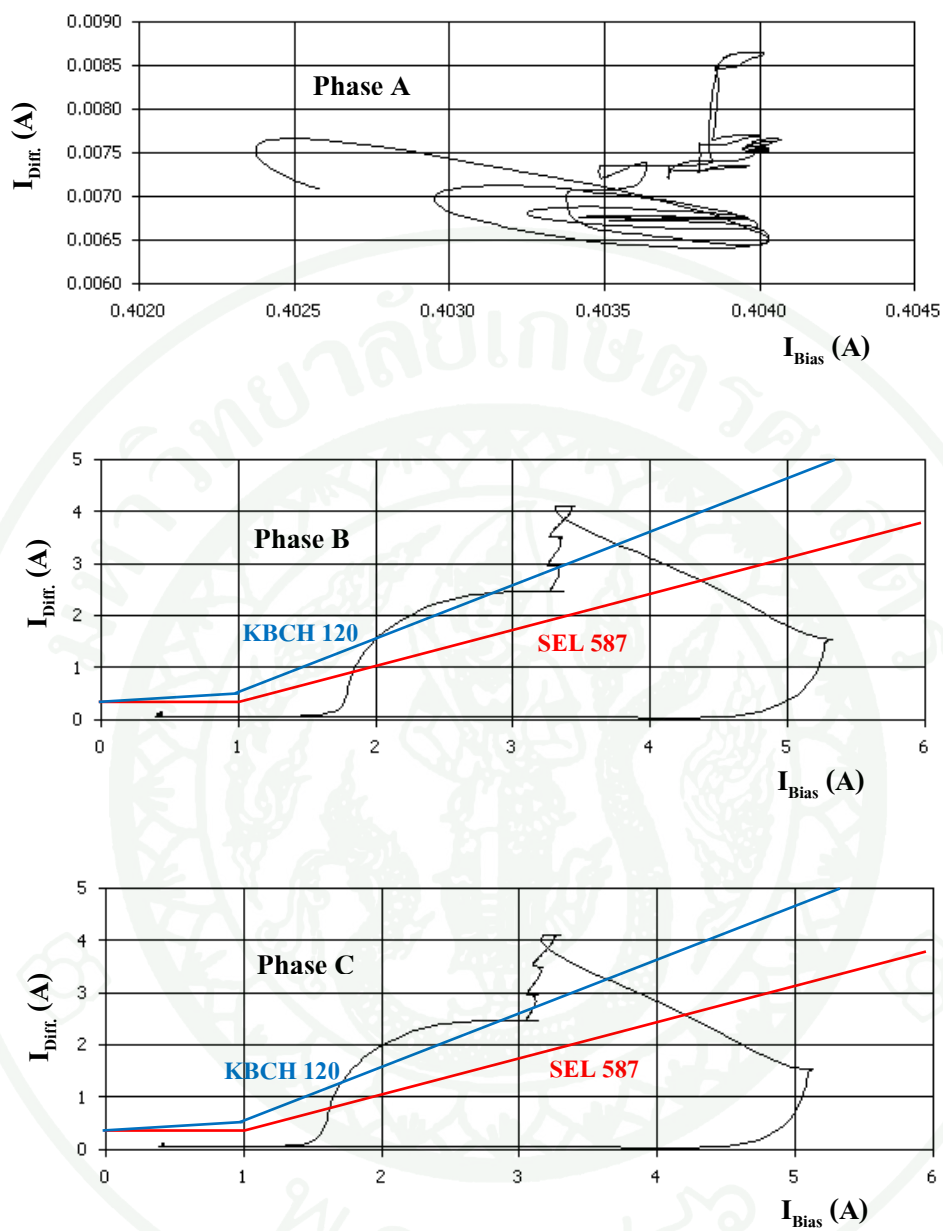
ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ในกระแสผลต่างตามกรณีศึกษากลุ่ม B

กรณีศึกษา	%2 nd Harmonic /			%2 nd Harmonic /			%2 nd Harmonic /		
	Fundamental			Fundamental			Fundamental		
	Phase A			Phase B			Phase C		
Cycle no.	1	2	3	1	2	3	1	2	3
B1R20NF1	1.41	9.58	8.10	59.91	38.30	35.63	22.42	35.91	35.74
B1R80NF1	4.20	2.80	1.50	84.75	21.38	28.71	34.74	21.25	20.61
B1R20NF2	21.06	10.13	11.00	7.99	8.21	9.45	22.09	5.42	5.02
B1R80NF2	13.67	10.57	10.72	11.05	21.71	21.49	5.87	5.72	5.69
B1R20NF3	82.21	69.22	65.07	26.62	30.24	40.21	13.04	29.19	42.32
B1R80NF3	74.47	71.18	60.66	77.11	16.00	31.23	16.66	25.23	34.47
B2R20NF1	6.59	3.79	1.21	32.54	23.35	27.82	38.56	23.19	27.72
B2R80NF1	2.84	12.97	6.95	42.86	17.22	21.19	48.04	17.02	23.17
B2R20NF2	22.60	12.10	13.68	28.04	14.35	13.77	10.06	8.69	8.92
B2R80NF2	12.64	10.40	12.03	18.47	23.81	23.78	5.96	4.46	3.49
B2R20NF3	97.05	90.00	72.93	47.97	27.83	26.39	71.88	29.63	28.78
B2R80NF3	84.55	68.45	65.12	45.49	16.85	21.09	42.05	18.83	21.44

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน ตามกรณีศึกษากลุ่ม B

กรณีศึกษา	ผลวิเคราะห์ ATP		ผลตอบสนองของ		สาเหตุการไม่ทำงานของรีเลย์			
	Analyzer		รีเลย์					
	SEL	KBCH	SEL	KBCH	SEL 587		KBCH 120	
	587	120	587	120	Slope	2 nd Har.	Slope	2 nd Har.
B1R20NF1	NOT	NOT	NOT	NOT	E	E	E	Gap>5
	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP				msec
B1R80NF1	NOT	NOT	NOT	NOT	E	E	E	Gap>5
	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP				msec
B1R20NF2	NOT	NOT	NOT	NOT	B	B	B	Gap<5
	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP				msec
B1R80NF2	NOT	NOT	NOT	NOT	B	B	B	Gap<5
	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP				msec
B1R20NF3	NOT	NOT	NOT	NOT	B	B	B	Gap>5
	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP				msec
B1R80NF3	NOT	NOT	NOT	NOT	B	B	B	Gap>5
	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP				msec
B2R20NF1	NOT	NOT	NOT	NOT	E	E	B	Gap>5
	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP				msec
B2R80NF1	NOT	NOT	NOT	NOT	E	E	E	Gap>5
	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP				msec
B2R20NF2	NOT	NOT	NOT	NOT	B	B	B	Gap<5
	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP				msec
B2R0NF2	NOT	NOT	NOT	NOT	B	B	B	Gap<5
	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP				msec
B2R20NF3	NOT	NOT	NOT	NOT	B	E	B	Gap>5
	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP				msec
B2R80NF3	NOT	NOT	NOT	NOT	E	E	B	Gap>5
	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP				msec

ตามตารางที่ 13 E (Exceed) หมายถึง ค่ากระแสผลต่างอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์
B (Below) หมายถึง ค่ากระแสผลต่างอยู่ใต้เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์



ภาพที่ 38 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงานของรีเลย์ ตามกรณีศึกษา B1R80NF1

กรณีศึกษากลุ่ม C

ในกรณีศึกษากลุ่ม C เป็นการทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยจำลองการลัดวงจรนอกเขตป้องกันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และกำหนดให้หม้อแปลงทดกระแสมีโหลดเบอร์เดน 120% ($24\ \Omega$) เชื่อมต่อด้านทุติยภูมิ โดยปรับเปลี่ยนค่า X/R 7.33 และ 20 และกำหนดให้หม้อแปลงทดกระแสมีปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง $\pm 80\%$ ซึ่งสามารถจำลองการทดสอบรีเลย์ตามชนิดการลัดวงจรได้ 6 กรณี

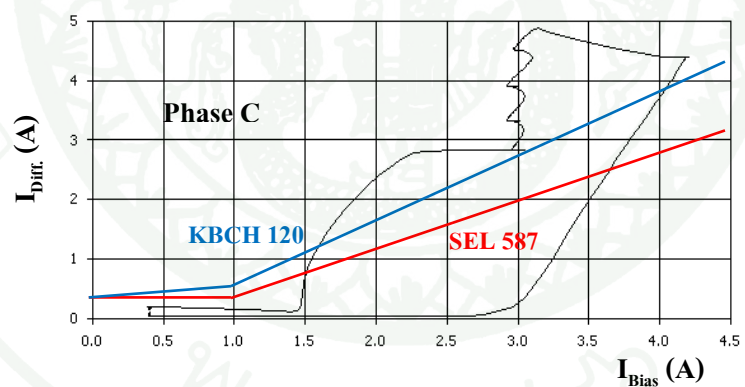
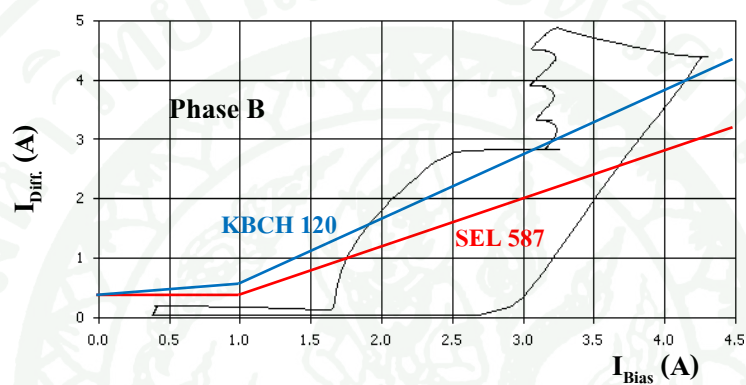
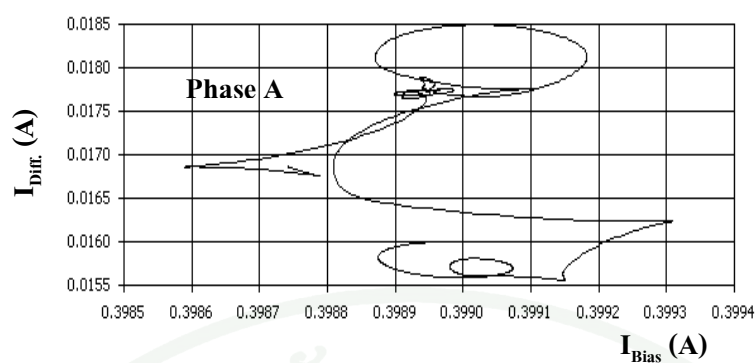
จากการทดสอบการทำงานของรีเลย์เชิงพาณิชย์จำนวน 2 ตัว พบว่า กรณีศึกษา C2R80B120F1 รีเลย์รุ่น SEL 587 ทำงานเพียงกรณีเดียว แสดงเฟสการทำงาน B, C ส่วนรีเลย์รุ่น KBCH 120 ไม่มีการทำงานในทุกกรณี ส่วนสาเหตุการทำงานของรีเลย์รุ่น SEL 587 เมื่อวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ATP Analyzer พบว่า Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงานของรีเลย์อยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ เฟส B, C และมีระดับ 2^{nd} Harmonic ต่ำกว่าค่าเซตตั้ง 2^{nd} Harmonic Blocking ทำให้รีเลย์ทำงาน ตามภาพที่ 39 และ 40 ส่วนในกรณีศึกษาอื่นๆ รีเลย์ไม่มีการทำงานเนื่องจากในบางกรณี Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงานของรีเลย์ อยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์แต่มีระดับ 2^{nd} Harmonic สูงกว่าค่าเซตตั้ง 2^{nd} Harmonic Blocking และในบางกรณี Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงานของรีเลย์ อยู่ใต้เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ทำให้รีเลย์ไม่ทำงาน ซึ่งตรงตามข้อมูลผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ATP Analyzer ในตารางที่ 14 ส่วนรีเลย์ KBCH 120 ไม่มีการทำงานในทุกกรณีเนื่องจากระยะห่างระหว่างลูกคลื่นมากกว่า 5 msec ซึ่งเกิดจากการอิ่มตัวของ CT ทำให้รีเลย์ยับยั้งการทำงาน รายละเอียดรูปคลื่นกระแสผลต่างแสดงในภาคผนวก ง

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์ระดับ 2nd Harmonic ในกระแสผลต่างของรีเลย์ รุ่น SEL 587
ตามกรณีศึกษากลุ่ม C

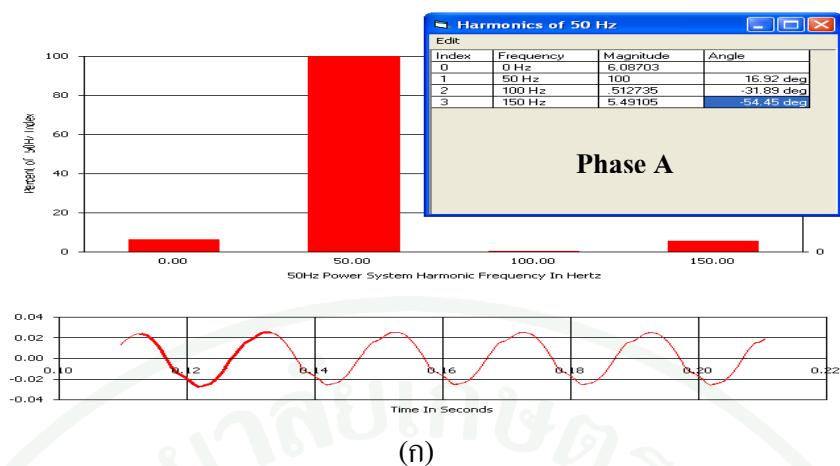
	% 2 nd Harmonic/Fund.			% 2 nd Harmonic/Fund.			% 2 nd Harmonic/Fund.		
กรณีศึกษา	In differential current			In differential current			In differential current		
	Phase A			Phase B			Phase C		
Cycle no.	1	2	3	1	2	3	1	2	3
C1R80B120F1	3.86	2.14	3.85	40.40	20.63	31.28	40.24	19.33	31.12
Point on slope	BELOW			EXCEED			EXCEED		
C2R80B120F1	3.62	2.24	1.69	13.27	14.37	23.54	12.32	14.45	23.49
Point on slope	BELOW			EXCEED			EXCEED		
C1R80B120F2	74.65	52.55	59.70	79.82	52.27	60.31	73.69	54.24	61.94
Point on slope	EXCEED			EXCEED			EXCEED		
C2R80B120F2	73.55	49.45	54.49	81.12	48.98	55.82	74.62	51.42	56.66
Point on slope	EXCEED			EXCEED			BELOW		
C1R80B120F3	37.81	49.37	56.31	38.29	10.12	2.45	40.62	29.87	38.23
Point on slope	BELOW			EXCEED			EXCEED		
C2R80B120F3	52.62	45.79	48.57	37.37	13.72	8.23	38.61	26.09	32.35
Point on slope	EXCEED			EXCEED			EXCEED		

หมายเหตุ EXCEED หมายถึง ค่ากระแสผลต่างอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์

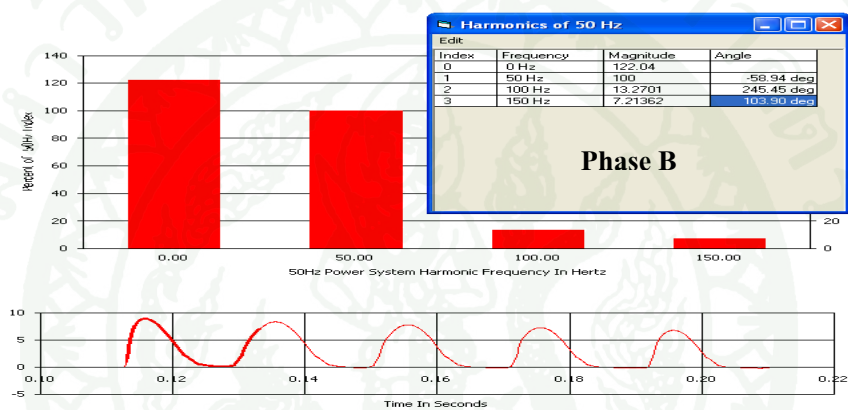
BELOW หมายถึง ค่ากระแสผลต่างอยู่ใต้เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์



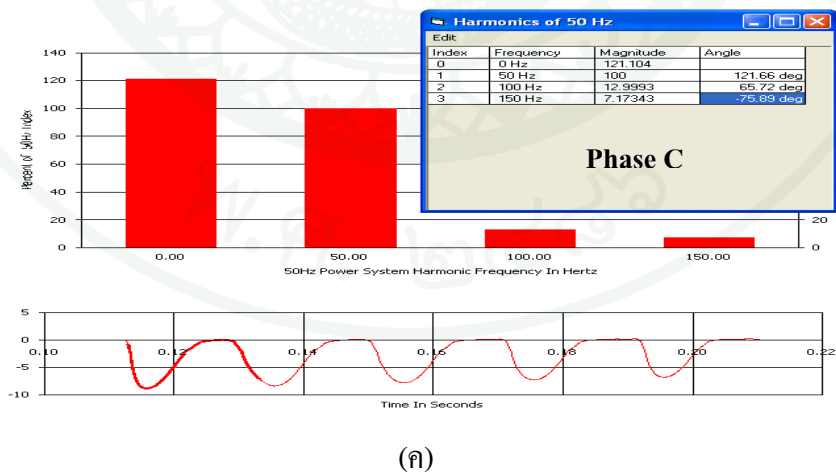
ภาพที่ 39 Locus กระแสผลต่าง / กระแสต้านการทำงานของรีเลย์ ตามกรณีศึกษา C2R80B120F1



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 40 ระดับ 2nd Harmonic ในกระแสต่างตามกรณีศึกษา C2R80B120F1

กรณีศึกษากลุ่ม D

ในกรณีศึกษากลุ่ม D เป็นการทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยจำลองการลัดวงจรในเขตป้องกันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และปรับเปลี่ยนค่าโหลดเบอร์เดนของหม้อแปลงทดสอบ 3% (0.06Ω), 50% (10Ω) และ 100% (20Ω) เชื่อมต่อด้านทุติยภูมิ ทดสอบการทำงานจำนวน 30 ครั้งโดยปรับเปลี่ยนชนิดการลัดวงจร ซึ่งสามารถจำลองการทดสอบได้จำนวนทั้งสิ้น 9 กรณี

จากผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เชิงพาณิชย์จำนวน 2 ตัว พบว่า ในกรณีการลัดวงจรชนิด SLG โหลดเบอร์เดน 20Ω ตามกรณีศึกษา DB3F1 จากการทดสอบการทำงานจำนวน 30 ครั้ง พบว่ารีเลย์รุ่น SEL 587 มีจำนวนครั้งการทำงาน 18 ครั้ง รีเลย์รุ่น KBCH 120 มีการทำงานถูกต้องทุกครั้ง ในกรณีการลัดวงจรชนิด L – L และ 3PH โหลดเบอร์เดน 20Ω ตามกรณีศึกษา DB3F2 และ DB3F3 ทดสอบการทำงานจำนวน 30 ครั้ง รีเลย์รุ่น SEL 587 ไม่มีการทำงาน ส่วนรีเลย์รุ่น KBCH 120 ทำงานถูกต้องทุกครั้ง สาเหตุการไม่ทำงานของรีเลย์รุ่น SEL 587 ตามกรณีศึกษา DB3F2 และ DB3F3 เนื่องจาก ที่โหลดเบอร์เดน 100% (20Ω) จะให้ผลการอิ่มตัวของหม้อแปลงทดสอบมากกว่าที่โหลดเบอร์เดน 3% (0.06Ω) และ 50% (10Ω) ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATP Analyzer พบว่า การอิ่มตัวของหม้อแปลงทดสอบจะทำให้รูปคลื่นด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบผิดเพี้ยนไปซึ่งจะทำให้เกิดองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 ซึ่งถ้ากระแสผลต่างที่เกิดจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงทดสอบมีปริมาณฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 มากเกินกว่าค่าเซตตั้ง 2^{nd} Harmonic Blocking ก็จะทำให้รีเลย์ยับยั้งการทำงาน ส่วนรีเลย์รุ่น KBCH 120 จะใช้วิธีตรวจจับองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 โดยใช้หลักการวัดระยะห่าง (Gap) ระหว่างรูปคลื่น ถ้ารูปคลื่นมีช่องว่างห่างกันมากกว่า $1/4$ ไซเคิล (5 msec) รีเลย์จะยับยั้งการทำงาน ซึ่งในกรณีศึกษานี้ เมื่อใช้โปรแกรม ATP Analyzer วิเคราะห์รูปคลื่นกระแสผลต่าง พบว่าในทุกกรณีไม่มีช่องว่างระหว่างรูปคลื่น ทำให้รีเลย์รุ่น KBCH 120 ทำงานในทุกกรณี ผลการวิเคราะห์ระดับ 2^{nd} Harmonic ของรีเลย์ SEL 587 แสดงในตารางที่ 15 ส่วนรายละเอียดรูปคลื่นกระแสผลต่างแสดงในภาคผนวก ง

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ระดับ 2nd Harmonic ในกระแสผลต่างของรีเลย์ รุ่น SEL 587 ตาม
กรณีศึกษากลุ่ม D

	% 2 nd Harmonic/Fund.			% 2 nd Harmonic/Fund.			% 2 nd Harmonic/Fund.		
กรณีศึกษา	In differential current			In differential current			In differential current		
	Phase A			Phase B			Phase C		
Cycle no.	1	2	3	1	2	3	1	2	3
DB1F1	5.65	0.80	2.74	4.08	2.72	2.34	3.46	2.94	1.85
Point on slope	BELOW			EXCEED			EXCEED		
DB2F1	44.92	35.24	42.59	4.03	3.10	13.72	3.76	4.12	12.79
Point on slope	BELOW			EXCEED			EXCEED		
DB3F1	7.66	1.84	4.26	4.91	40.74	58.23	3.50	37.95	56.29
Point on slope	BELOW			EXCEED			EXCEED		
DB1F2	3.58	2.84	2.13	3.40	2.61	1.81	3.89	2.79	2.18
Point on slope	EXCEED			EXCEED			EXCEED		
DB2F2	4.81	4.07	3.77	4.21	18.37	46.07	4.15	2.21	1.96
Point on slope	EXCEED			EXCEED			EXCEED		
DB3F2	5.09	8.71	33.79	16.00	62.73	58.37	4.15	7.10	25.29
Point on slope	EXCEED			EXCEED			EXCEED		
DB1F3	0.84	0.03	0.05	3.91	2.72	2.32	3.68	2.44	2.29
Point on slope	EXCEED			EXCEED			EXCEED		
DB2F3	2.15	0.10	0.10	3.26	14.39	47.43	2.84	24.89	47.79
Point on slope	EXCEED			EXCEED			EXCEED		
DB3F3	1.05	0.12	0.12	15.75	65.70	59.08	24.62	62.98	58.42
Point on slope	EXCEED			EXCEED			EXCEED		

ตามตารางที่ 15 EXCEED หมายถึง ค่ากระแสผลต่างอยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์
BELOW หมายถึง ค่ากระแสผลต่างอยู่ใต้เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์

จากตารางที่ 15 เมื่อพิจารณาตามกรณีศึกษา DB3F1 พบว่าเฟส A มีระดับ 2nd Harmonic ต่ำกว่าค่าเซตตั้งทั้ง 3 ไซเคิล ส่วนเฟส B และ C มีระดับ 2nd Harmonic สูงกว่าค่าเซตตั้งใน ไซเคิลที่ 2 และ 3 ดังนั้นรีเลย์มีโอกาสทำงานเมื่อมีเวลาทำงานน้อยกว่า 2 ไซเคิล (40 msec) ซึ่งตรงตามค่าเวลาทำงานในตารางที่ 17 ในทางตรงกันข้าม ถ้ารีเลย์ใช้เวลาในการทำงานมากกว่า 2 ไซเคิล รีเลย์จะไม่ทำงานเนื่องจากระดับ 2nd Harmonic ในเฟส B และ C จะไปยับยั้งการทำงาน ทำให้ผลทดสอบที่ได้มีการทำงานจำนวน 18 ครั้ง และไม่ทำงานจำนวน 12 ครั้ง ส่วนในกรณีศึกษา DB3F2 และ DB3F3 รีเลย์จะไม่มีการทำงานเนื่องจากระดับ 2nd Harmonic ในเฟส B ของทั้งสองกรณี มีระดับสูงกว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking ทำให้รีเลย์ยับยั้งการทำงาน

ชนิดของการลัดวงจร

จากการทดสอบการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง พบว่า ทุกชนิดของการลัดวงจรมีเวลาในการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังใกล้เคียงกันดังตารางที่ 17 ตัวอย่างเช่น ในกรณีศึกษา DB1F1, DB1F2 และ DB1F3 ซึ่งเป็นการลัดวงจรชนิด 1 เฟสลงดิน, ระหว่างเฟสต่อเฟส และสามเฟส ที่ตำแหน่งการลัดวงจรในเขตป้องกันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง การทำงานของ รีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ยี่ห้อ SEL รุ่น SEL 587 ใช้เวลาในการทำงานเฉลี่ยเท่ากับ 40.13 msec, 40.49 msec และ 36.45 msec ตามลำดับกรณีศึกษา ส่วนการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ยี่ห้อ GEC รุ่น KBCH 120 ใช้เวลาในการทำงานเฉลี่ยเท่ากับ 40.14 msec, 40.26 msec และ 36.46 msec ตามลำดับ

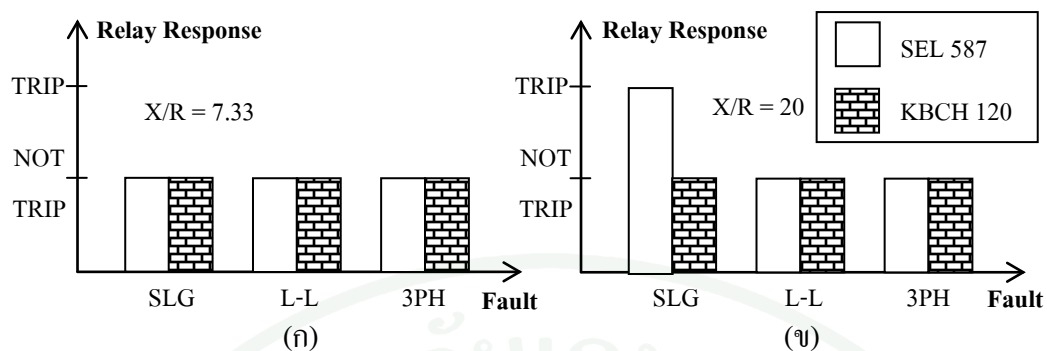
ตารางที่ 16 ผลทดสอบรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษากลุ่ม B และ C

กรณีศึกษา	X/R	Rem.Flux In CT (%)	Fault	ผลตอบสนองของรีเลย์	
				SEL 587	KBCH 120
B1R20PF1 – B2R80NF3	7.33, 20	+/-20, +/-80	SLG	NOT TRIP	NOT TRIP
			L-L	NOT TRIP	NOT TRIP
			3PH	NOT TRIP	NOT TRIP
C1R80B120F1	7.33	-80	SLG	NOT TRIP	NOT TRIP
C2R80B120F1	20	-80	SLG	TRIP (B,C)	NOT TRIP
C1R80B120F2	7.33	+/-80	L-L	NOT TRIP	NOT TRIP
C2R80B120F2	20	+/-80	L-L	NOT TRIP	NOT TRIP
C1R80B120F3	7.33	+/-80	3PH	NOT TRIP	NOT TRIP
C2R80B120F3	20	+/-80	3PH	NOT TRIP	NOT TRIP

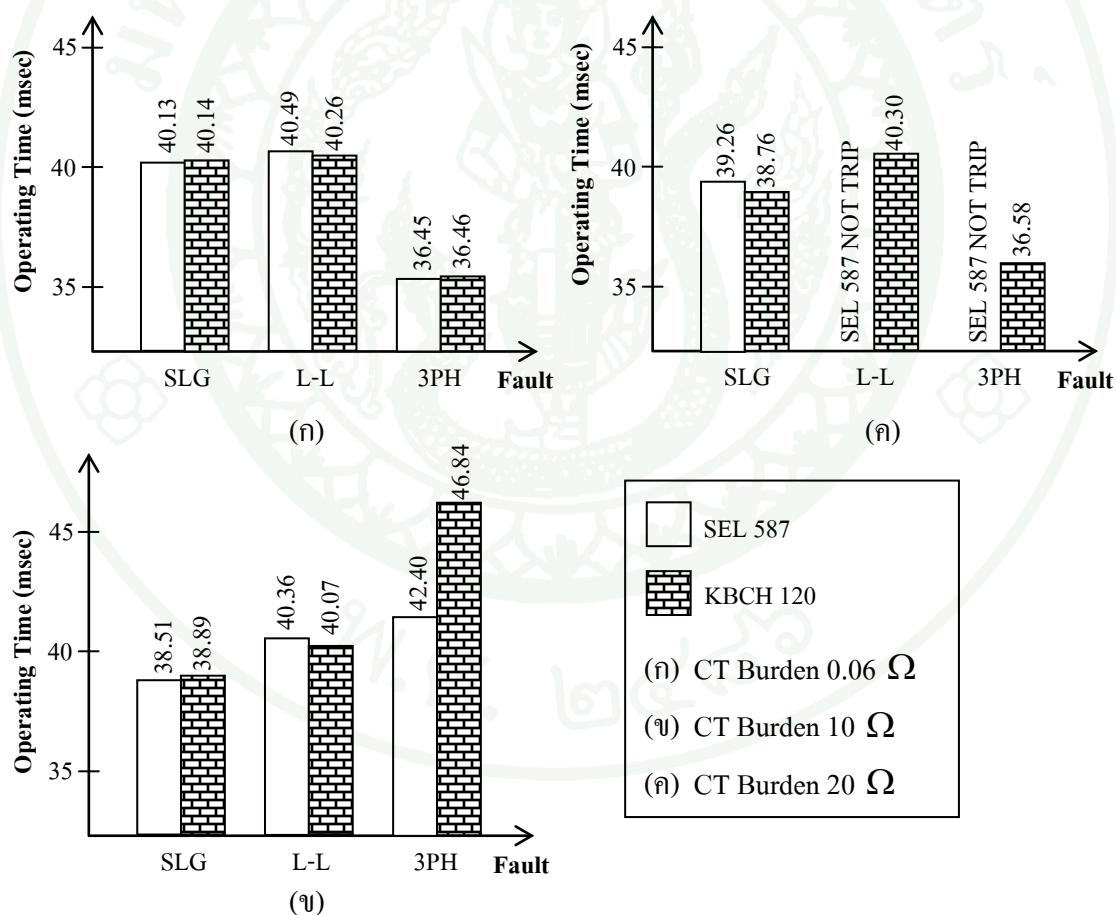
ตารางที่ 17 ค่าเวลาการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตามกรณีศึกษา กลุ่ม D

กรณีศึกษา	Location	CT Burden (Ohm)	RELAY SEL 587				RELAY KBCH 120			
			No. Trip	Operating Time (msec)			No. Trip	Operating Time (msec)		
				Average	Max	Min		Average	Max	Min
DB1F1	Low side bus	0.06	30	40.13	41.20	38.80	30	40.14	42.10	38.90
DB2F1		10	30	38.51	41.10	38.70	30	38.89	41.50	39.10
DB3F1		20	18	39.26	39.90	38.60	30	38.76	41.30	38.80
DB1F2	Low side bus	0.06	30	40.49	42.90	40.50	30	40.26	43.00	40.20
DB2F2		10	30	40.36	43.00	40.50	30	40.07	42.90	40.20
DB3F2		20	0	-	-	-	30	40.30	43.40	40.30
DB1F3	Low side bus	0.06	30	36.45	38.90	36.40	30	36.46	39.00	36.60
DB2F3		10	30	42.40	47.80	40.30	30	46.84	49.70	47.30
DB3F3		20	0	-	-	-	30	36.58	39.50	36.60

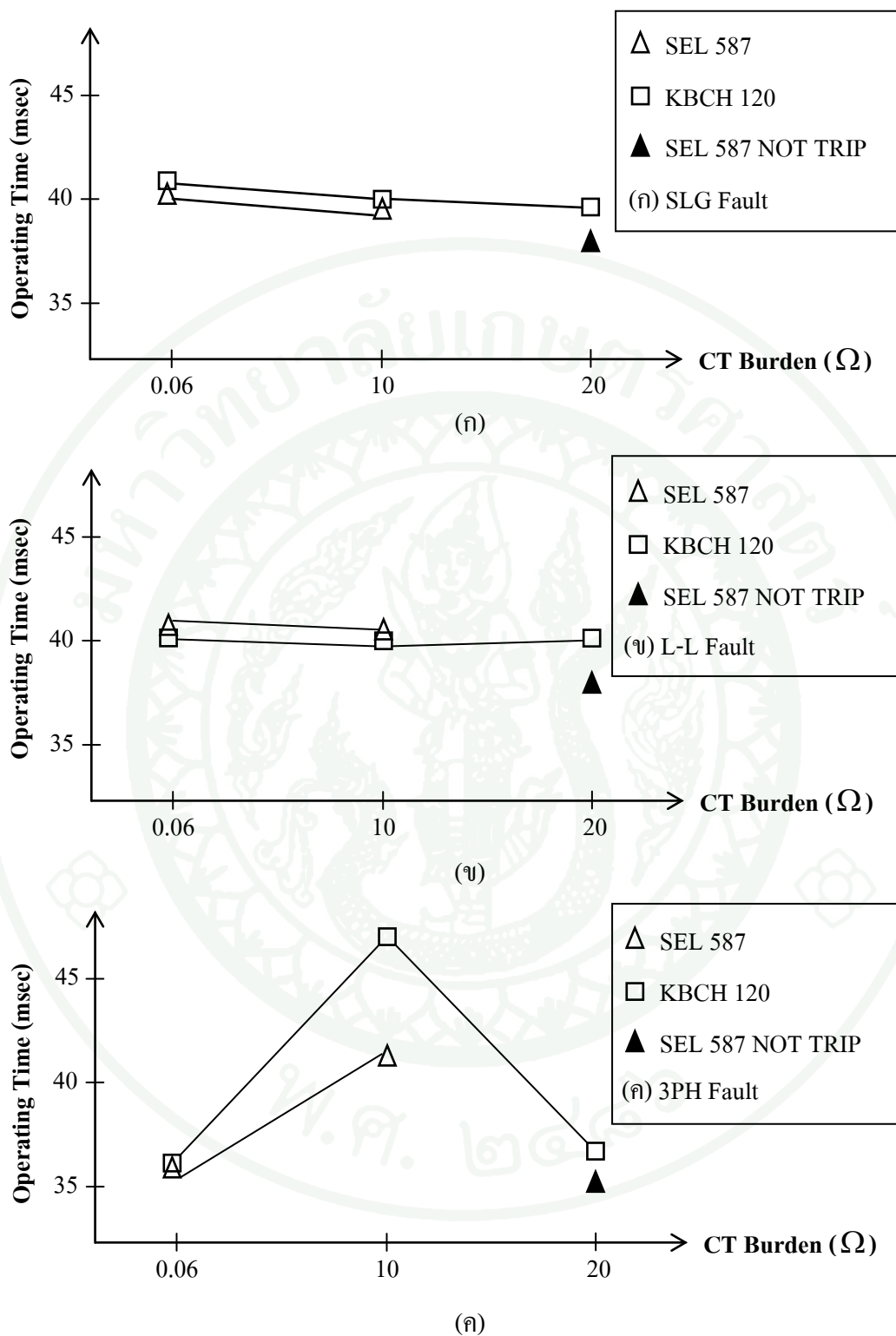
หมายเหตุ จำนวนครั้งที่รีเลย์ทำงานและเวลาการทำงานของรีเลย์ ตามแต่ละกรณีศึกษา กำหนดให้ทำการทดลองจำนวน 30 ครั้ง



ภาพที่ 41 กราฟเปรียบเทียบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดลัดวงจรนอกเขตป้องกันและหม้อแปลง
ทดสอบด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังอิมตัว กรณีศึกษากลุ่ม C



ภาพที่ 42 แผนภูมิเปรียบเทียบเวลาการทำงานของรีเลย์ที่ CT Burden ค่าต่างๆ กรณีศึกษากลุ่ม D



ภาพที่ 43 เส้นกราฟเปรียบเทียบเวลาการทำงานของรีเลย์ ที่ CT Burden ค่าต่างๆ กรณีศึกษากลุ่ม D

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการศึกษาลักษณะรูปคลื่นกระแสการเกิดกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าและการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังตามกรณีศึกษาที่กำหนดไว้ในงานวิจัยนี้ โดยใช้แบบจำลองดิจิทัลของระบบไฟฟ้ากำลังที่สร้างจากโปรแกรม EMTP/ATP แล้วนำผลของลักษณะรูปคลื่นดังกล่าวไปป้อนให้กับแบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงทดกระแสที่สร้างจากโปรแกรม EMTP/ATP เพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแส เมื่อเกิดกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าและเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง รวมถึงนำข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองดิจิทัลของหม้อแปลงทดกระแสไปใช้ทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถสรุปสาระสำคัญที่ได้จากงานวิจัย ดังนี้

1. การทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยหลักวิธีการจำลองสถานะปรับตัวชั่วคราว หรือสถานะทรานเซียนต์ของการเกิดกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าที่เกิดจากการปิดกลับอัตโนมัติของเซอกิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทางและการเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์หาสาเหตุการทำงานผิดพลาดของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งการจำลองสถานะปรับตัวชั่วคราวของการเกิดกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าและการเกิดลัดวงจรโดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง, มุมองศาการเปิด-ปิดของเซอกิตเบรกเกอร์, ปริมาณภาระโหลดที่เชื่อมต่อ, ค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงทดกระแส, ค่าอัตราส่วน X/R และชนิดของการลัดวงจร ที่มีผลต่อลักษณะรูปคลื่นกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อรูปคลื่นกระแสผลต่างที่เกิดขึ้นกับรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ขณะเกิดกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าและการเกิดลัดวงจร

2. การอิ่มตัวของหม้อแปลงทดกระแสเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยต่างๆ หลายประการ เช่น ค่าอัตราส่วน X/R ค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงทดกระแส โดยเมื่ออัตราส่วน X/R ยังมีค่ามากก็ทำให้เกิดการอิ่มตัวในหม้อแปลงทดกระแสเร็วยิ่งขึ้น และค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงทดกระแส ถ้ามีชั่วขณะจะมีอิทธิพลทำให้หม้อแปลงทดกระแสเกิดการอิ่มตัวมากกว่าชั่วบวค ค่าโหลดเบอร์เดนของหม้อแปลงทดกระแส ถ้ามีค่ามากก็ทำให้เกิดการ

อิมตัวในหม้อแปลงทดกระแสเร็วขึ้นเช่นกัน จากปัจจัยดังกล่าว มีผลให้เกิดความผิดปกติของรูปคลื่นกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดกระแส ซึ่งมีผลให้รีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีโอกาสทำงานผิดพลาดเมื่อเกิดลัดวงจรนอกเขตป้องกันแล้วรีเลย์ทำงาน หรือ เกิดลัดวงจรในเขตป้องกันแล้วรีเลย์ไม่ทำงานอันเนื่องมาจากการอิมตัวของหม้อแปลงทดกระแส ในการเลือกหม้อแปลงทดกระแส ควรคำนึงถึงปัญหาการอิมตัวที่มีโอกาสเกิดขึ้นในหม้อแปลงทดกระแส ซึ่งเมื่อเกิดลัดวงจรในเขตป้องกันแล้วรีเลย์ไม่ทำงาน จะส่งผลกระทบต่อความเสียหายของระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการลัดวงจรยังคงค้างอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

3. การจำลองสถานะปรับตัวชั่วคราวของการลัดวงจรโดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP และการนำข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม EMTP/ATP ไปใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้น ได้ให้ประโยชน์ที่สำคัญ 2 ประการ คือ ประการแรก สำหรับกลุ่มผู้ใช้งานรีเลย์ เช่น การไฟฟ้า ที่สามารถนำไปใช้หาค่าเซตตั้งประสิทธิภาพสำหรับรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแต่ละตัวให้เหมาะกับการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้ากำลังครบทุกเงื่อนไขที่คาดว่าจะมีโอกาสเป็นไปได้ ประการที่สอง สามารถดำเนินการทดสอบรีเลย์ของผู้ผลิตหลายๆ ราย เพื่อเปรียบเทียบและคัดเลือกกรีเลย์ตัวที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานเฉพาะรายมากที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. กรณีศึกษากลุ่ม A

ในการแก้ไขปัญหาไฟฟ้าขัดข้องที่เกิดจากการทำงานผิดพลาดของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ที่เกิดจากการปิดกลับวงจรอัตโนมัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าดันทาง ตามที่ทดลองในวิทยานิพนธ์ มีข้อเสนอแนะและพิจารณา ดังนี้

1.1 ปรับตั้งค่าเซตตั้ง % 2nd Harmonic Blocking ของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง รุ่น SEL 587 ให้มีค่าต่ำกว่าระดับฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองในสถานะที่สถานีไฟฟ้าปลายทางมีภาระโหลดเชื่อมต่อ 10% มีระดับ 2nd Harmonic ที่เกิดขึ้น 10.29% ตามกรณีศึกษา O90C30L10 ส่วนในสถานะที่สถานีไฟฟ้าปลายทางมีภาระโหลดเชื่อมต่อ 80% มีระดับ 2nd Harmonic ที่เกิดขึ้น 10.34% ตามกรณีศึกษา O0C270L80 ในตารางที่ 9 ซึ่งเมื่อพิจารณาระดับ 2nd Harmonic ที่ผสมอยู่ในกระแสผลต่าง ที่เกิดขึ้นจากการปิดกลับอัตโนมัติของ

เซอกิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทาง โดยที่สถานีไฟฟ้าปลายทางมีภาระโหลดเชื่อมต่อ 10% และ 80% นั้น มีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าประมาณ 10% ดังนั้น แนวทางในการแก้ไขการทำงานผิดพลาดของรีเลย์ตามกรณีศึกษานี้ คือ จะต้องปรับตั้งค่า 2nd Harmonic Blocking ให้ต่ำกว่า 10% เช่น 8%

ข้อพิจารณา: เมื่อปรับตั้ง 2nd Harmonic Blocking ให้มีค่าต่ำลงจะมีข้อควรระวังในกรณีที่เกิดลัดวงจรในเขตป้องกันในขณะที่เริ่มทำการจ่ายไฟเข้าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยที่ด้านทุติยภูมิไม่มีภาระโหลดเชื่อมต่อ ซึ่งในสภาวะนี้จะมีกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าผสมกับกระแสลัดวงจร ซึ่งเมื่อพิจารณาการใช้งานฟังก์ชัน Cross Blocking พบว่าในเฟสที่ไม่เกิดการลัดวงจร จะมี % 2nd Harmonic ในกระแสผลต่างสูง ส่วนในเฟสที่เกิดการลัดวงจร จะมี % 2nd Harmonic ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสลัดวงจร ซึ่งเป็นกระแสที่มีความถี่มูลฐาน ดังนั้น รีเลย์จะยับยั้งการทำงานเนื่องจากเกิด % 2nd Harmonic ในเฟสที่ไม่เกิดการลัดวงจรเกินค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking ซึ่งรีเลย์จะการทำงานได้ในกรณีที่ % 2nd Harmonic ในเฟสที่ไม่เกิดการลัดวงจรลดต่ำกว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking ซึ่งต้องใช้เวลายาวนานขึ้น ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีความเสียหายเพิ่มขึ้นได้

แนวทางแก้ไข: พิจารณาจัดหารีเลย์รุ่นใหม่ที่สามารถรีเซ็ตการยับยั้งการทำงานได้อย่างรวดเร็ว (Fast Reset) ในกรณีที่ตรวจพบการลัดวงจรในเขตป้องกัน และสามารถทำงานได้ทันทีทันใดเพื่อกำจัดกระแสลัดวงจรให้รวดเร็วที่สุด เพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

1.2 ปรับตั้งเซตตั้งค่าความชันแรกของเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ (Slope 1) ของรีเลย์ รุ่น SEL 587 และ รีเลย์ รุ่น KBCH 120 ให้อยู่เหนือ Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน ซึ่งจากผลการทดลองในสภาวะที่สถานีไฟฟ้าปลายทางมีภาระโหลดเชื่อมต่อ 10% Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน มีความชันเกิดขึ้น 161% (58.30 องศา) ตามกรณีศึกษา O90C30L10 ส่วนในสภาวะที่สถานีไฟฟ้าปลายทางมีภาระโหลดเชื่อมต่อ 80% Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน มีความชันเกิดขึ้น 75% (36.86 องศา) ตามกรณีศึกษา O0C270L80 ซึ่งเมื่อพิจารณาความชันของ Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการงานที่เกิดขึ้นจากการปิดกลับอัตโนมัติของเซอกิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทาง โดยที่สถานีไฟฟ้าปลายทางมีภาระโหลดเชื่อมต่อ 10% และ 80% นั้น มีค่า 58.30 และ 36.86 องศา ตามลำดับ ดังนั้น แนวทางในการแก้ไขการทำงานผิดพลาดของรีเลย์ตามกรณีศึกษานี้ คือ จะต้องปรับตั้งค่า Slope 1 ให้สูงกว่ามุมมองที่ได้จากผลการจำลอง

ข้อพิจารณา: เมื่อปรับตั้ง Slope 1 ให้มีค่าสูงขึ้นจะมีข้อควรระวังในกรณีที่เกิดลัดวงจรที่มีค่าต่ำๆในเขตป้องกันในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจ่ายภาระโหลดอยู่ ซึ่งในสภาวะนี้จะมีกระแส

ด้านการทำงานเกิดขึ้น ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณภาระโหลดที่เชื่อมต่อ ซึ่งจะมีผลให้ Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน มีความชันต่ำ ซึ่งค่าความชันจะมีค่ามากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับ ขนาดกระแสลัดวงจรต่ำสุดที่เกิดขึ้นในเขตป้องกัน ดังนั้น ในการพิจารณาเลือกปรับตั้งค่า เซ็ตติง Slope 1 จะต้องพิจารณาความชันที่เกิดขึ้นของ Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน ในสภาวะที่เกิดกระแสลัดวงจรต่ำสุดในเขตป้องกันและหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจ่ายภาระโหลดสูงสุด ซึ่งค่าเซ็ตติง Slope 1 ที่จะปรับตั้งใหม่นี้ จะต้องมีย่านค่าต่ำกว่าค่าความชันที่เกิดขึ้นในสภาวะกระแสลัดวงจรต่ำสุดและหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจ่ายภาระโหลดสูงสุด

2. กรณีศึกษากลุ่ม B

ในการทดลองตามกรณีศึกษา กลุ่ม B เป็นการจำลองการลัดวงจรนอกเขตป้องกันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยหม้อแปลงทดกระแสจ่ายโหลดเบอร์เดนที่ $2 + j 2.89 \Omega$ และหม้อแปลงทดกระแสมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง $\pm 20\%$ และ $\pm 80\%$ จากการทดลองพบว่า ในทุกกรณี รีเลย์ รุ่น SEL 587 และ KBCH 120 ไม่มีการทำงาน ซึ่งนับได้ว่ารีเลย์ทำงานถูกต้อง โดยเหตุผลที่รีเลย์ไม่ทำงานในกรณีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง $+20\%$ และ $+80\%$ เนื่องจาก Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน อยู่ใต้เส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ ส่วนเหตุผลที่รีเลย์ไม่ทำงานในกรณีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง -20% และ -80% เนื่องจากในบางกรณี Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน อยู่เหนือเส้นกราฟการทำงานของรีเลย์ แต่มีระดับฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 สูงกว่าค่าเซ็ตติง 2^{nd} Harmonic Blocking ทำให้รีเลย์ยับยั้งการทำงาน สาเหตุที่เกิด 2^{nd} Harmonic เนื่องจากหม้อแปลงทดกระแสอิ่มตัวจากอิทธิพลของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างแบบชั่วคราว

ข้อพิจารณา: เมื่อปรับตั้งค่าเซ็ตติง $\% 2^{\text{nd}}$ Harmonic Blocking ใหม่ ควรทดสอบการทำงานของรีเลย์ในสภาวะเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างด้วย เนื่องจากผลการอิ่มตัวของหม้อแปลงทดกระแส ทำให้เกิดองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 2

3. กรณีศึกษา กลุ่ม C

ในการทดลองตามกรณีศึกษา กลุ่ม C มีลักษณะคล้ายกับกรณีศึกษา กลุ่ม B แตกต่างกันที่ กรณีศึกษา กลุ่ม C มีโหลดเบอร์เดนของหม้อแปลงทดกระแสเป็น 120% ของโหลดเบอร์เดนพิกัด จากการทดลองจำนวน 6 กรณี พบว่าในกรณีศึกษา C2R80B120F1 รีเลย์ รุ่น SEL 587 ทำงานเพียง กรณีเดียว แสดงสถานะเฟส B, C

ข้อพิจารณา: ในการเชื่อมต่อโหลดเบอร์เดนของหม้อแปลงทดกระแส จะต้องพิจารณาไม่ให้ หม้อแปลงทดกระแสอิ่มตัวในสภาวะปรับตัวชั่วคราว ซึ่งจะมียอมการประกอบกระแสตรงผสมรวมอยู่ใน กระแสลัดวงจร ทำให้กระแสลัดวงจรมีค่าสูงขึ้น มีผลให้หม้อแปลงทดกระแสอิ่มตัวง่ายขึ้น และเมื่อ โหลดเบอร์เดนมีค่าสูงขึ้น ยิ่งทำให้หม้อแปลงทดกระแสอิ่มตัวได้ง่ายมากขึ้น ซึ่งจากการทดลองตาม กรณีศึกษา C2R80B120F1 เมื่อหม้อแปลงทดกระแสอิ่มตัว ที่เกิดจากโหลดเบอร์เดน 120% ทำให้เกิด ยอมการประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 ในกระแสผลต่าง ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking 15% ไม่สามารถยับยั้งการทำงานของรีเลย์ SEL 587 ได้ทุกกรณีที่หม้อแปลง ทดกระแสมีภาระโหลดเบอร์เดน 120% ดังนั้นการเลือกขนาดโหลดเบอร์เดนมาเชื่อมต่อด้านทุติยภูมิ ของหม้อแปลงทดกระแสจะต้องเลือกให้มีขนาดน้อยที่สุด เพื่อลดผลการอิ่มตัวของหม้อแปลงทด กระแสและลดผลการทำงานผิดพลาดของรีเลย์ที่เกิดจากหม้อแปลงทดกระแสอิ่มตัว

4. กรณีศึกษา กลุ่ม D

ในการทดลองตามกรณีศึกษา กลุ่ม D เป็นการจำลองการลัดวงจรในเขตป้องกันด้านทุติยภูมิ ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยปรับเปลี่ยนค่าโหลดเบอร์เดนของหม้อแปลงทดกระแส และทำการ ทดลองจำนวน 30 ครั้ง จากผลการทดลองพบว่า รีเลย์ รุ่น SEL 587 มีจำนวนครั้งในการทำงานลดลง ในกรณีการลัดวงจรแบบ SLG เมื่อโหลดเบอร์เดนเพิ่มเป็น 100% ของพิกัด และในกรณีการลัดวงจร แบบ L – L และ 3PH ที่โหลดเบอร์เดน 100% ของพิกัด รีเลย์ รุ่น SEL 587 ไม่มีการทำงานในทุกครั้ง เนื่องจากระดับ 2nd Harmonic มีค่าสูงกว่าค่าเซตตั้ง 2nd Harmonic Blocking ทำให้รีเลย์ยับยั้งการ ทำงาน ส่วนรีเลย์ รุ่น KBCH 120 มีการทำงานทุกครั้ง

ข้อพิจารณา: ในการปรับตั้ง 2nd Harmonic Blocking ของรีเลย์ รุ่น SEL 587 จำเป็นจะต้อง พิจารณาผลของการปิดกลับวงจรอัตโนมัติของเซกเกเตอร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทาง ร่วมกับการ พิจารณาผลของหม้อแปลงทดกระแสอิ่มตัวเมื่อเกิดลัดวงจรในเขตป้องกัน ซึ่งแตกต่างจากรีเลย์ รุ่น

KBCH 120 จะใช้วิธีการตรวจจับ 2nd Harmonic แบบ Gap และให้ผลการทำงานถูกต้องทุกครั้ง ดังนั้นในการใช้งานรีเลย์ รุ่น SEL 587 จะต้องพิจารณานำฟังก์ชัน $I_{diff.>>}$ มาใช้งานตรวจจับกระแสลัดวงจรในเขตป้องกันในสถานะที่หม้อแปลงทดกระแสอิ่มตัว เนื่องจากฟังก์ชัน $I_{diff.>>}$ จะไม่มีผลยับยั้งการทำงานจาก 2nd Harmonic ซึ่งจะต้องพิจารณาปรับตั้งค่าเซตตั้งให้ $I_{diff.>>}$ มีค่าต่ำกว่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดที่เกิดขึ้นในเขตป้องกัน



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- พิพัฒน์ บุญนาค. 2543. การจำลองสถานะการเปลี่ยนแปลงชั่วคราวของหม้อแปลงกระแสโดยใช้โปรแกรม EMTP เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Areva T&D's. 2002. **KBCH 120, 130, 140 Service Manual KBCH, EN M, G11.** 236.
- Canadian/American EMTP User Group. 1992. **Alternative Transients Program (ATP) Rule Book.** n.p.
- Daihen Electric Co.,Ltd. 1998. **Oil-Immersed Power Transformer with On-Load Tap-Changer Test Report Rep. No. Q98-12503.** 84.
- Ebner, A. 2007. Transient Transformer Inrush Currents due to Closing Time and Residual Flux Measurement Deviations if Controlled Switching is used, pp. 1-12. **European EMTP-ATP Conference.** 24-26 September 2007, Leon, Spain.
- Elin Holec. 1995. **Current Transformers Supplier's Test Reports Rep. FR495PO3.** 159.
- Grunert, H. 2001. Integrated Solution for simulation, setting and testing of protective relays, with improved parameter determination, taking into account the affects of CT saturation, pp. 29-32. **The 7th IEE International Conference on Development in Power System Protection.** 9-12 April 2001, Amsterdam, Netherlands.
- Kezunovic, M., L. Kojovic, C.W. Formen, D.R. Sevcik, A. Abur and F. Phillips. 1994. Experimental evaluation of EMTP-based current transformer models for protective relay transient study. **IEEE Transactions on Power Delivery** 9 (1): 405-413.

- Nawikavatan, A., C. Thammart, M. Leelajindakrairerk and T. Niyomsat. 2009. The Current Transformer Model with ATP-EMTP for Transient Response Characteristic and Its Effect on Differential Relays Performance, pp. 1-6. **The 8th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management.** 8-11 November 2009, Kowloon, Hong Kong.
- Rahman, M.A. and A. Gangopadhyay. 1986. Digital Simulation of Magnetizing Inrush Current in Three-Phase Transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery** PWRD-1 (4): 235-242.
- Siemens Thailand. 2012. **Field Inspection and Test Record Current Transformer TSD 1.1P3.2, 1994.** 30.
- Stringer, N.T., L. Lawhead, T. Wilkerson, J. Biggs and G.D. Rockefeller. 1997. Testing and performance of transformer differential relays. **IEEE Industry Applications Magazine** 3 (4): 36-42.
- Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. 2010. **SEL-587-0, 1 Relay Instruction Manual 20100813.** 254.
- Turner, S. 2011. Testing Numerical Transformer Differential Relay, pp. 251-256. **Texas A&M 64th Annual Relay Conference for Protective Relay Engineers.** College Station, Texas.
- Yacamini, R. and A. Abu-Nasser. 1986. The Calculation of Inrush Current in three-phase transformers. **Electric Power Application** 133 (1): 31-40.

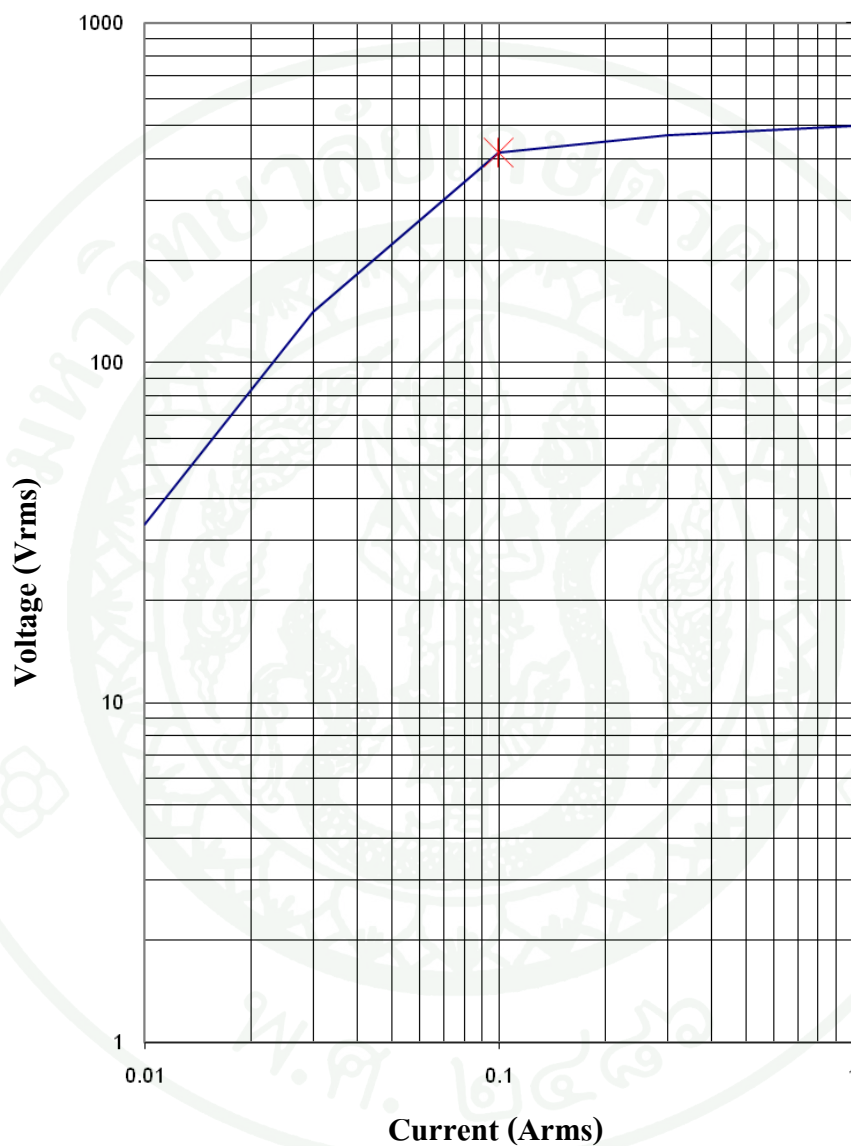


ภาคผนวก ก

ข้อมูลคุณลักษณะของ CT, หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง, ระบบไฟฟ้ากำลัง และค่าเซตตั้ง
ของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ข้อมูลคุณลักษณะของ CT ระบบ 115 kV ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

CT 300:1 A



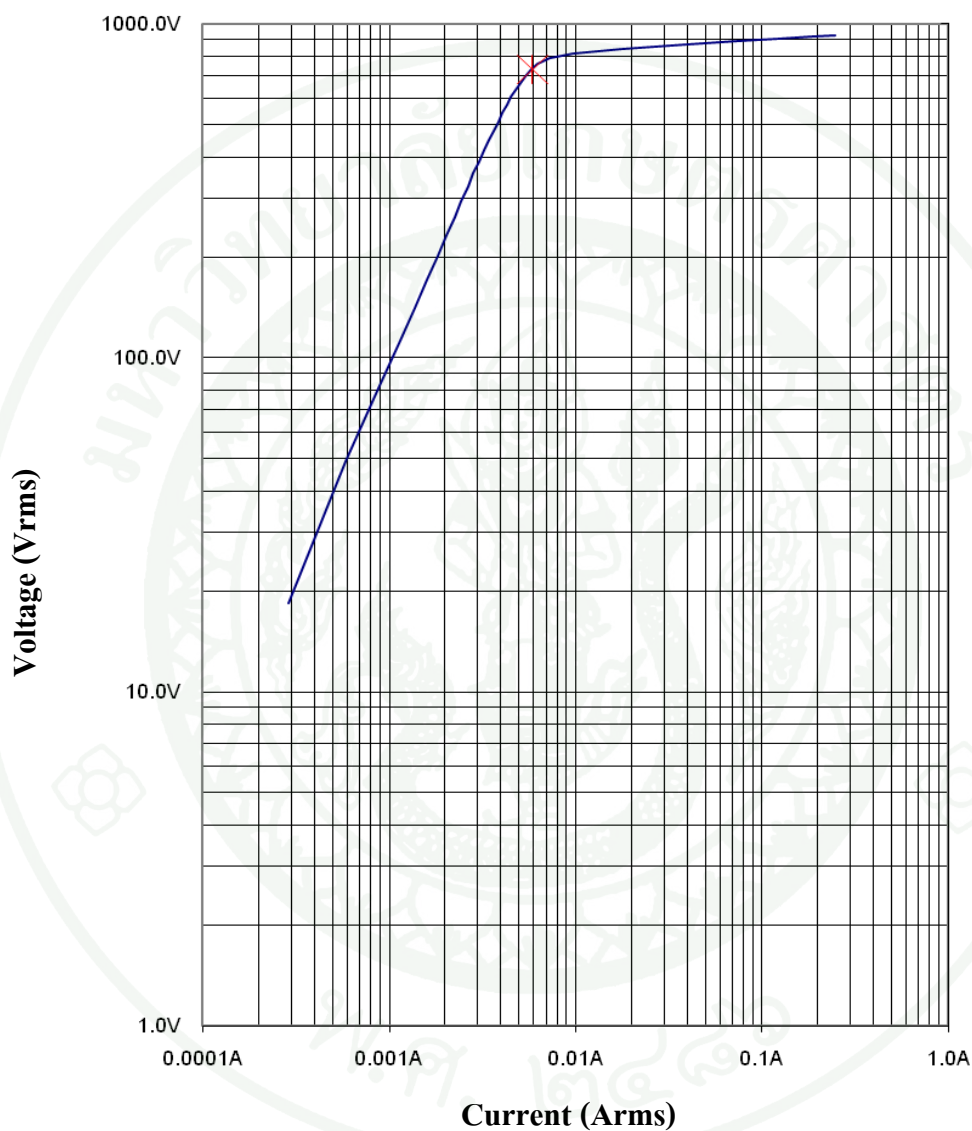
ภาพผนวกที่ ก1 ข้อมูลคุณลักษณะ V_{rms} – I_{rms} ของ CT 300:1 A ระบบ 115 kV

Accuracy class: 10P20 ที่ 50 Hz, Burden: 20 VA

ที่มา: Elin Holec (1995)

ข้อมูลคุณลักษณะของ CT ระบบ 23.1 kV ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

CT 1800:1 A



ภาพผนวกที่ ก2 ข้อมูลคุณลักษณะ Vrms – Irms ของ CT 1800:1 A ระบบ 22 kV

Accuracy class: 5P20 ที่ 50 Hz, Burden: 20 VA

ที่มา: Siemens Thailand (2012)

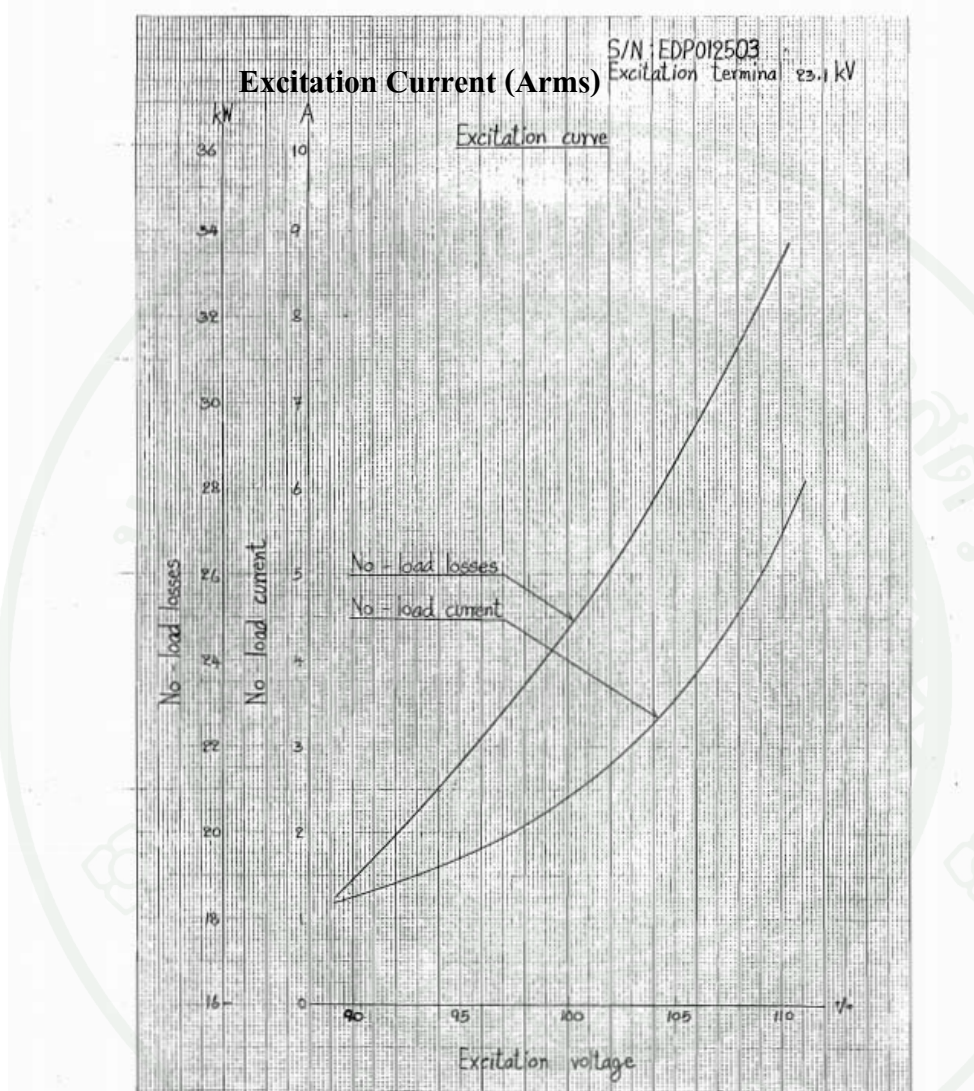
ตารางผนวกที่ ก1 สรุปข้อมูล V_{rms} – I_{rms} และ λ – i ที่ได้จากการใช้โปรแกรม SATURA ของ CT 300:1 A ใช้งานที่ความถี่กำลัง 50 Hz

จุดที่	ข้อมูลอินพุต		ข้อมูลเอาต์พุต	
	I_{rms} (ampere)	V_{rms} (volts)	i (ampere)	λ (volts-sec)
1	10.0E-3	33.50	1.41421356E-02	1.50802983E-01
2	30.0E-3	140.70	4.08294407E-02	6.33372528E-01
3	100.0E-3	416.00	1.44201820E-01	1.87265794E+00
4	300.0E-3	464.90	6.94212212E-01	2.09278528E+00
5	1000.0E-3	496.70	2.61334599E+00	2.23593557E+00

ตารางผนวกที่ ก2 สรุปข้อมูล V_{rms} – I_{rms} และ λ – i ที่ได้จากการใช้โปรแกรม SATURA ของ CT 1800:1 A ใช้งานที่ความถี่กำลัง 50 Hz

จุดที่	ข้อมูลอินพุต		ข้อมูลเอาต์พุต	
	I_{rms} (ampere)	V_{rms} (volts)	i (ampere)	λ (volts-sec)
1	39.1E-3	860.76	1.20159939E-01	3.87478136E+00
2	73.3E-3	880.69	2.18077184E-01	3.96449788E+00
3	121.8E-3	897.95	3.62297853E-01	4.04219518E+00
4	186.0E-3	911.21	5.70375016E-01	4.10202120E+00
5	249.3E-3	918.37	8.20213809E-01	4.13411748E+00

Excitation voltage	%	90	95	100	105	110	Rated voltage
No - load current (I_o)	A	1.25	1.70	2.41	3.56	5.46	23.1 kV
(50000 kVA base)	%	0.100	0.136	0.193	0.285	0.437	50 Hz
No - load losses (W_i)	kW	18.9	21.6	24.7	28.6	33.3	



Excitation Voltage (% Rated)

ภาพผนวกที่ ก3 ผลทดสอบ Open Circuit Test ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 115/23.1 kV, 50 MVA, Dyn1 ผลิตภัณฑ์ DAIHEN ใช้งานที่สถานีไฟฟ้าบางแสน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ที่มา: Daihen Electric (1998)

ข้อมูลผลทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

Report No. : Q98 - 12503

TEST REPORT

CUSTOMER : PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY
 TEST PRODUCT : OIL - IMMERSSED POWER TRANSFORMER WITH
 ON - LOAD TAP - CHANGER
 3 Ø 50 Hz 30 / 40 / 50 MVA ONAN / ONAF / ONAF
 HV : 115.00 kV $\pm 8 \times 1.25 \%$ 17 TAPS
 LV : 23.1 kV
 CONNECTION SYMBOL : Dyn1
 SERIAL NO. : EDP012503
 STANDARD : IEC 76 - 1993

CERTIFICATION

THIS IS TO CERTIFY THAT THIS PRODUCT HAD BEEN TESTED ACCORDING TO
 CUSTOMER'S SPECIFICATION AND THE PRODUCT MET THE SPECIFICATION.

APPROVED BY :

H. Jaroon

H. JAROON

GENERAL MANAGER

QUALITY CONTROL DEPARTMENT

DAIHEN ELECTRIC CO., LTD.



บริษัท ไดเฮ็น อิเล็กทริก จำกัด

DAIHEN ELECTRIC CO., LTD.

ภาพผนวกที่ ก4 ข้อมูลผลทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

DAIHEN ELECTRIC CO., LTD.

Report No. : Q98 - 12503

Tr. S/N : EDP012503

Page : 5

MEASUREMENT OF WINDING RESISTANCE

Date of test : October 5th, 1998

HV. WINDING

Tap No.	At 32.5 °C			Average	
	H1 - H3	H2 - H1	H3 - H2	(Ω / Ø)	
	(Ω)	(Ω)	(Ω)	At 32.5 °C	At 75.0 °C
1	0.62170	0.61975	0.62014	0.93080	1.0788
2	0.60845	0.60718	0.60776	0.91170	1.0567
3	0.59646	0.59487	0.59487	0.89310	1.0351
4	0.58536	0.58222	0.58272	0.87515	1.0143
5	0.57205	0.56976	0.57030	0.85606	0.99217
6	0.56019	0.55745	0.55801	0.83783	0.97104
7	0.54677	0.54502	0.54556	0.81868	0.94885
8	0.53422	0.53215	0.53315	0.79976	0.92692
9	0.51824	0.51706	0.51769	0.77650	0.89996
10	0.53428	0.53243	0.53280	0.79976	0.92692
11	0.54642	0.54450	0.54576	0.81834	0.94846
12	0.56004	0.55688	0.55769	0.83731	0.97044
13	0.57187	0.56957	0.57016	0.85580	0.99187
14	0.58422	0.58204	0.58277	0.87452	1.0136
15	0.59611	0.59420	0.59514	0.89273	1.0347
16	0.60861	0.60685	0.60765	0.91156	1.0565
17	0.62068	0.61922	0.62009	0.93000	1.0779

LV. WINDING

Tap No.	At 32.5 °C			Average	
	X1 - X3	X2 - X1	X3 - X2	(mΩ / Ø)	
	(mΩ)	(mΩ)	(mΩ)	At 32.5 °C	At 75.0 °C
-	16.249	16.131	16.165	8.0908	9.3772

Note : Temperature correction factor (K) at 75.0 °C

$$K = \frac{235.0 + 75.0}{235.0 + 32.5} = \frac{310.0}{267.5} = 1.159$$

ภาพผนวกที่ ก4 (ต่อ)

DAIHEN ELECTRIC CO., LTD.

Report No. : Q98 - 12503

Tr. S/N : EDP012503

Page : 9

MEASUREMENT OF SHORT - CIRCUIT IMPEDANCE AND LOAD LOSS

Date of test : October 6th, 1998

3 Phase 50000 kVA base 50 Hz Class ONAF							
Characteristic of No - Load							
Excitation voltage	%	90	95	100	105	110	Rated voltage 23.1 kV 50 Hz
No - load current (I _o)	A	1.25	1.70	2.41	3.56	5.46	
	%	0.100	0.136	0.193	0.285	0.437	
No - load losses (W _i)	kW	18.9	21.6	24.7	28.6	33.3	
Characteristic of Load							
HV Voltage	kV	126.50	115.00	103.50			Supply Side
HV Current	A	228	251	279			
LV Voltage	kV	23.1	23.1	23.1			Load Side
LV Current	A	1250	1250	1250			
Load losses (W _{cl})	kW	138.9	135.7	154.0			t = 34.0 °C
Impedance voltage (IZ _t)	V	19300	16740	14580			
	%	15.26	14.56	14.09			
HV Resistance	Ω/Ø	0.93646	0.78122	0.93568			
LV Resistance	m Ω/Ø	8.1399	8.1399	8.1399			
I ² R losses	kW	86.8	87.4	111.0			at 75.0 °C $K = \frac{310}{235 + t}$ = 1.152
Stray losses	kW	52.1	48.3	43.0			
HV Resistance	Ω/Ø	1.0788	0.89996	1.0779			
LV Resistance	m Ω/Ø	9.3772	9.3772	9.3772			
I ² R losses	kW	100.0	100.7	127.9			
Stray losses	kW	45.2	41.9	37.3			p.f. = 1.0
Load losses (W _{cl75})	kW	145.2	142.6	165.2			
Reactance drop (IX _t)	%	15.26	14.56	14.09			
Impedance voltage (IZ ₇₅)	V	19300	16740	14580			
	%	15.26	14.56	14.09			
Voltage regulation	%	1.45	1.35	1.32			
Total losses (W _i +W _{cl75})	kW	169.9	167.3	189.9			
Efficiency	%	99.66	99.67	99.62			
Remarks :							
$\% \text{ Volt. reg.} = (\cos\theta \bullet \%IR_{75}) - (\sin\theta \bullet \%IX_t) + [(\cos\theta \bullet \%IX_t) + (\sin\theta \bullet \%IR_{75})]^2 / 200$							
$\%IR_t = (W_{cl} / kVA) \times 100$ $\theta = \text{Load angle (leading} = +\theta, \text{lagging} = -\theta)$							
$\%IR_{75} = (W_{cl75} / kVA) \times 100$ $\%IX_t = \sqrt{(\%IZ_t)^2 - (\%IR_t)^2}$							

ภาพผนวกที่ ก4 (ต่อ)

DAIHEN ELECTRIC CO., LTD.

Report No. : Q98 - 12503

Tr. S/N : EDP012503

Page : 10

MEASUREMENT OF INSULATION RESISTANCE

Date of test : October 5th, 1998: October 8th, 1998

Condition of Measurements		HV - LV (MΩ)	HV - (LV • E) (MΩ)	LV - (HV • E) (MΩ)	Ave. Oil temp. (°C)	Humidity (%)
Cold temp.	1 min.	4800	2160	910	31.0	63.0
	10 min.	14000	7950	4340		
	PI $\left(\frac{10\text{min.}}{1\text{min.}}\right)$	2.9	3.7	4.8		
Hot temp.	1 min.	2560	1040	550	50.5	69.0

Instrument : MEGGER 2500 V

Manufacturer : AVO INTERNATIONAL CO., LTD.

Decision : Good

MEASUREMENT OF INSULATION POWER - FACTOR AND CAPACITANCE

Date of test : October 5th, 1998: October 8th, 1998

Test voltage : 6000 V 50 Hz

Condition of Measurements	(HV • LV) - E	HV - (LV • E)	LV - (HV • E)	Ave. Oil temp. (°C)	Humidity (%)
Cold temp.	0.50 %	0.21 %	0.44 %	31.0	61.0
Hot temp.	0.81 %	0.26 %	0.69 %	50.5	66.0
Capacitance	17300 pF	12300 pF	21400 pF	-	-

Instrument : AUTOMATIC SCHERING BRIDGE

Model : DAC - ASM - 1N

Manufacturer : SOKEN ELECTRIC CO., LTD.

Decision : Good

ภาพผนวกที่ ก4 (ต่อ)

ข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษา กลุ่ม A ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ระดับแรงดัน	115 kV
ความถี่	50 Hz
ความยาวสายส่งจากสถานีฯ แหล่งกำเนิด (อ่าวไผ่ – บางแสน) (กฟภ.)	22.30 km
ค่า Positive Sequence ของสายส่ง	$0.042936 + j 0.2677 \ \Omega/\text{km}$ (จาก กฟภ.)
ค่า Zero Sequence ของสายส่ง	$0.213470 + j 1.3294 \ \Omega/\text{km}$ (จาก กฟภ.)
ตำแหน่งของการลัดวงจรที่สายส่งของ สถานีไฟฟ้าต้นทาง (บางพระ)	50 % ความยาวสายส่งจาก บางพระ – บางแสน (คิดเป็นระยะ 3.75 km)
ชนิดของการลัดวงจร	Single Line to Ground (C-G)
ค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง ของหม้อแปลงทดสอบ	ตามมุมมองการเปิดวงจรของ CB
ค่าเบอร์เดนของหม้อแปลงทดสอบ	
ด้าน 115 และ 23.1 kV	$0.06 \ \Omega$ (Nominal Relay Burden)
ช่วงเวลาก่อนเกิดการลัดวงจร	100 msec
ช่วงเวลาการลัดวงจร	100 msec
ช่วงเวลา Dead Time ก่อน CB ปิดกลับ	1.00 sec

ตารางผนวกที่ ก3 ค่าอิมพีแดนซ์เทวินินของแหล่งกำเนิด (สถานีฯ บางแสน) ที่อัตราส่วน X/R เท่ากับ 7.33

Positive Sequence Impedance		Zero Sequence Impedance	
R (Ω)	X (Ω)	R (Ω)	X (Ω)
1.0818324	7.9254645	4.875231	31.5015025

หมายเหตุ ค่าอิมพีแดนซ์ในตารางเป็นค่าทางดำนแรงดันสูง 115 kV

ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษา กลุ่ม B ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ระดับแรงดัน	115 kV
ความถี่	50 Hz
ค่า Positive Sequence ของแหล่งกำเนิด	$1.081 + j 7.925 \Omega$ (กรณี $X/R = 7.33$)
ค่า Zero Sequence ของแหล่งกำเนิด	$4.875 + j 31.501 \Omega$ (กรณี $X/R = 7.33$)
ค่า Positive Sequence ของแหล่งกำเนิด	$0.396 + j 7.92546 \Omega$ (กรณี $X/R = 20$)
ค่า Zero Sequence ของแหล่งกำเนิด	$1.787 + j 31.5015 \Omega$ (กรณี $X/R = 20$)
ชนิดของการลัดวงจร	Single Line to Ground (C-G) Line to Line (A-B) Three Phase (A-B-C)
ค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง ของหม้อแปลงทดกระแส	+/- 20 % และ +/- 80 %
ค่าเบอร์เดนของหม้อแปลงทดกระแส ด้าน 115 kV	0.06Ω (Nominal Relay Burden)
ค่าเบอร์เดนของหม้อแปลงทดกระแส ด้าน 23.1 kV	$2 + j 2.89 \Omega$ (ANSI C57.13)
ช่วงเวลาก่อนเกิดการลัดวงจร	100 msec
ช่วงเวลาการลัดวงจร	100 msec

ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษา กลุ่ม C ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ระดับแรงดัน	115 kV
ความถี่	50 Hz
ค่า Positive Sequence ของแหล่งกำเนิด	$1.081 + j 7.925 \Omega$ (กรณี $X/R = 7.33$)
ค่า Zero Sequence ของแหล่งกำเนิด	$4.875 + j 31.501 \Omega$ (กรณี $X/R = 7.33$)
ค่า Positive Sequence ของแหล่งกำเนิด	$0.396 + j 7.92546 \Omega$ (กรณี $X/R = 20$)
ค่า Zero Sequence ของแหล่งกำเนิด	$1.787 + j 31.5015 \Omega$ (กรณี $X/R = 20$)
ชนิดของการลัดวงจร	Single Line to Ground (C-G) Line to Line (A-B) Three Phase (A-B-C)

ค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	
ของหม้อแปลงทดกระแส	80 %
ค่าเบอร์เดนของหม้อแปลงทดกระแส	120 % (24 Ω)
ช่วงเวลาก่อนเกิดการลัดวงจร	100 msec
ช่วงเวลาการลัดวงจร	100 msec

ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษากลุ่ม D ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ระดับแรงดัน	115 kV
ความถี่	50 Hz
ค่า Positive Sequence ของแหล่งกำเนิด	1.081+ j 7.925 Ω (กรณี X/R = 7.33)
ค่า Zero Sequence ของแหล่งกำเนิด	4.875+ j 31.501 Ω (กรณี X/R = 7.33)
ชนิดของการลัดวงจร	Single Line to Ground (C-G) Line to Line (A-B) Three Phase (A-B-C)
ค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	
ของหม้อแปลงทดกระแส	0 %
ค่าเบอร์เดนของหม้อแปลงทดกระแส	0.06, 10 และ 20 Ω
ช่วงเวลาก่อนเกิดการลัดวงจร	100 msec
ช่วงเวลาการลัดวงจร	100 msec

ข้อมูลค่าเซตติงของรีเลย์ผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ตารางผนวกที่ ก4 ข้อมูลค่าเซตติงของรีเลย์ รุ่น SEL 587

Setting Item	Setting Value	หมายเหตุ
MVA	50	
VWDG1 (kV)	115	
VWDG2 (kV)	23.1	
TRCON	DABY	
CTCON	YY	
Differential Current Pick Up (O87P)	0.30xIn	
High Set Differential Current Pick Up (U87P)	7.00xIn	
CT Ratio HV (CTR 1)	300 : 1	
CT Ratio LV (CTR 2)	1800 : 1	
TAP Setting HV (TAP 1)	0.84	
TAP Setting LV (TAP 2)	0.69	
Vector Correction HV (Inside)	Yy0	
Vector Correction LV (Inside)	Yd11	
Slope 1 Setting (SLP 1) (%)	30%	
Slope 2 Setting (SLP 2) (%)	50%	
Bias Current Turning Point 1 (IT1)	1.0	
Bias Current Turning Point 2 (IT2)	1.0	
2 nd Harmonic Blocking (%)	15%	
Independent Harmonic Blocking (IHBL)	N	

ตารางผนวกที่ ก5 ข้อมูลค่าเซตติงของรีเลย์ รุ่น KBCH 120

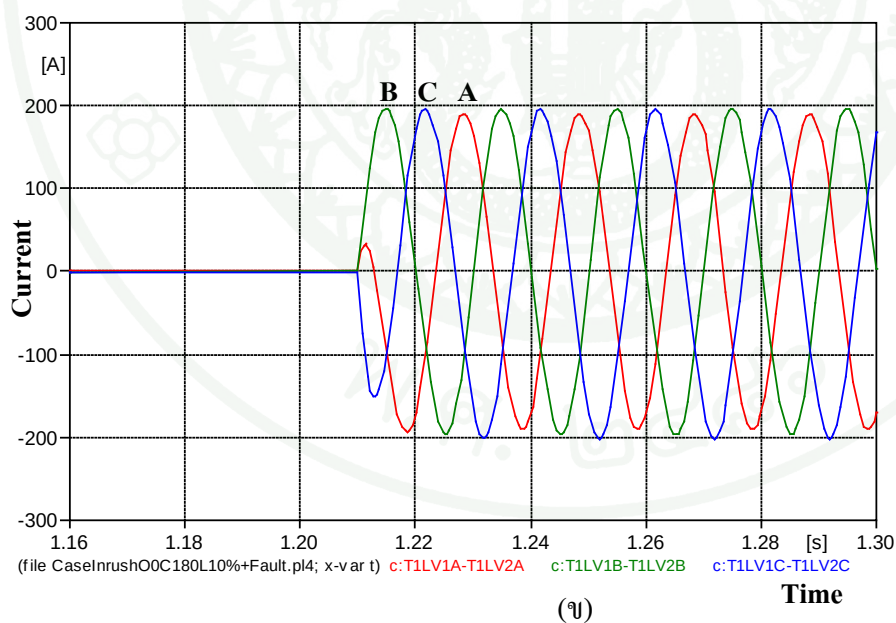
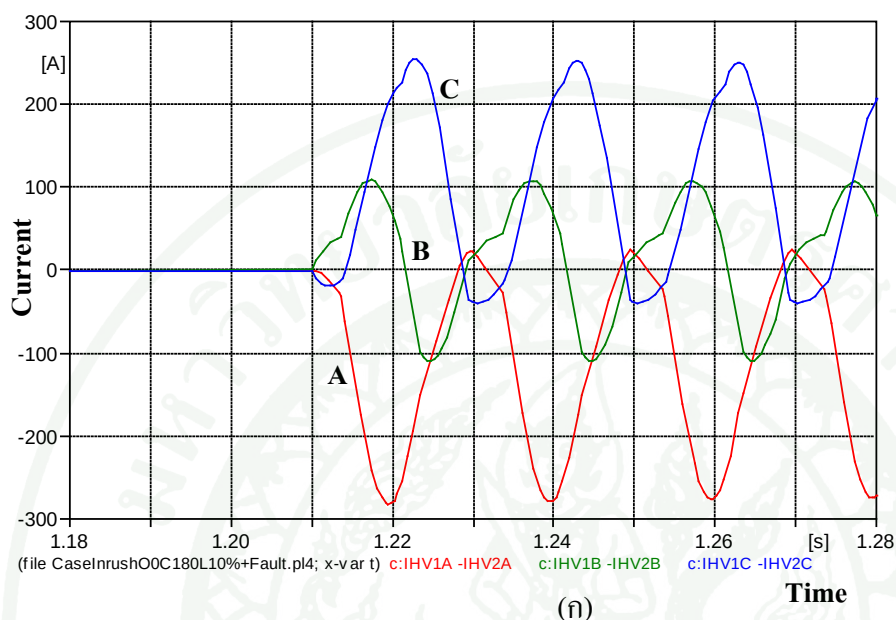
Setting Item	Setting Value	หมายเหตุ
Differential Current Pick Up ($I_{diff.>}$)	0.30xIn	
High Set Differential Current Pick Up ($I_{diff.>>}$)	7.00xIn	
CT Ratio HV	300 : 1	
CT Ratio LV	1800 : 1	
TAP Setting HV (TAP 1)	0.84	
TAP Setting LV (TAP 2)	0.69	
Vector Correction HV (Inside)	Yy0	
Vector Correction LV (Inside)	Yd11	
Slope 1 Setting (SLP 1) (%)	20% (Fix)	
Slope 2 Setting (SLP 2) (%)	80% (Fix)	
Bias Current Turning Point 1 (IT1)	0.0 (Fix)	
Bias Current Turning Point 2 (IT2)	1.0 (Fix)	
2 nd Harmonic Blocking (%)	Gap Detection (Fix)	
Independent Harmonic Blocking (IHBL)	-	

ภาคผนวก ข

ลักษณะรูปคลื่นกระแสเมื่อเกิดกระแสล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าในระบบไฟฟ้ากำลัง
(กรณีศึกษากลุ่ม A)

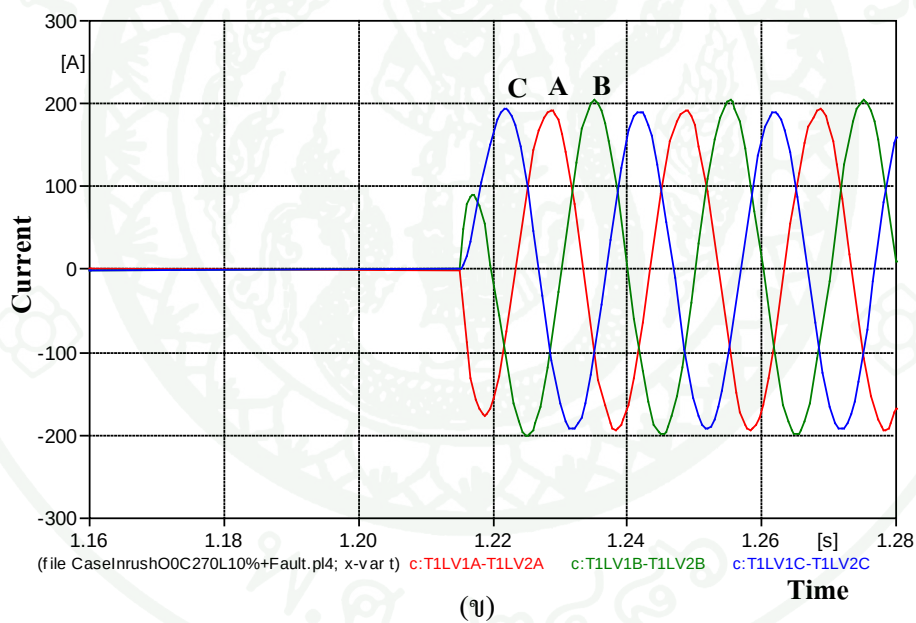
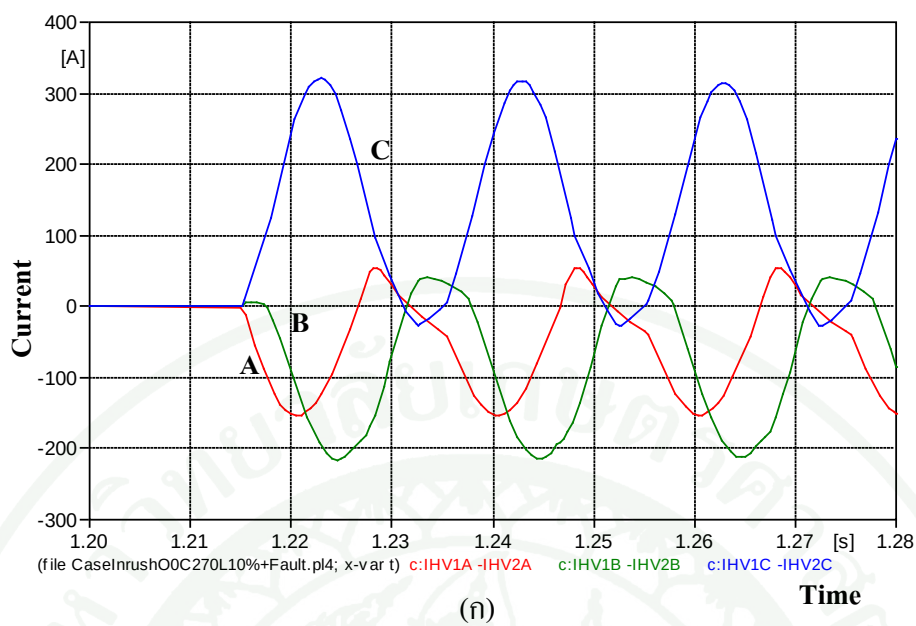
ลักษณะของรูปคลื่นกระแสต้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเมื่อเกิด

กระแสลัดเลียงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าที่เกิดจากการปิดกลับอัตโนมัติที่สถานีไฟฟ้าต้นทาง

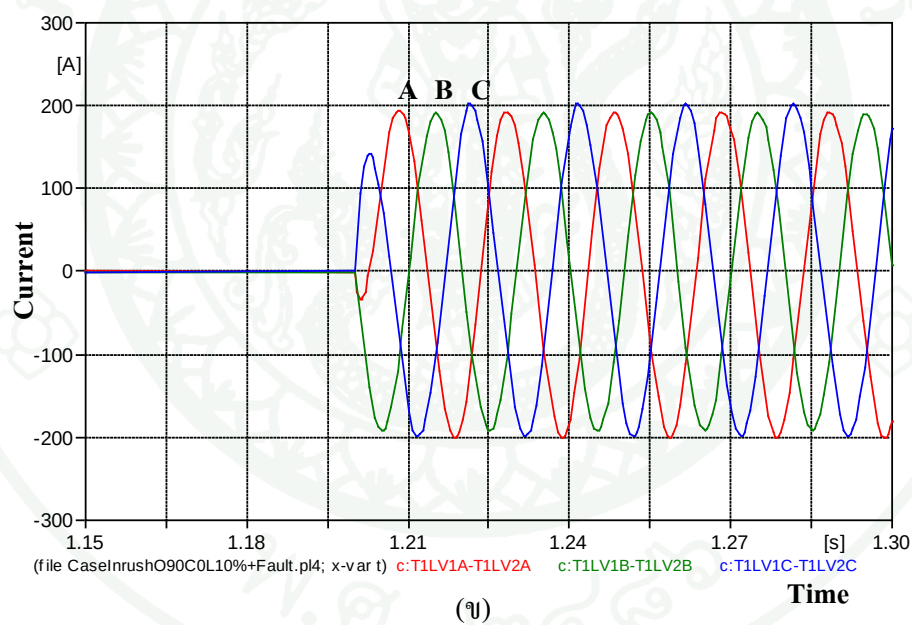
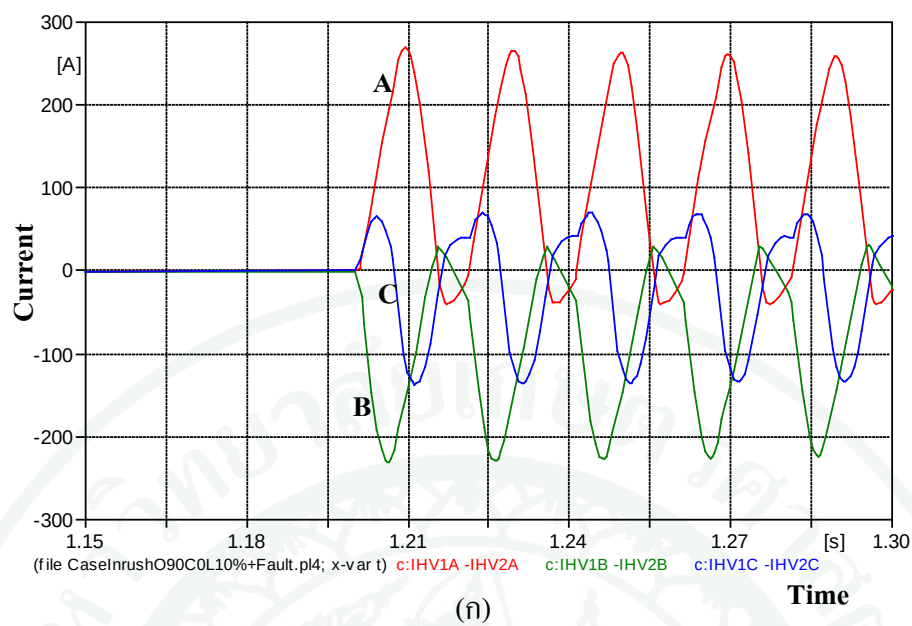


ภาพผนวกที่ ข1 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

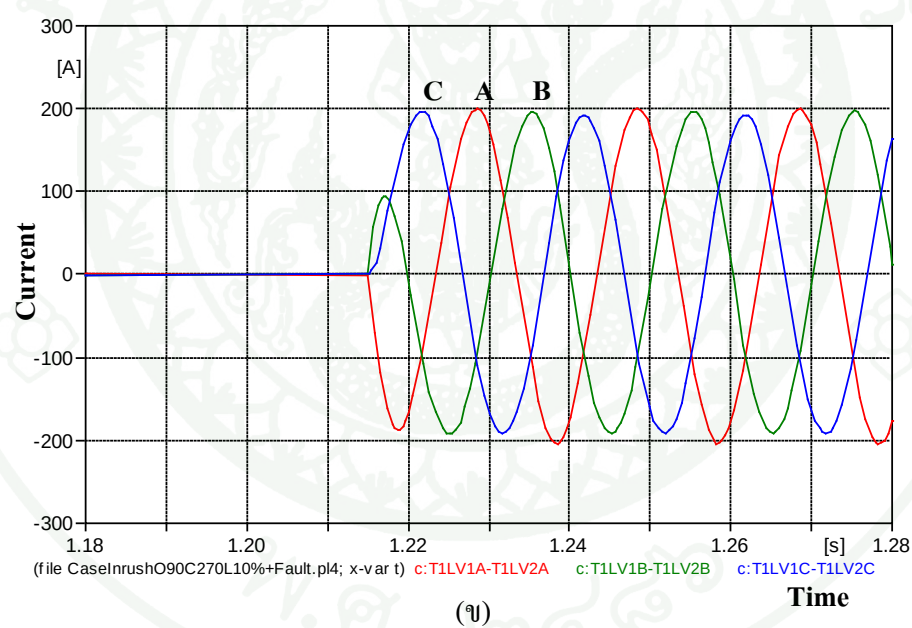
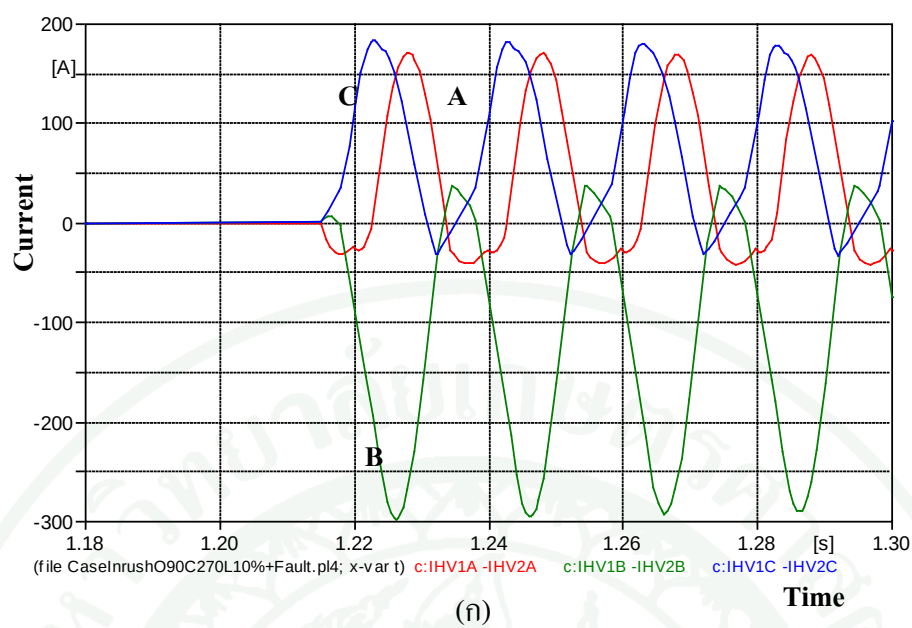
กรณีศึกษา OOC180L10



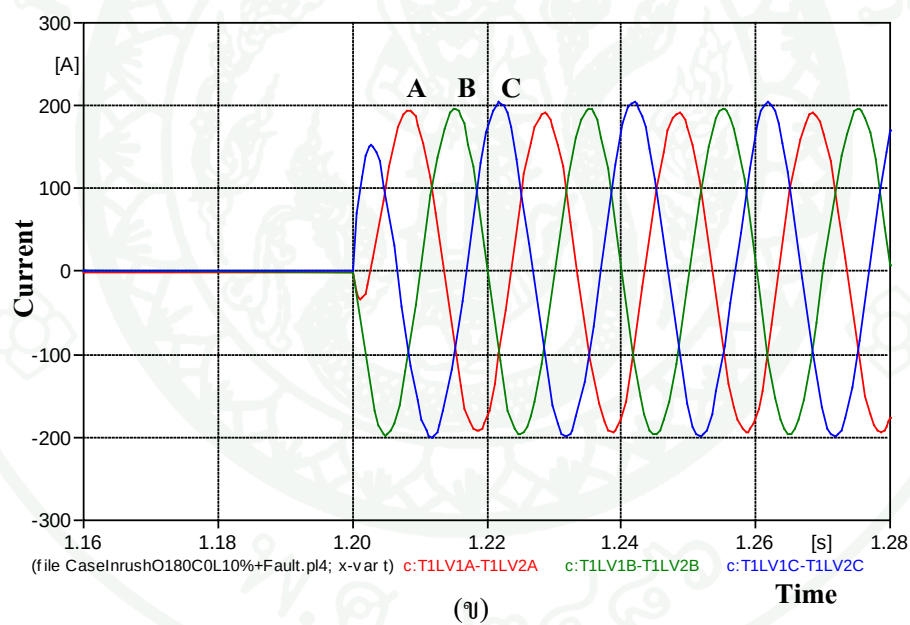
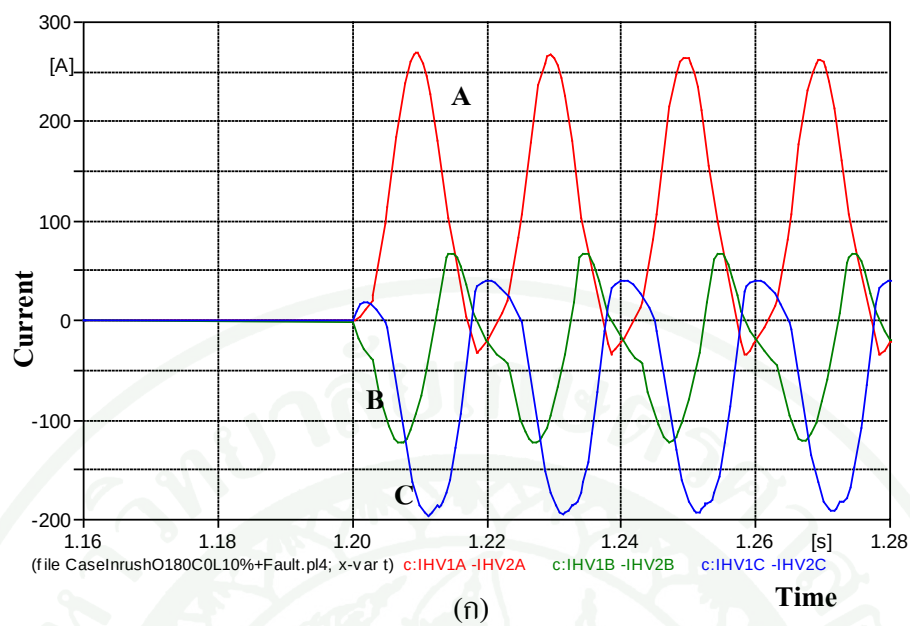
ภาพผนวกที่ ข2 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา OOC270L10



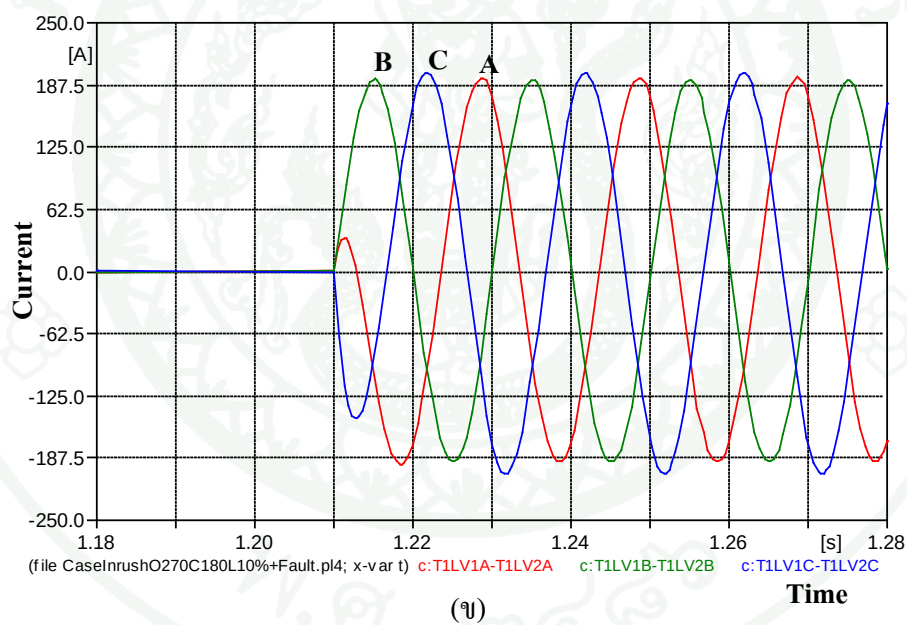
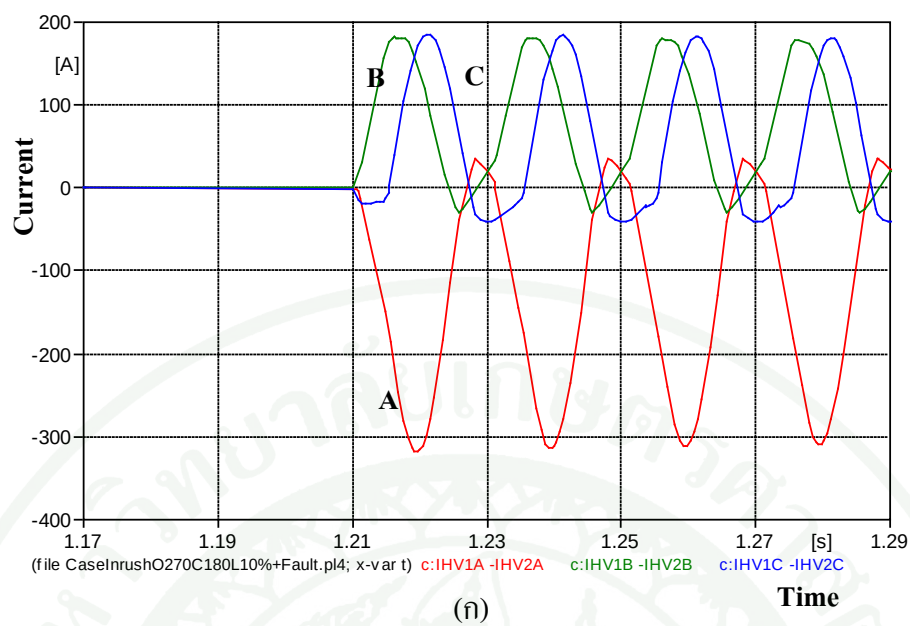
ภาพผนวกที่ ข3 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา O90C0L10



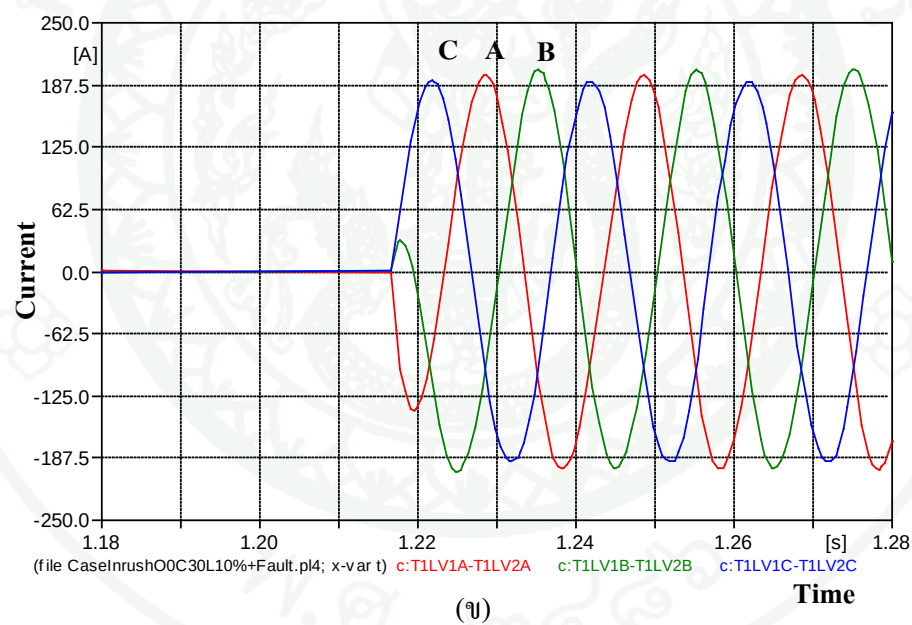
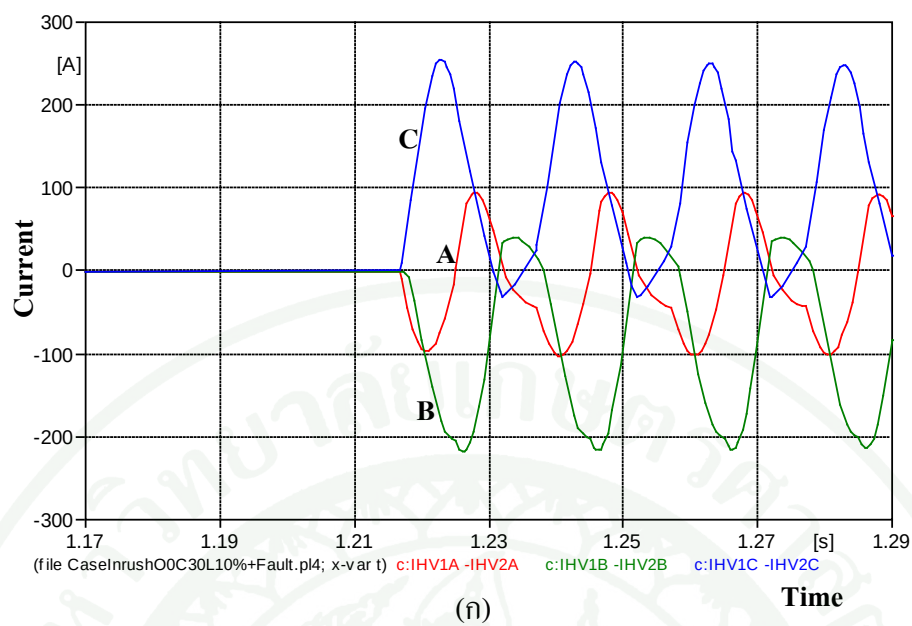
ภาพผนวกที่ ข4 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา O90C270L10



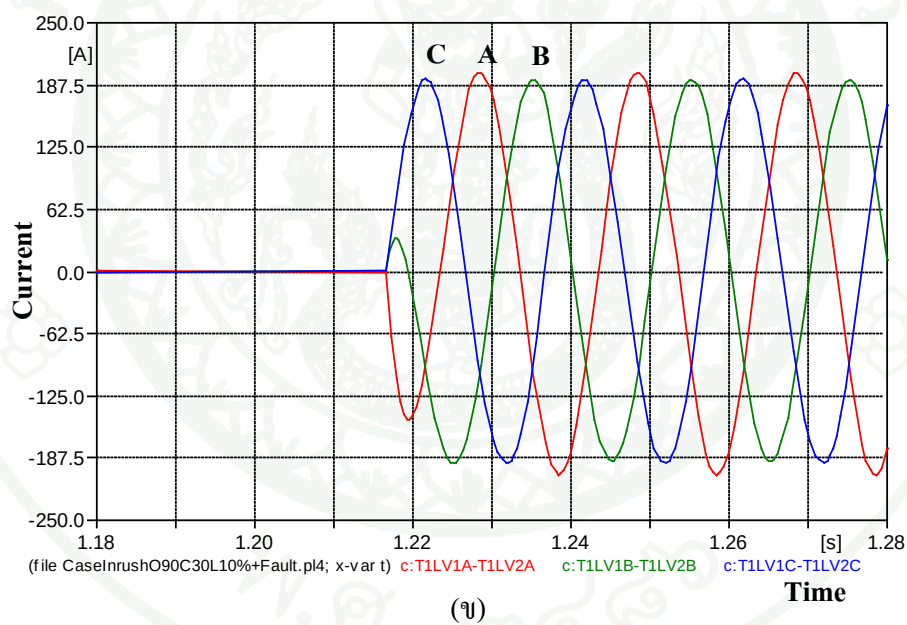
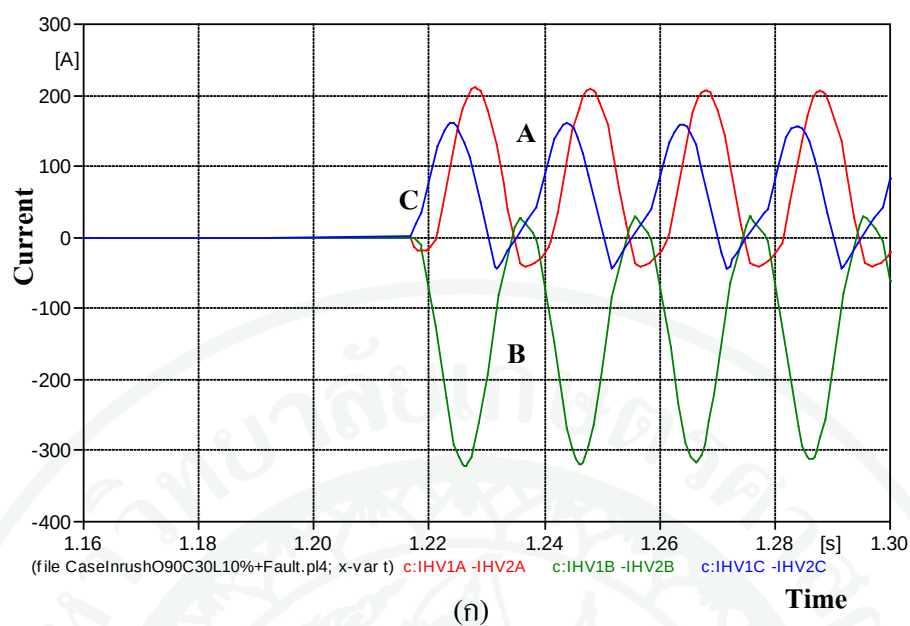
ภาพผนวกที่ ข5 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา O180C0L10



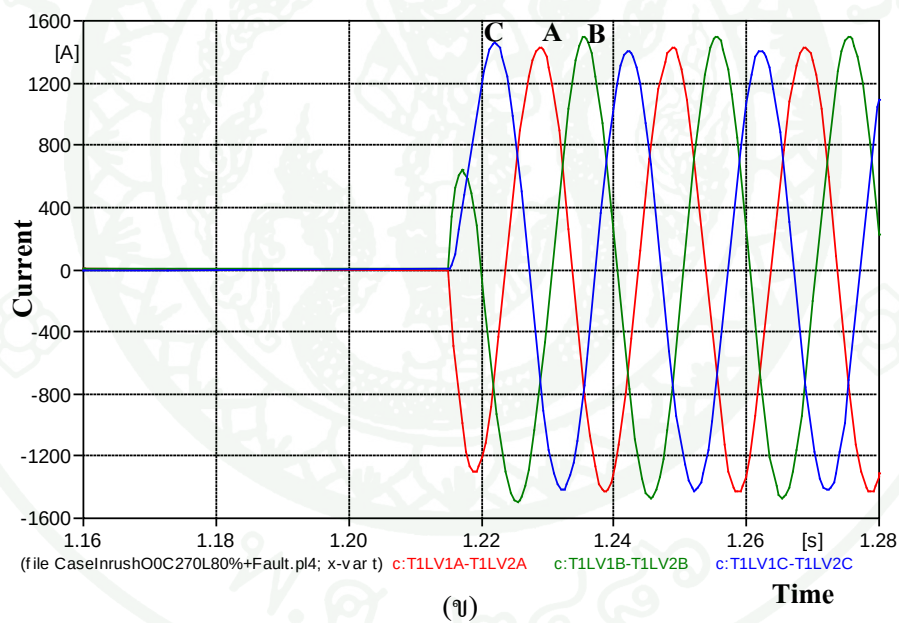
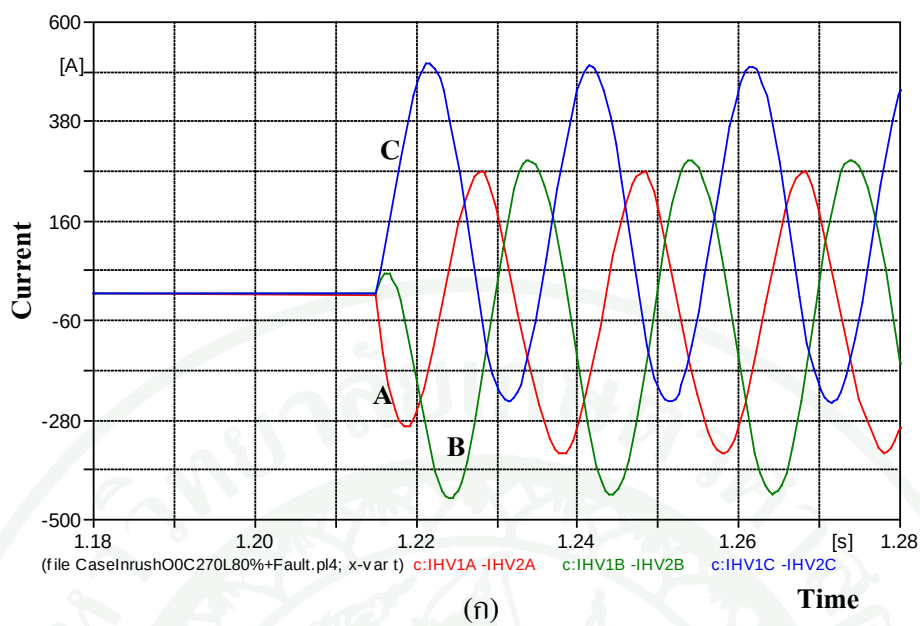
ภาพผนวกที่ ข6 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา O270C180L10



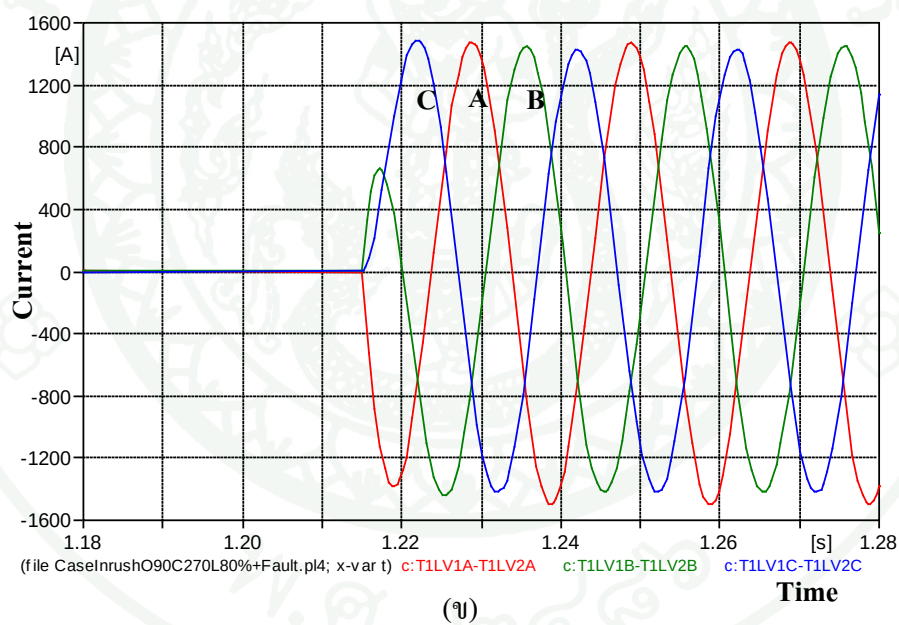
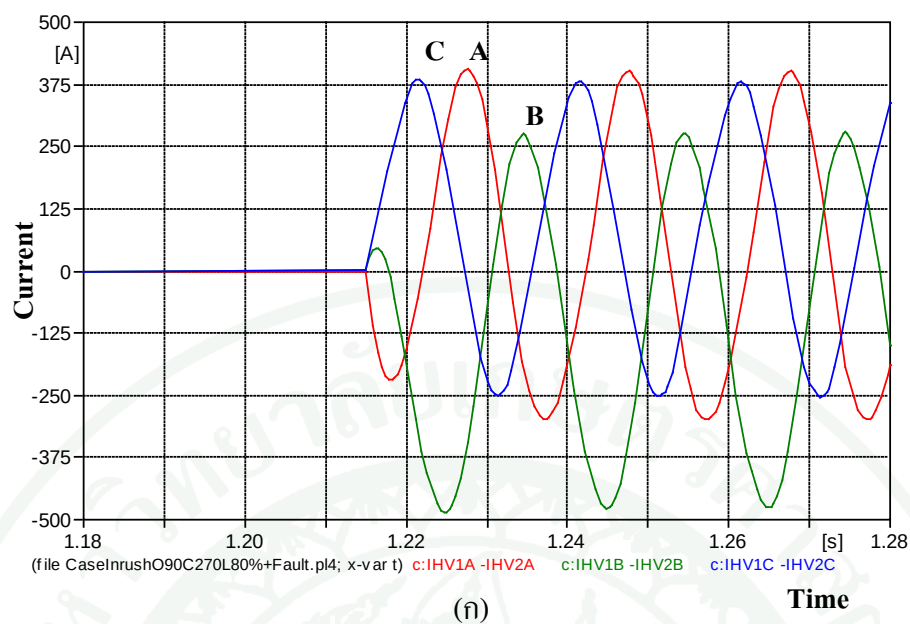
ภาพผนวกที่ ข7 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา OOC30L10



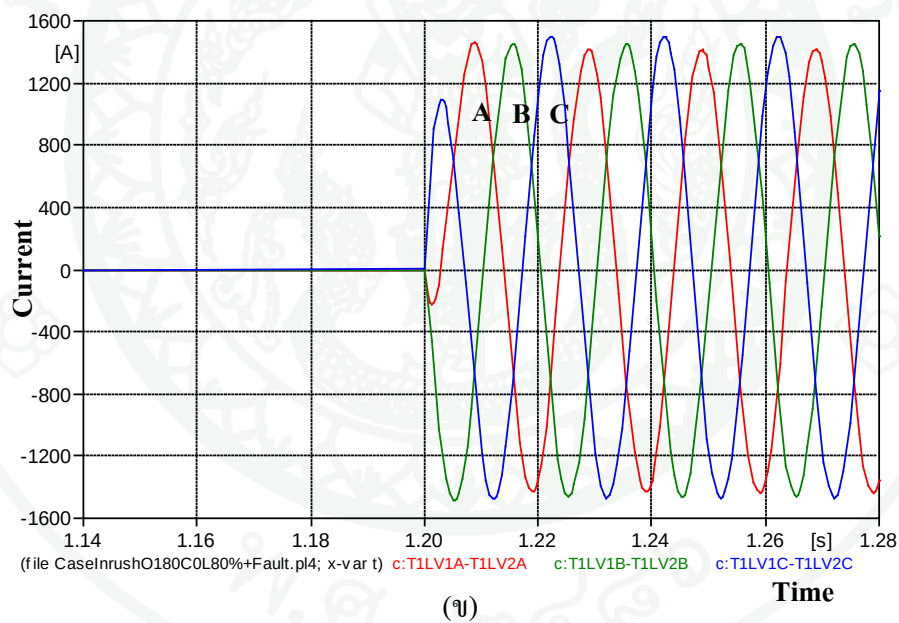
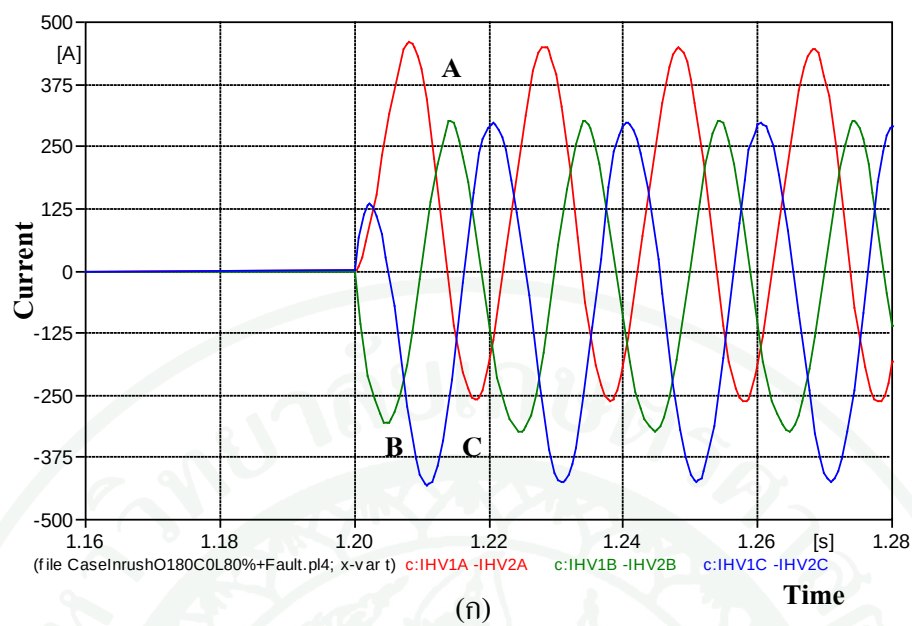
ภาพผนวกที่ ข8 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา O90C30L10



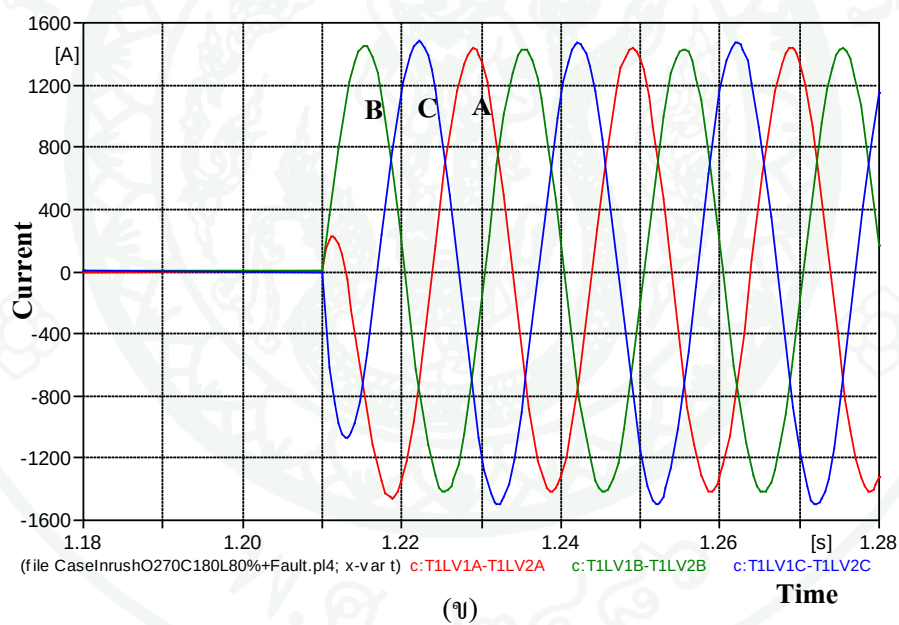
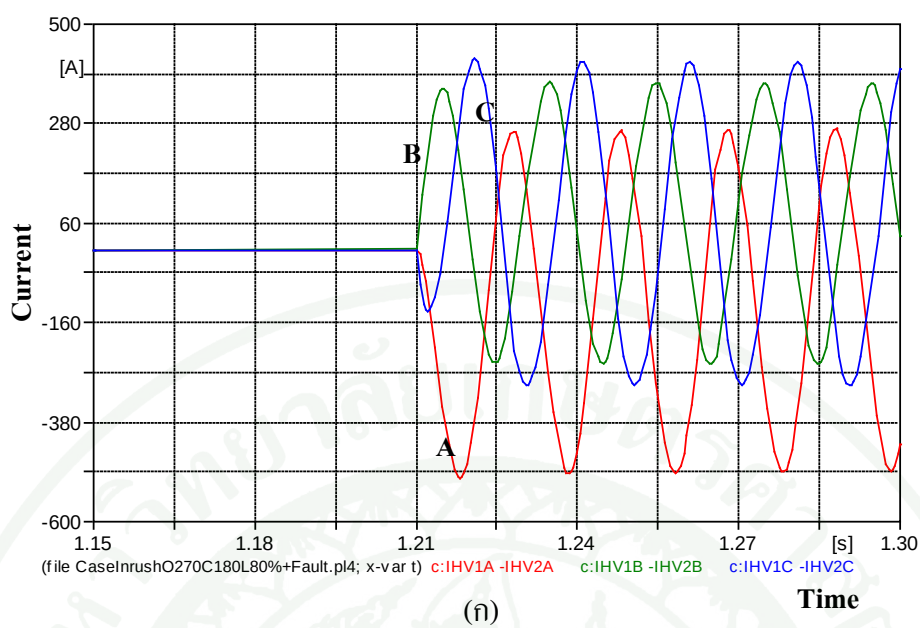
ภาพผนวกที่ ข9 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา O0C270L80



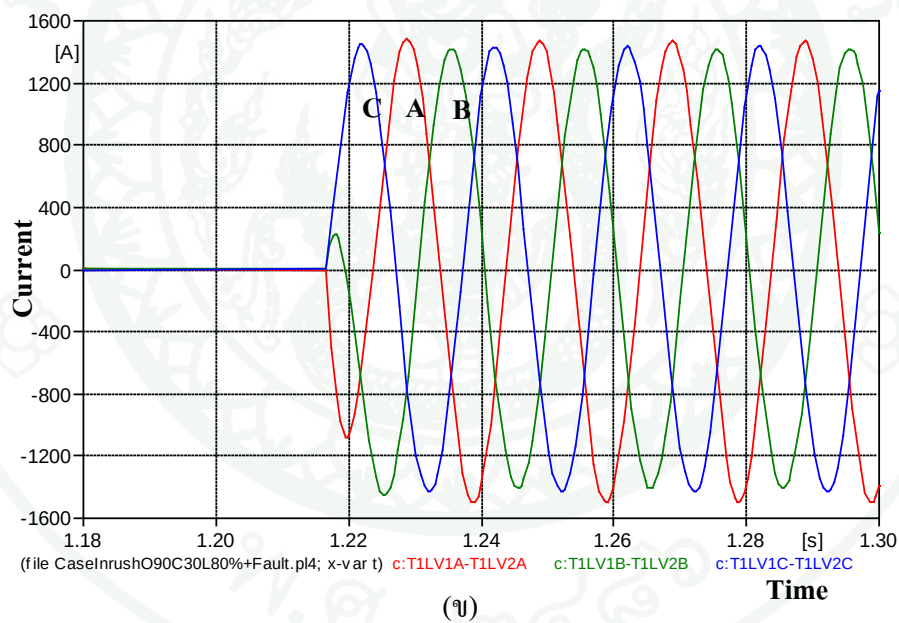
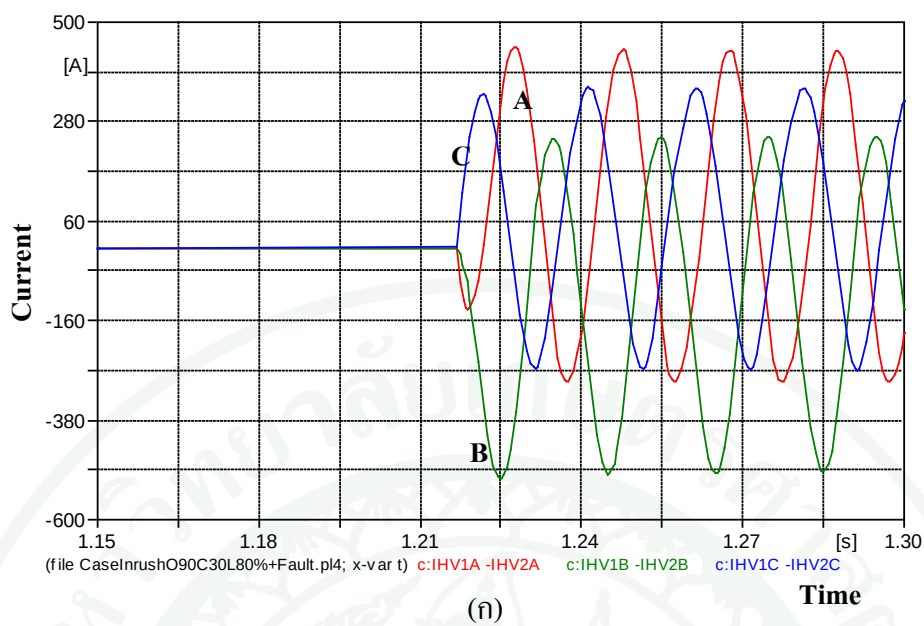
ภาพผนวกที่ ข10 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา O90C270L80



ภาพผนวกที่ ข11 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา O180C0L80



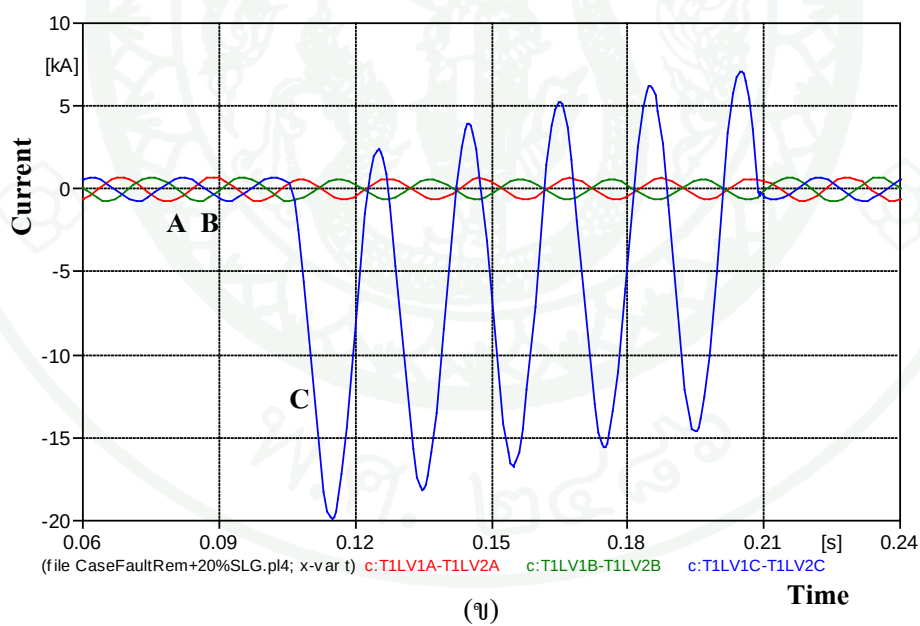
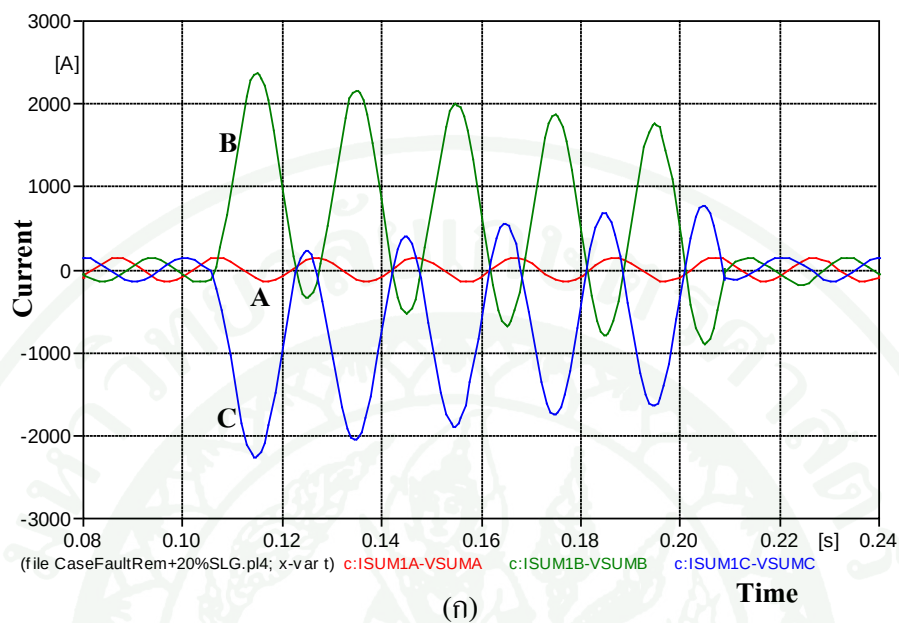
ภาพผนวกที่ ข12 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา O270C80L80



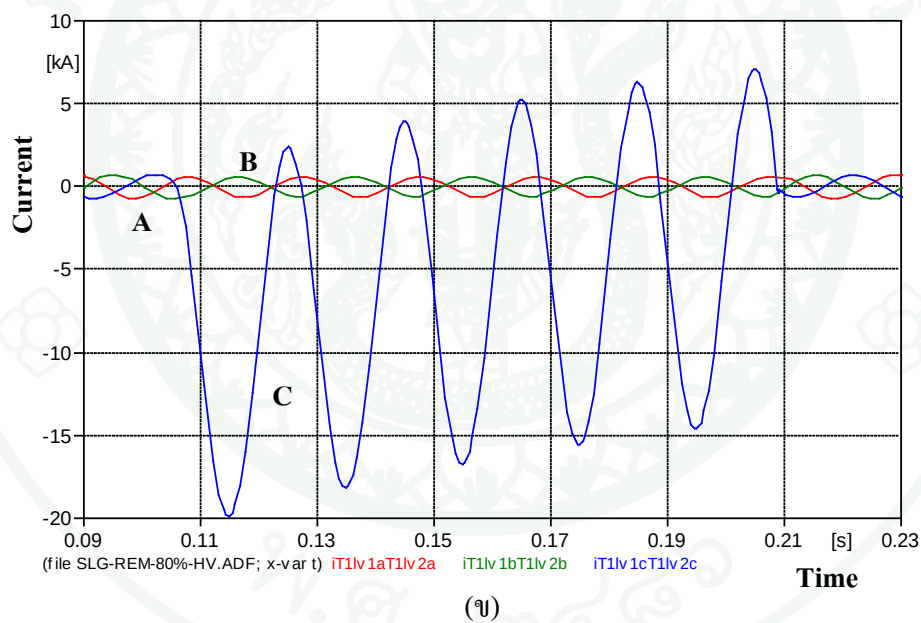
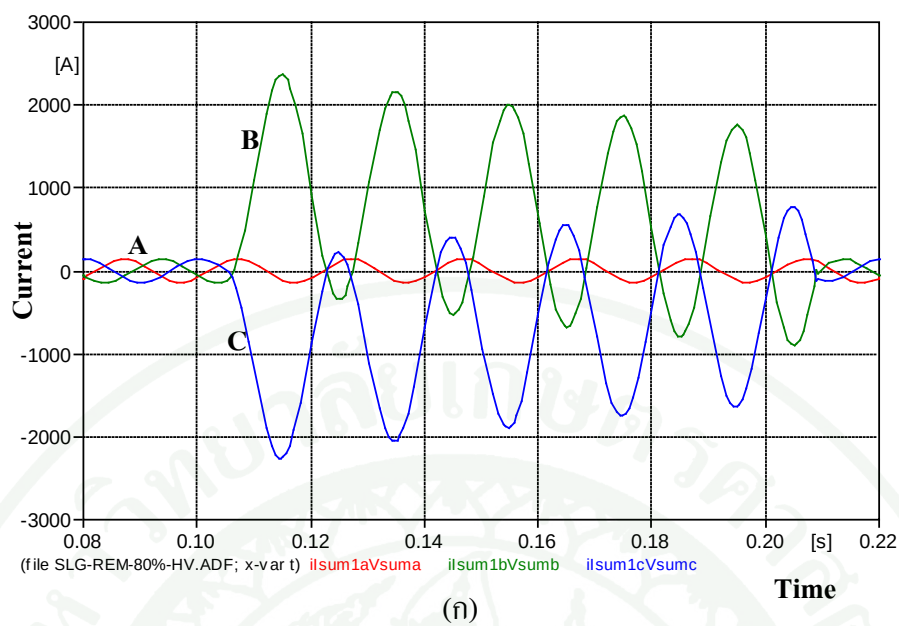
ภาพผนวกที่ ข13 รูปคลื่นกระแสและเหตุขุมของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C30L80

ลักษณะรูปคลื่นกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง
(กรณีศึกษากลุ่ม B)

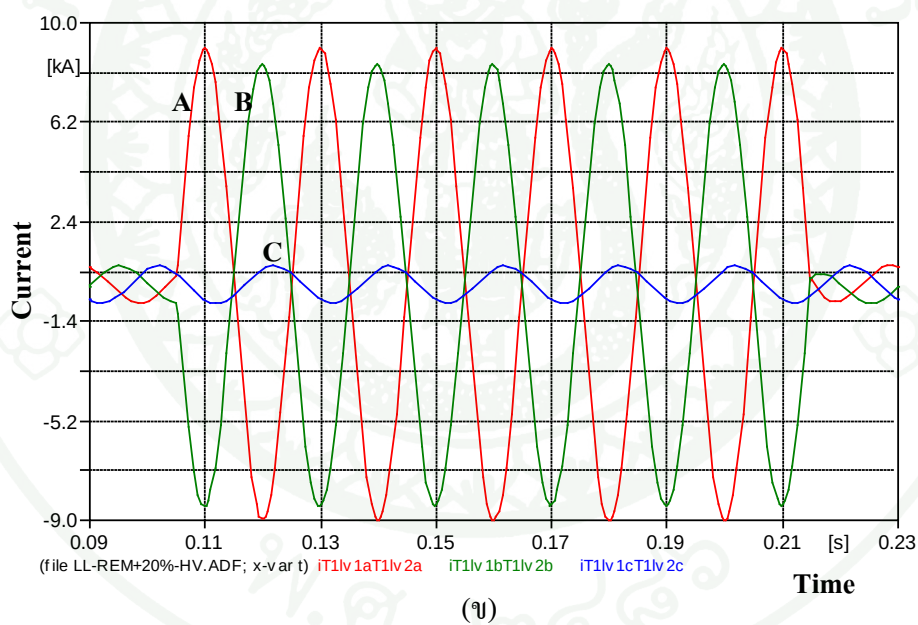
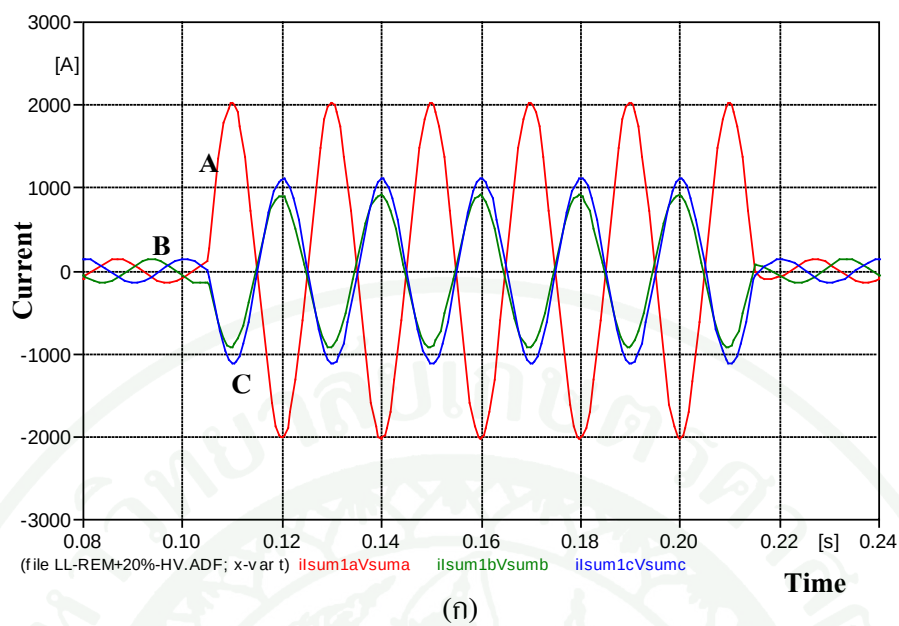
ลักษณะรูปคลื่นกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง



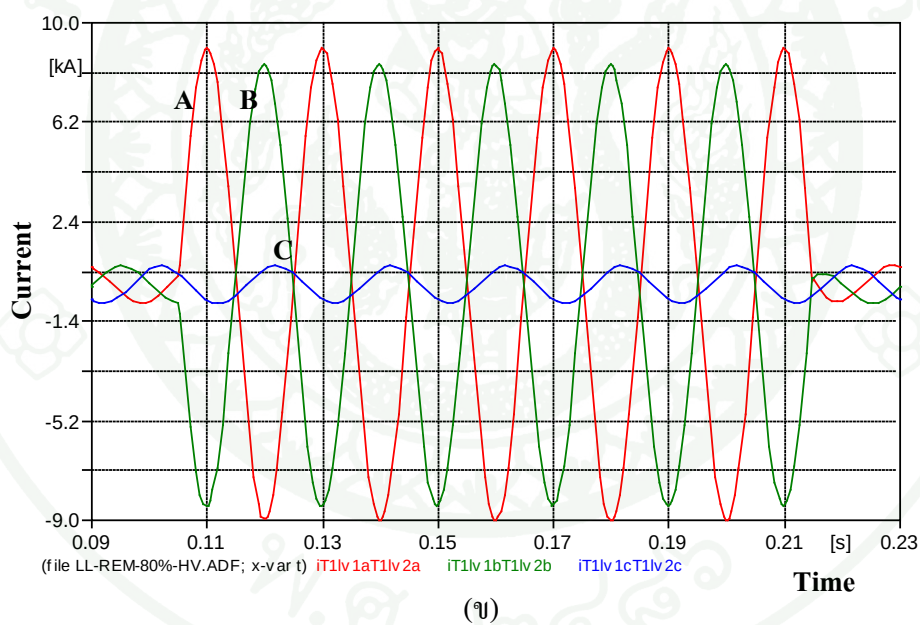
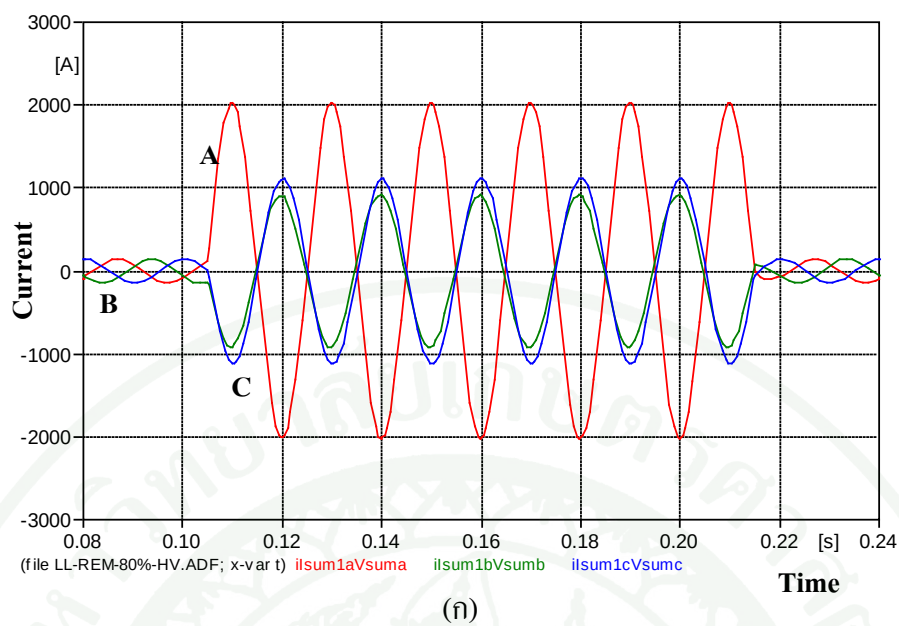
ภาพผนวกที่ ข14 รูปคลื่นกระแสประจุรวมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา B1R20PF1



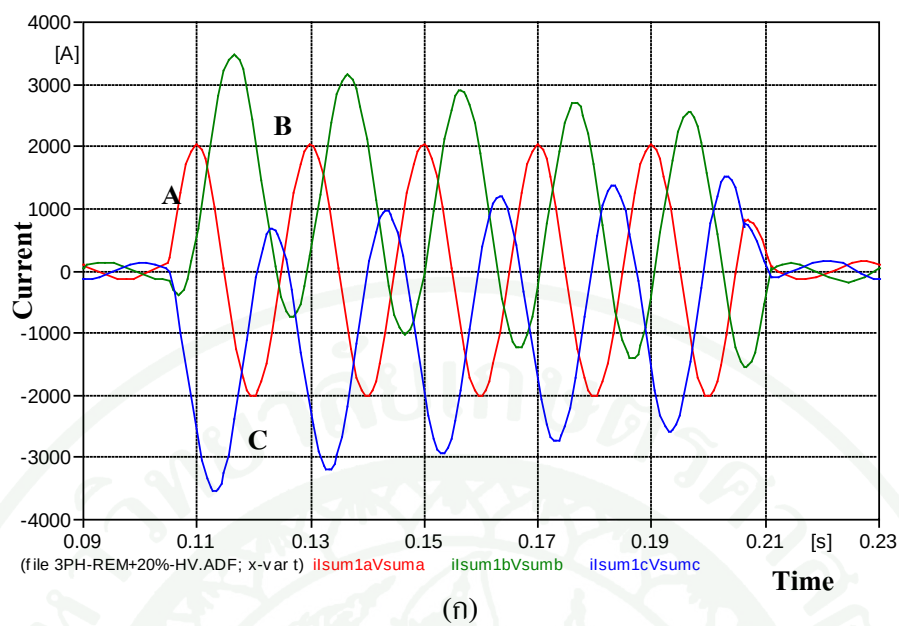
ภาพผนวกที่ ข15 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา B1R80NF1



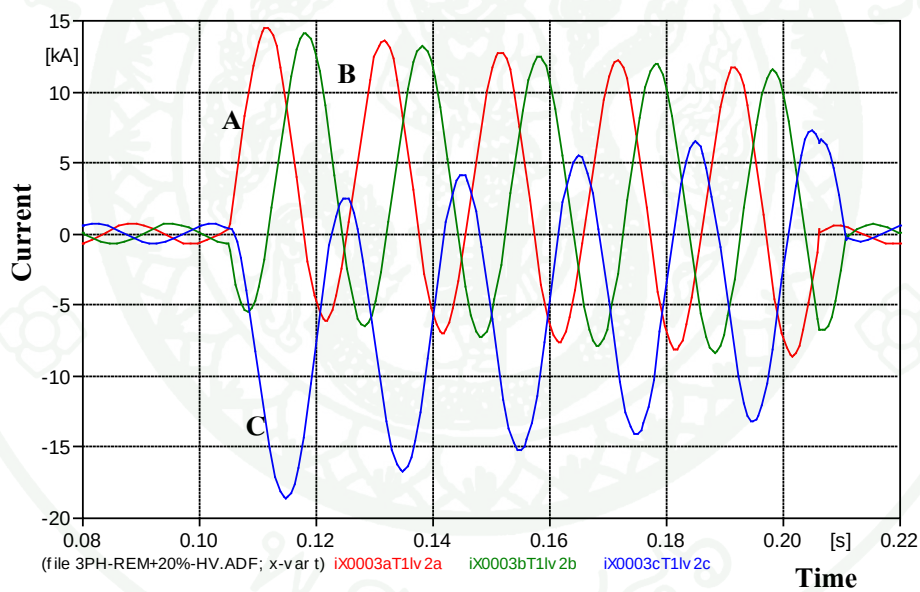
ภาพผนวกที่ ข16 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา B1R20PF2



ภาพผนวกที่ ข17 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา B1R80NF2

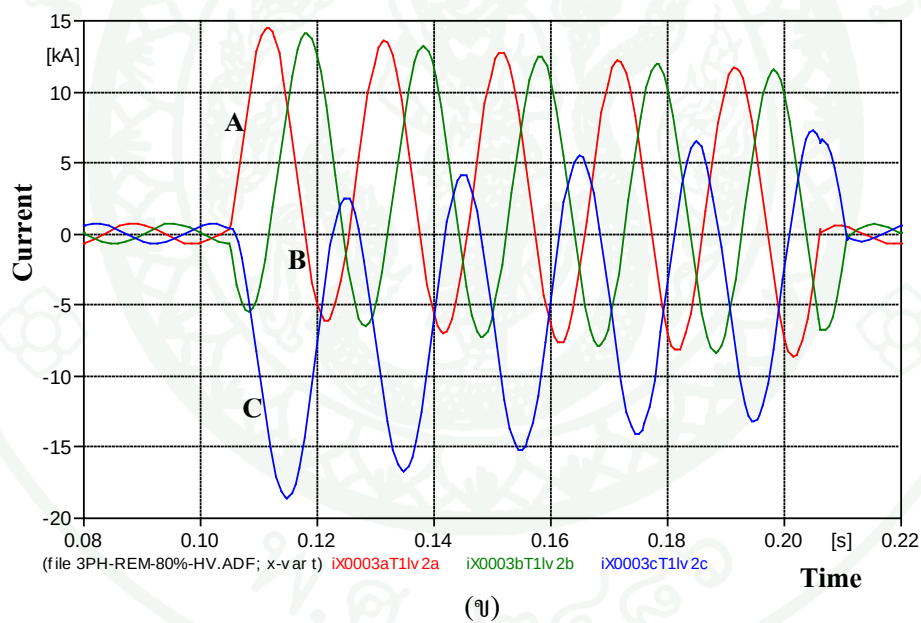
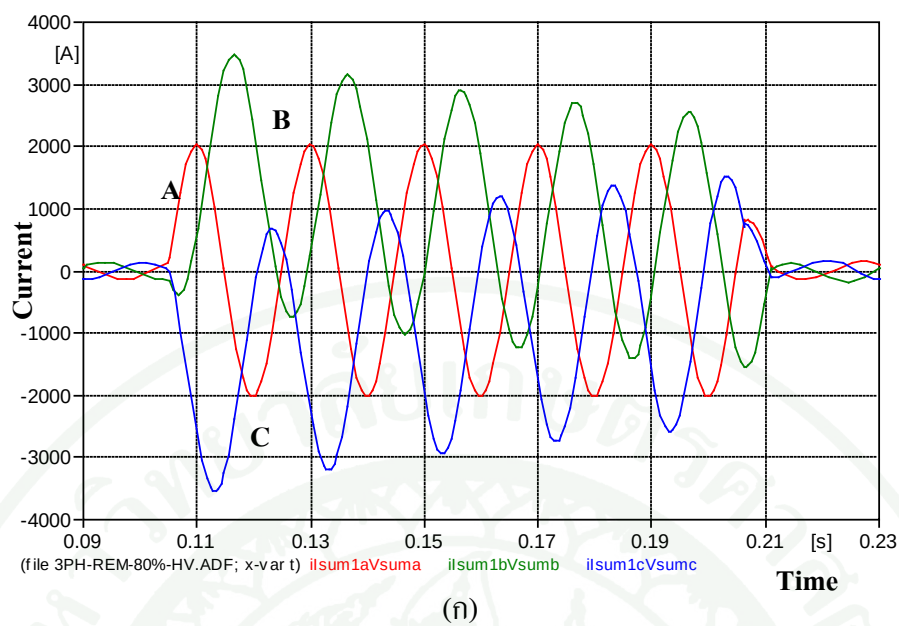


(ก)

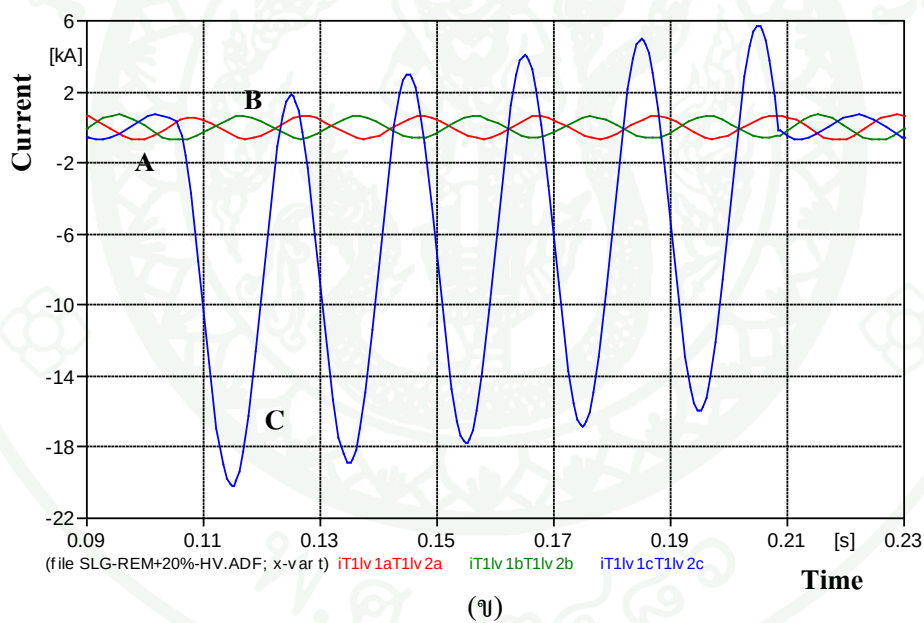
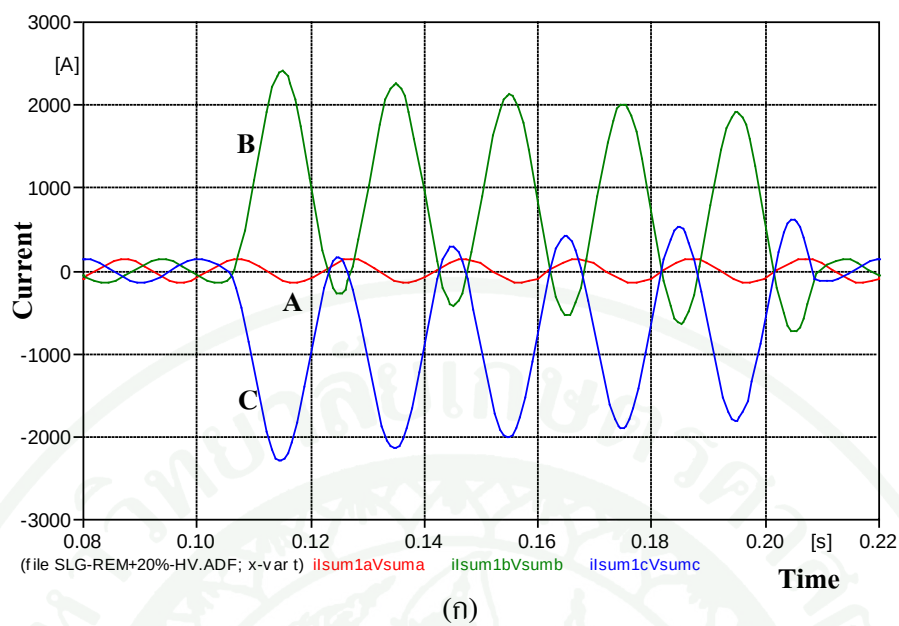


(ข)

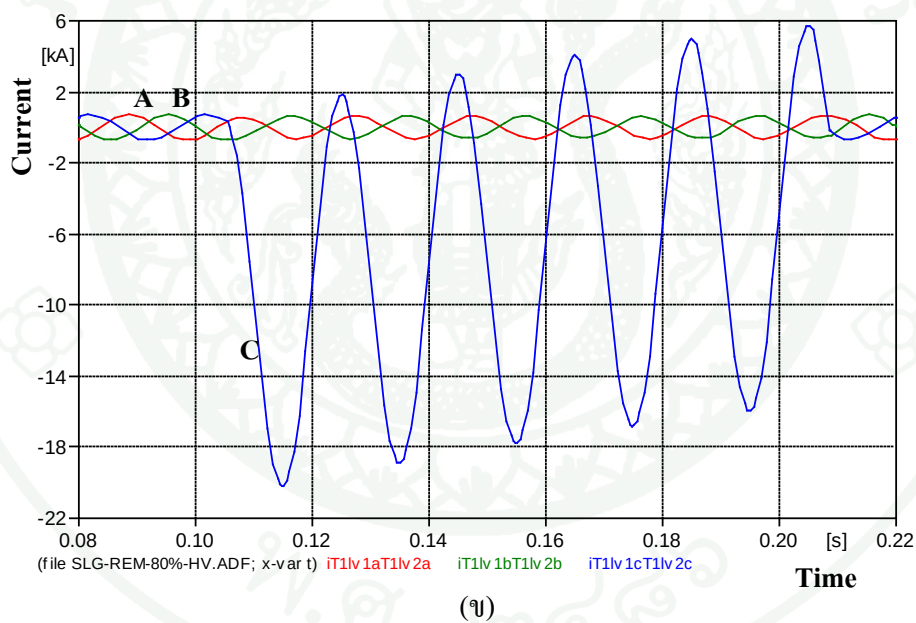
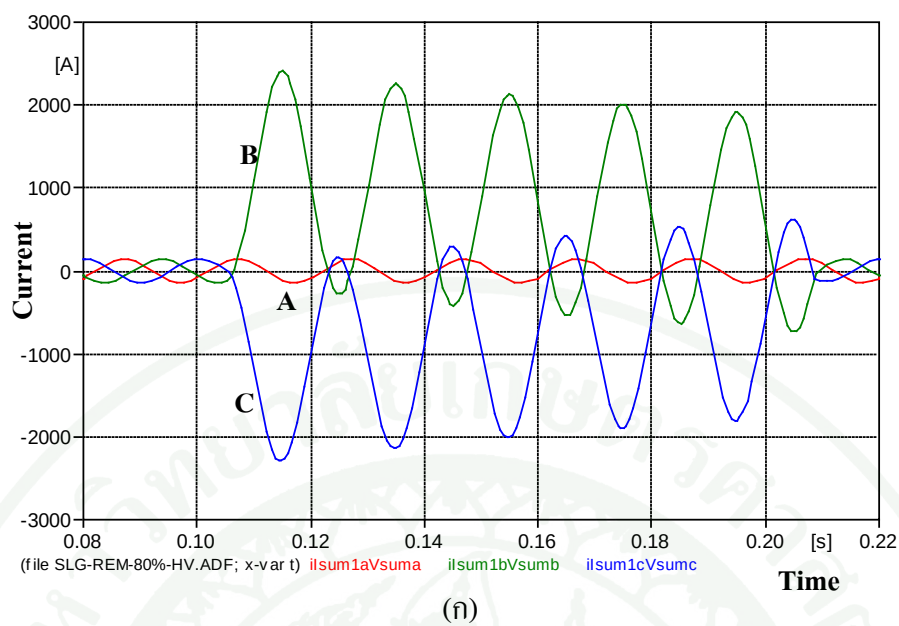
ภาพผนวกที่ ข18 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา B1R20PF3



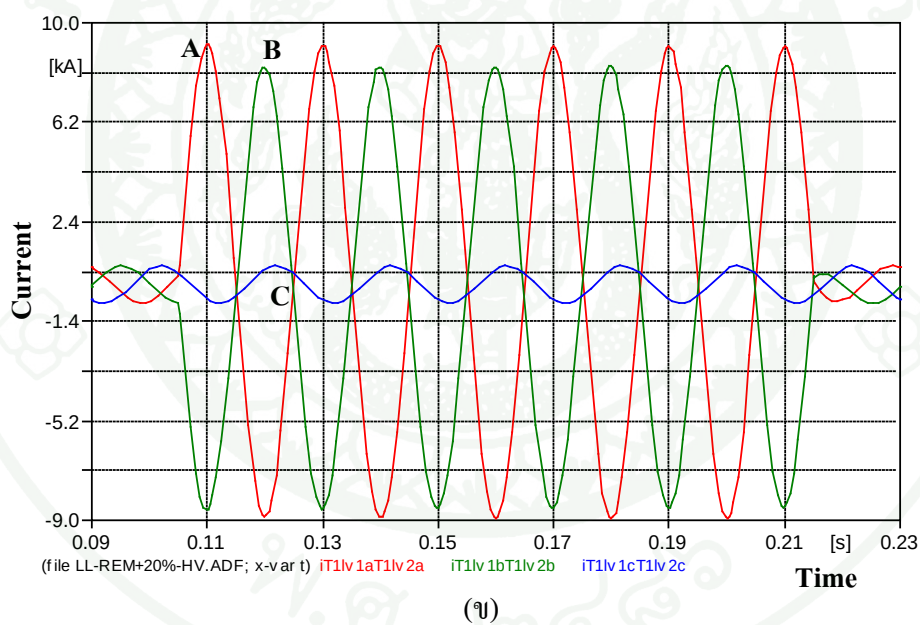
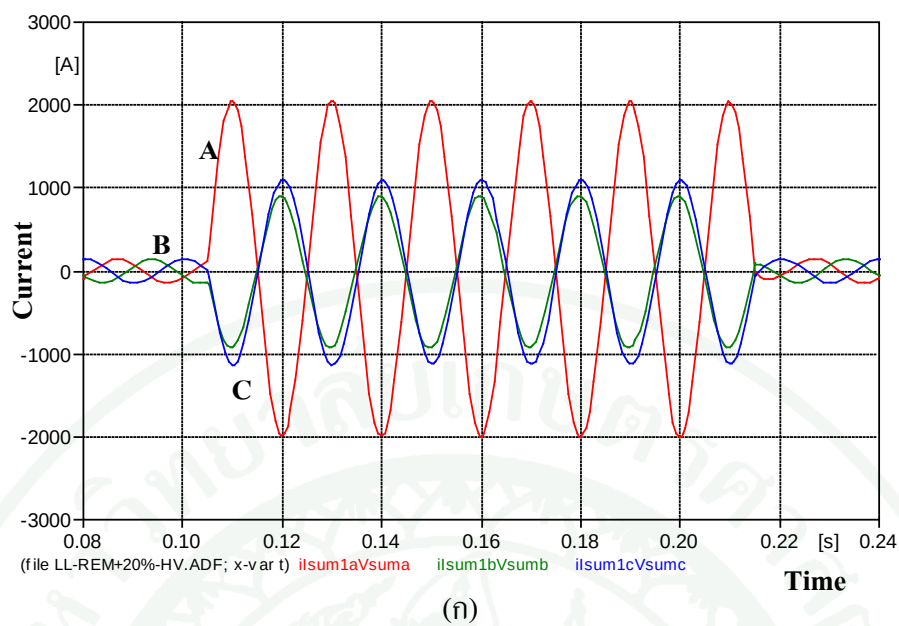
ภาพผนวกที่ ข19 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา B1R80NF3



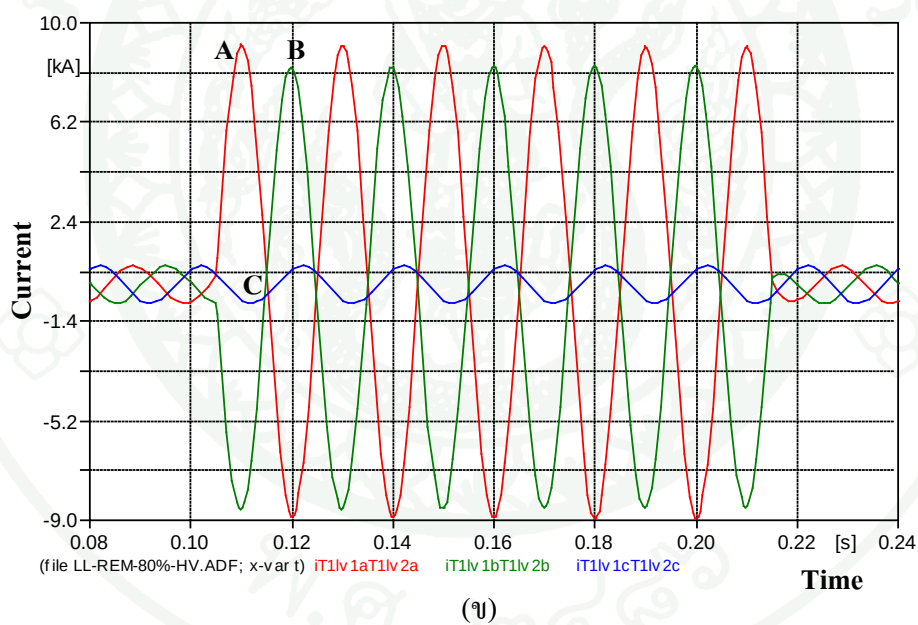
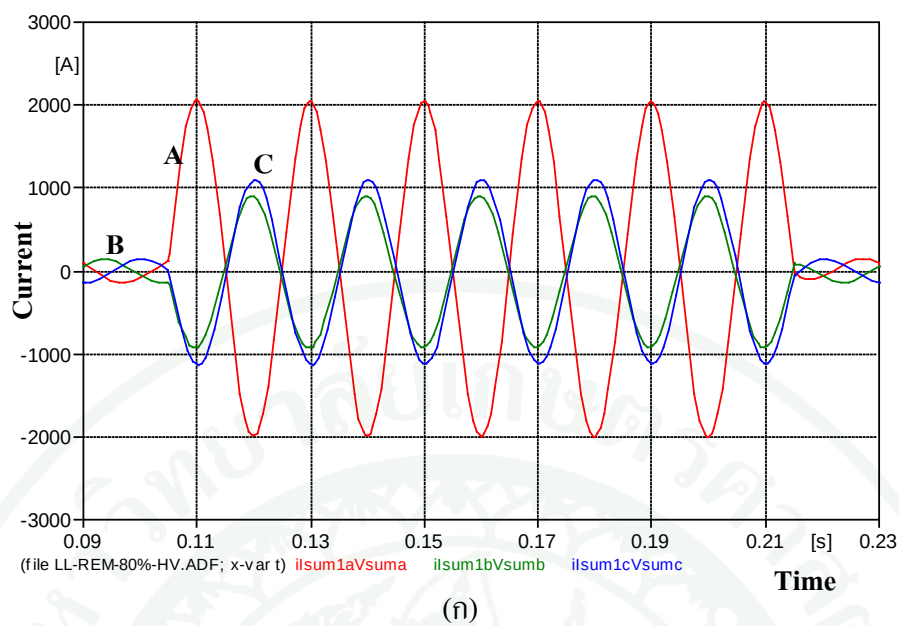
ภาพผนวกที่ ข20 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา B2R20PF1



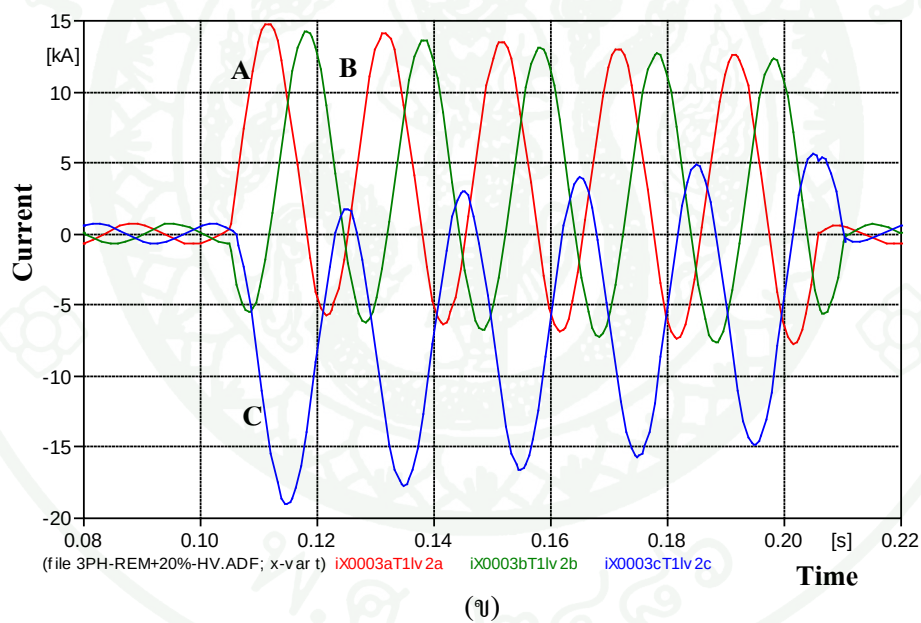
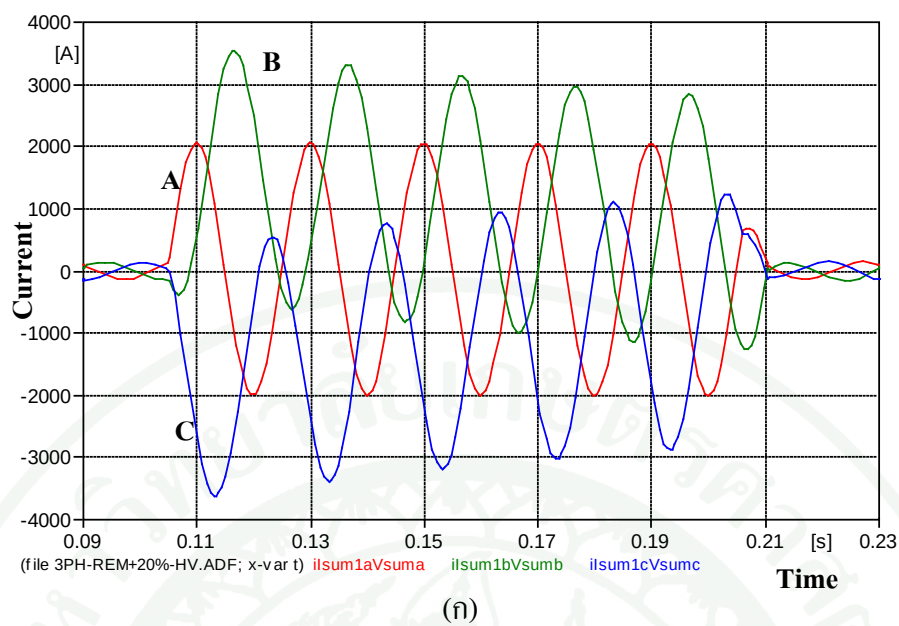
ภาพผนวกที่ ข21 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา B2R80NF1



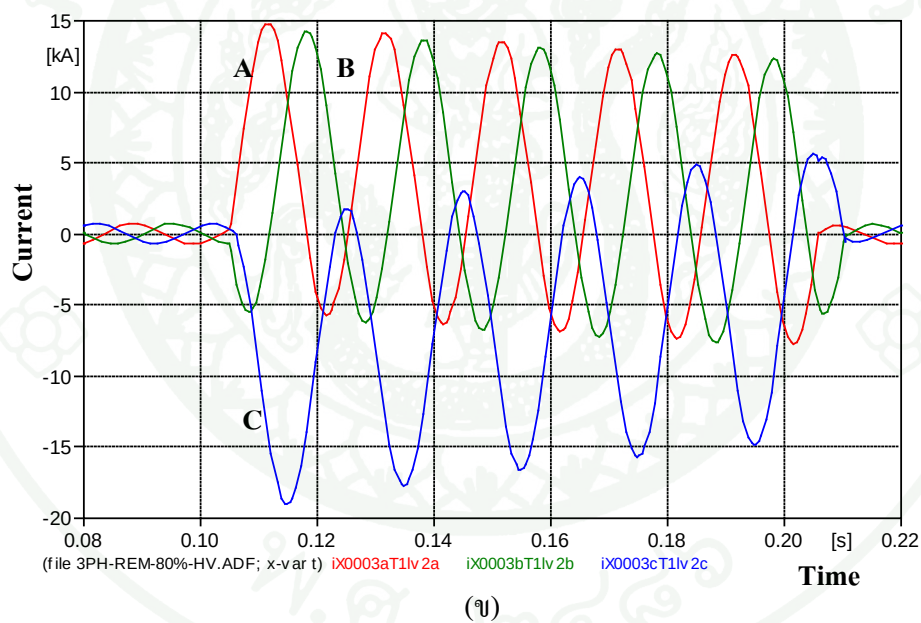
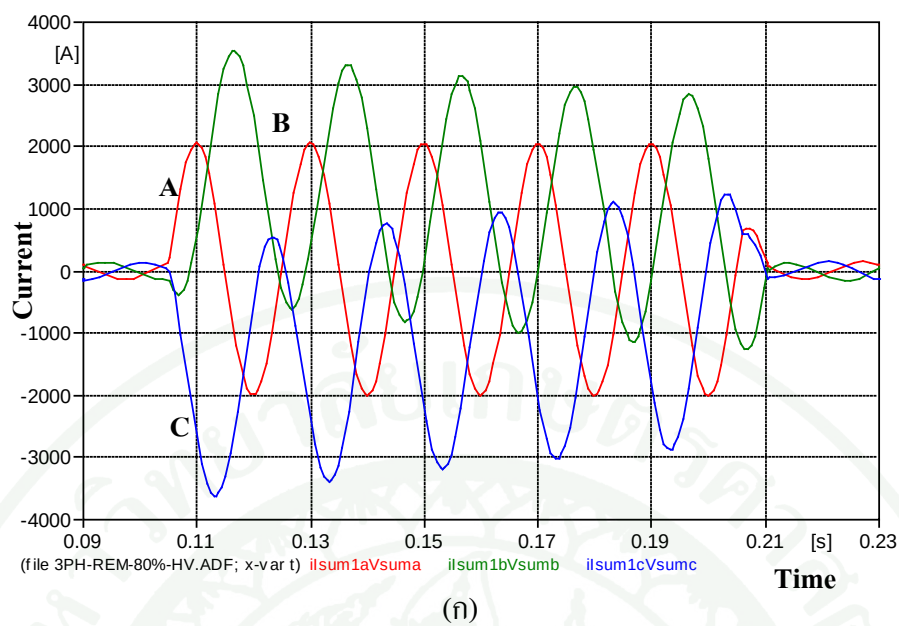
ภาพผนวกที่ ข22 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา B2R20PF2



ภาพผนวกที่ ข23 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา B2R80NF2



ภาพผนวกที่ ข24 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา B2R20PF3



ภาพผนวกที่ ข25 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
กรณีศึกษา B2R80NF3

ภาคผนวก ค

พฤติกรรมตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแส

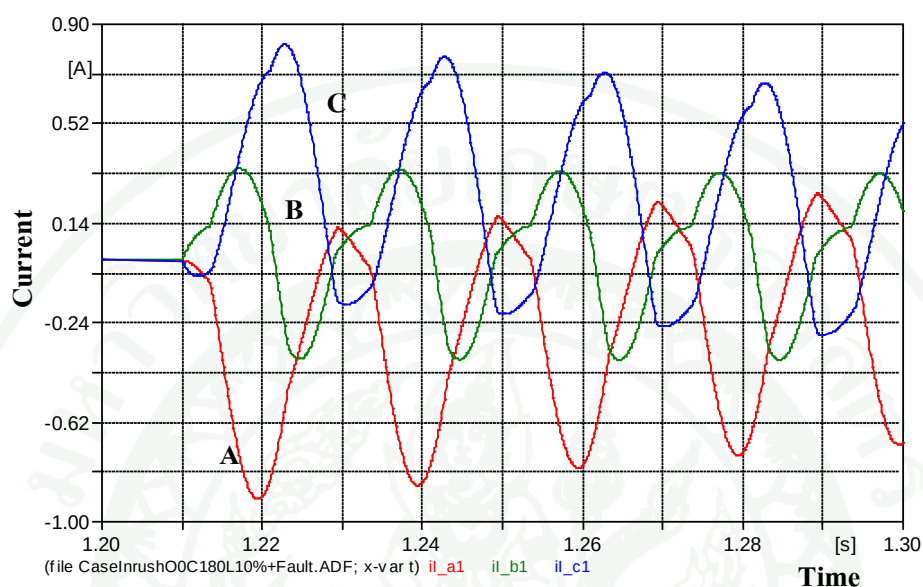
เมื่อเกิดกระแสลัดเลียงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าและกระแสลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง

(กรณีศึกษากลุ่ม A, B, C และ D)

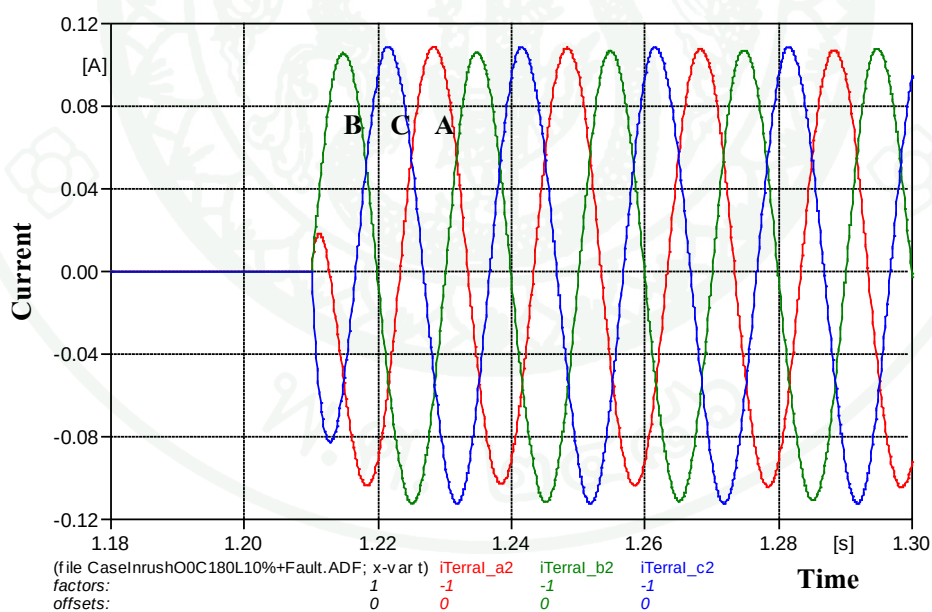
พฤติกรรมตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแส
เมื่อเกิดกระแสลัดเลียงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าในระบบไฟฟ้ากำลัง
(กรณีศึกษากลุ่ม A)

พฤติกรรมการตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแส

เมื่อเกิดกระแสลัดเลียงสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

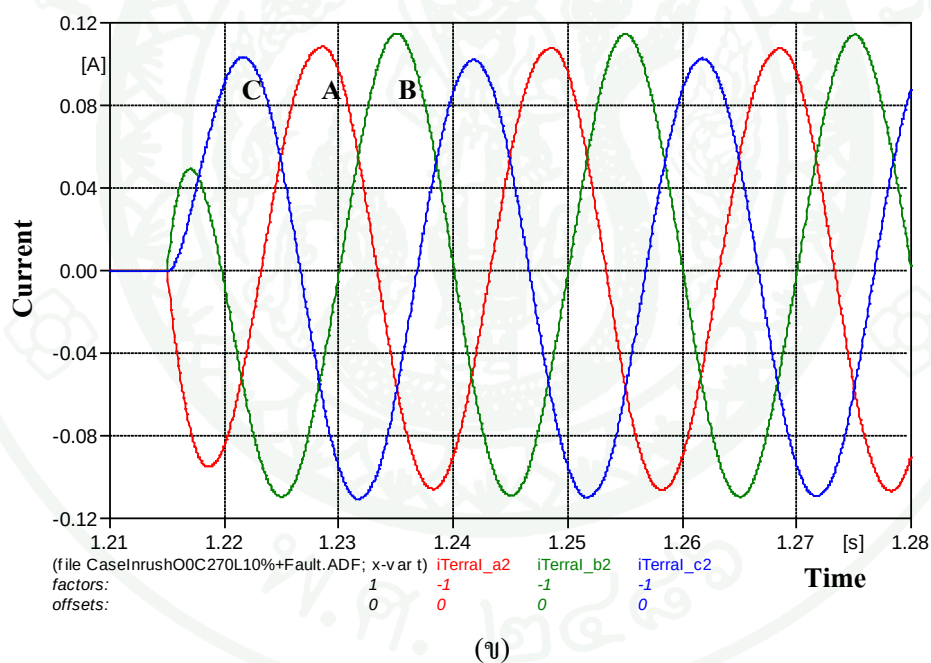
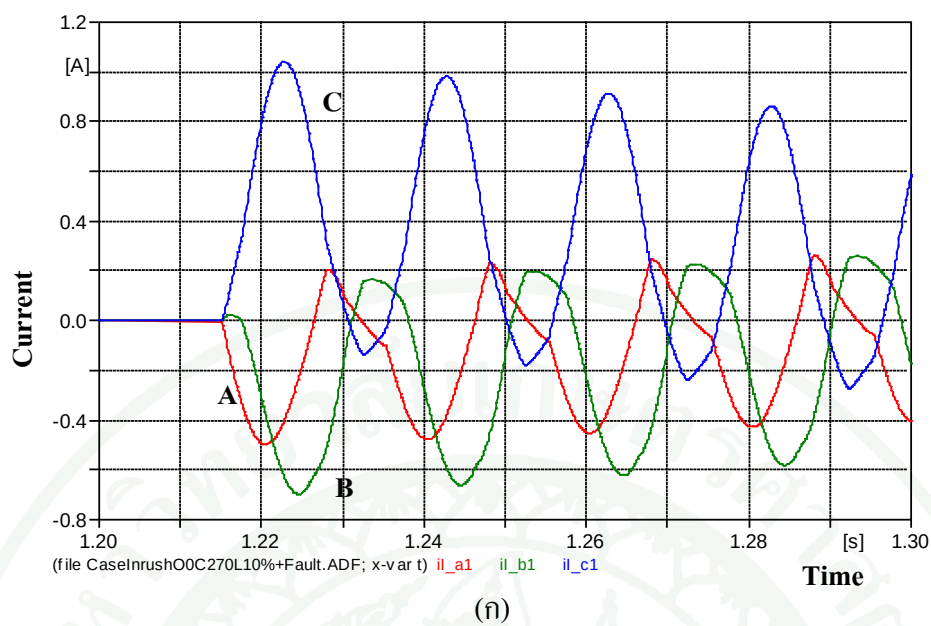


(ก)

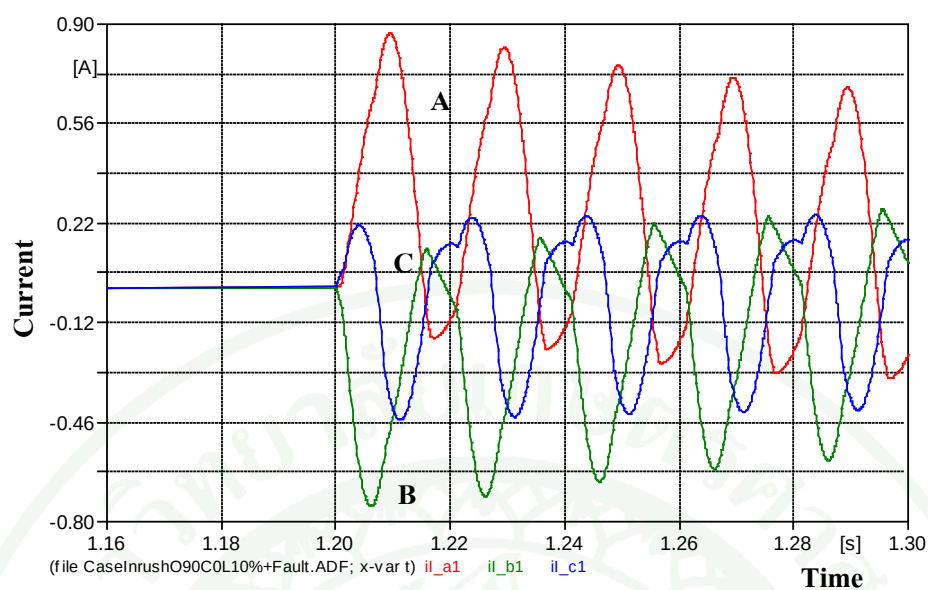


(ข)

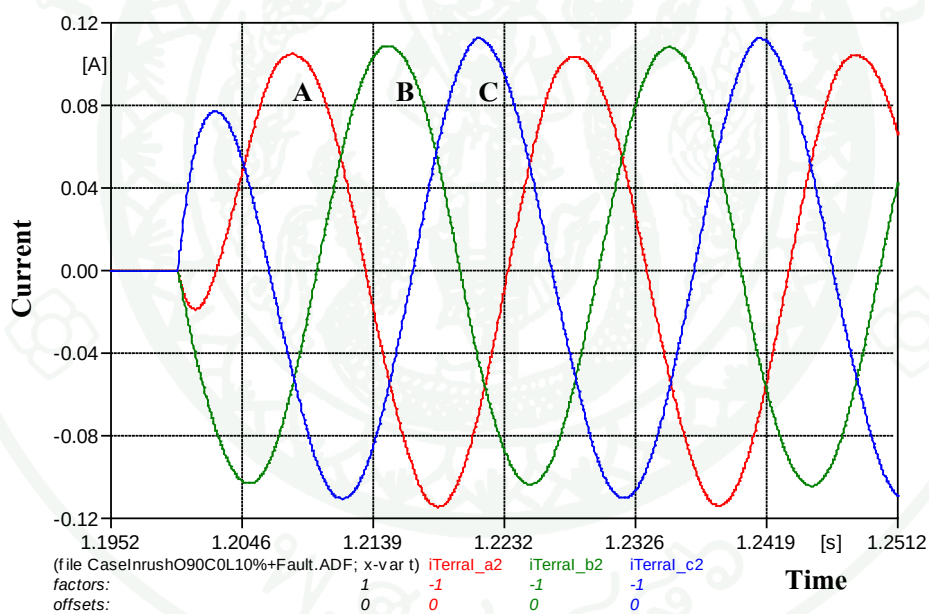
ภาพผนวกที่ ค1 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา OOC180L10



ภาพผนวกที่ ค2 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา OOC270L10

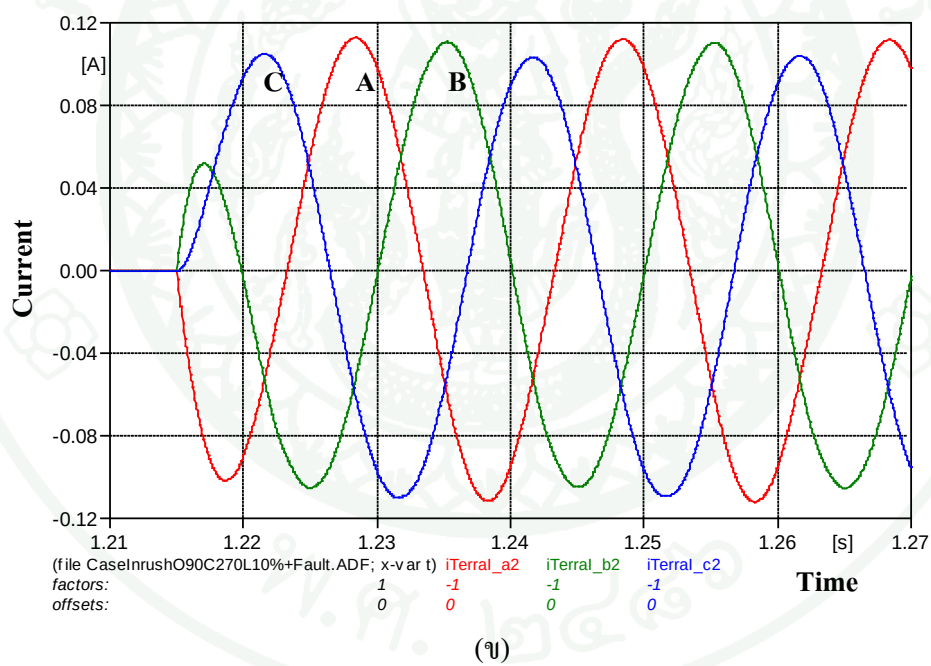
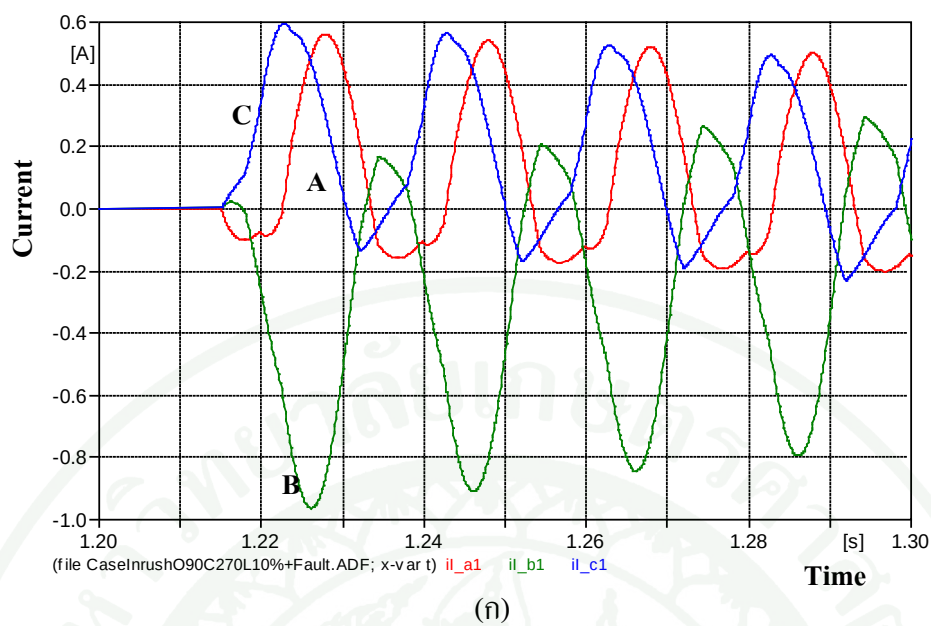


(ก)

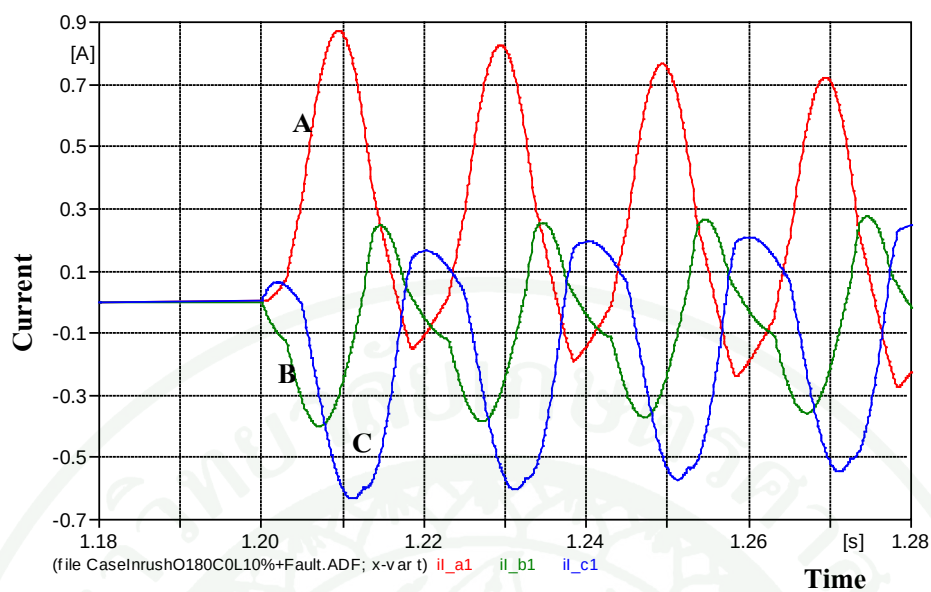


(ข)

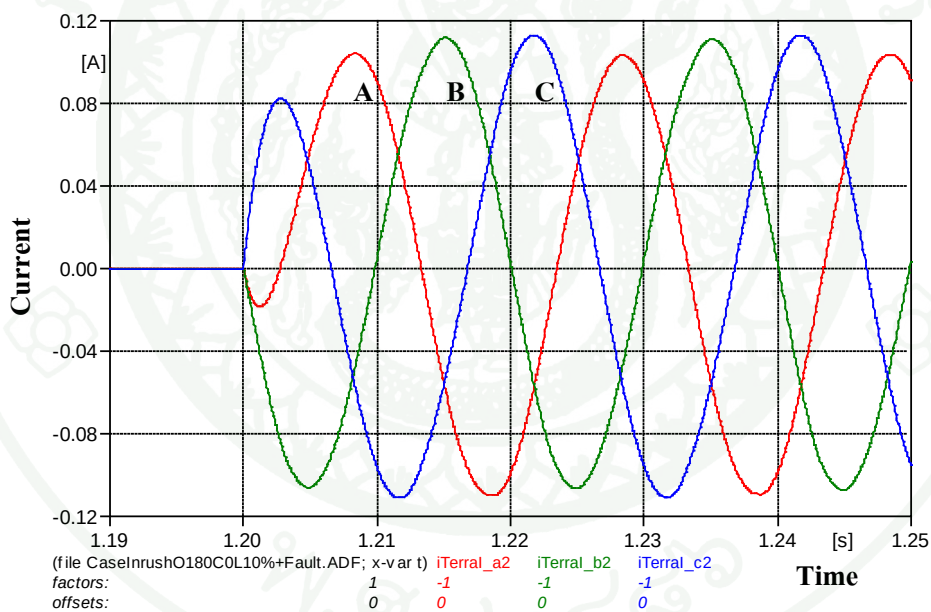
ภาพผนวกที่ ค3 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C0L10



ภาพผนวกที่ ค4 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C270L10

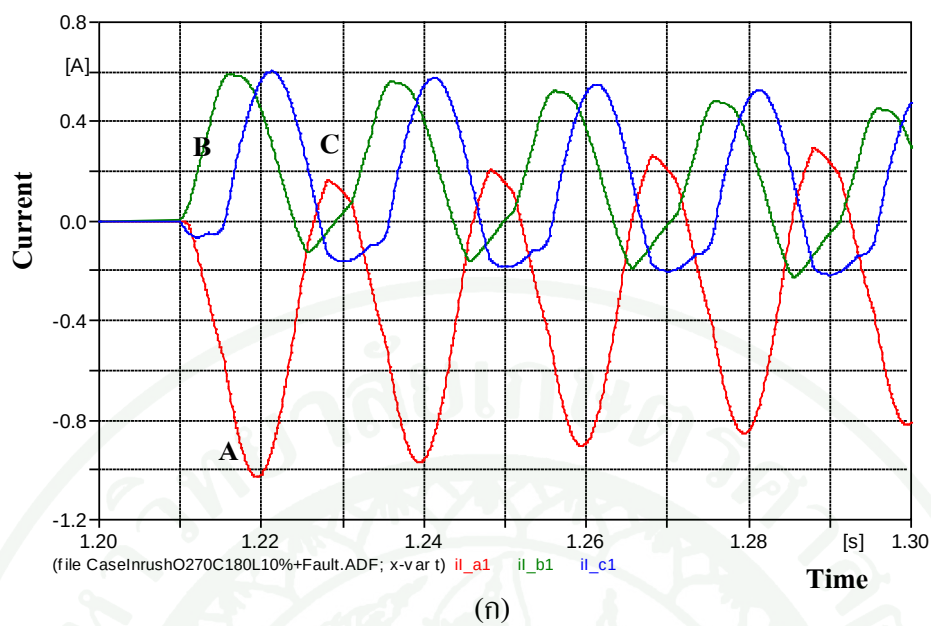


(ก)

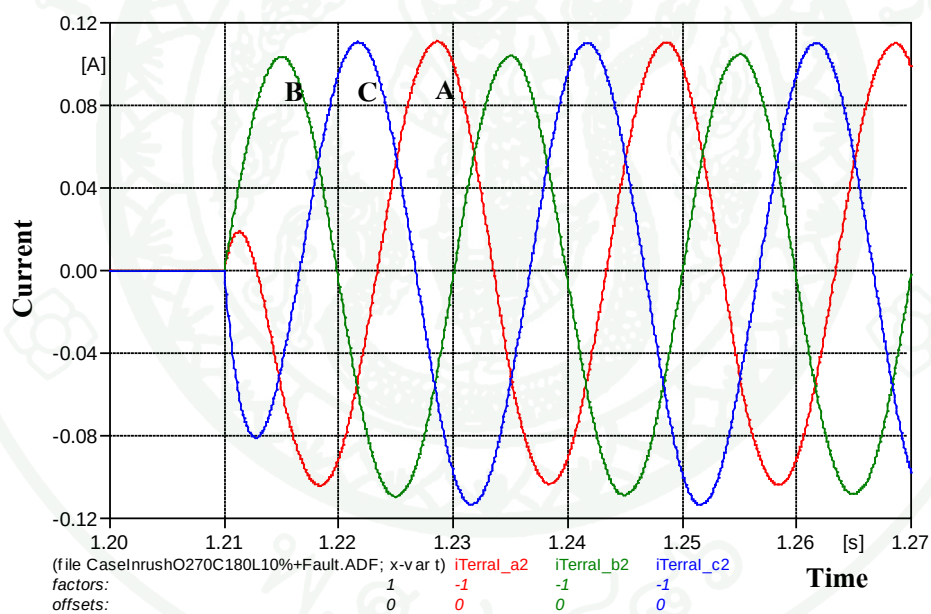


(ข)

ภาพผนวกที่ ค5 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O180COL10

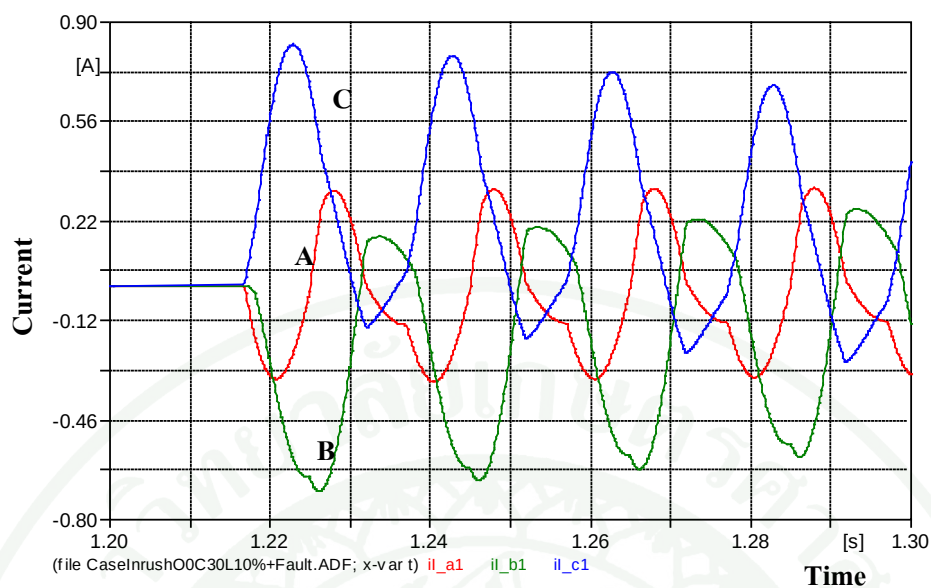


(ก)

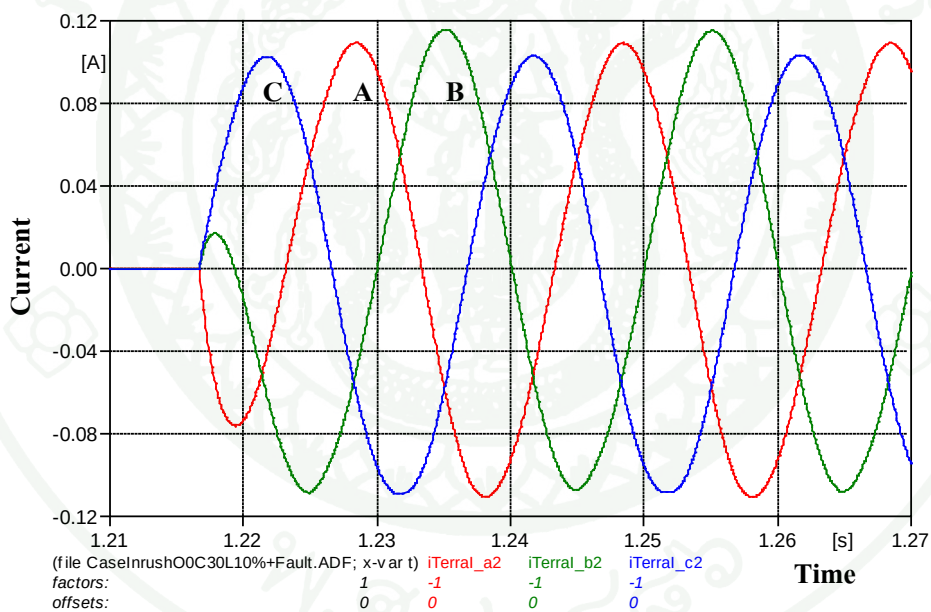


(ข)

ภาพผนวกที่ ค6 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O270C180L10

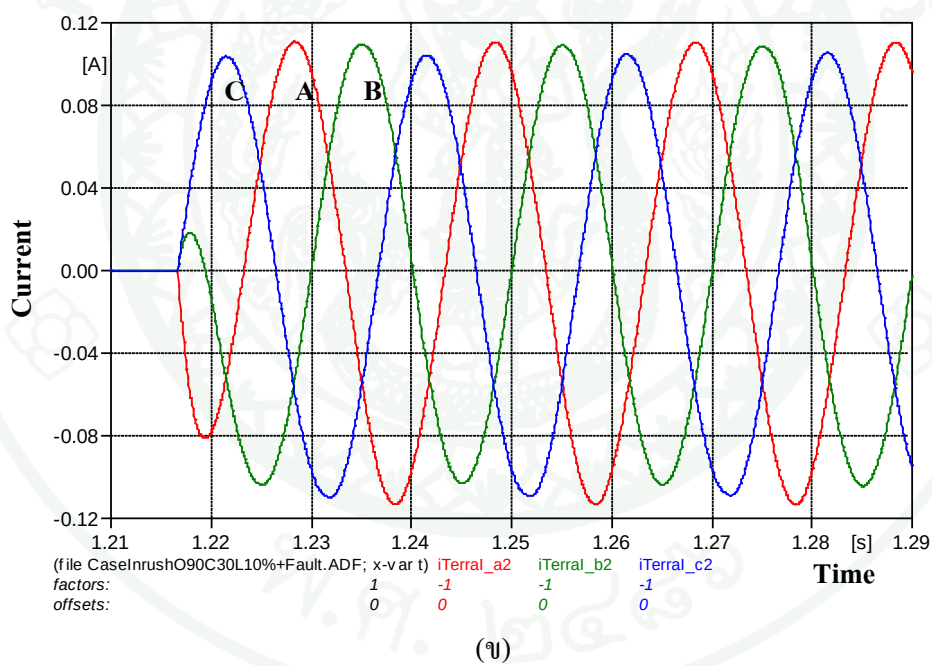
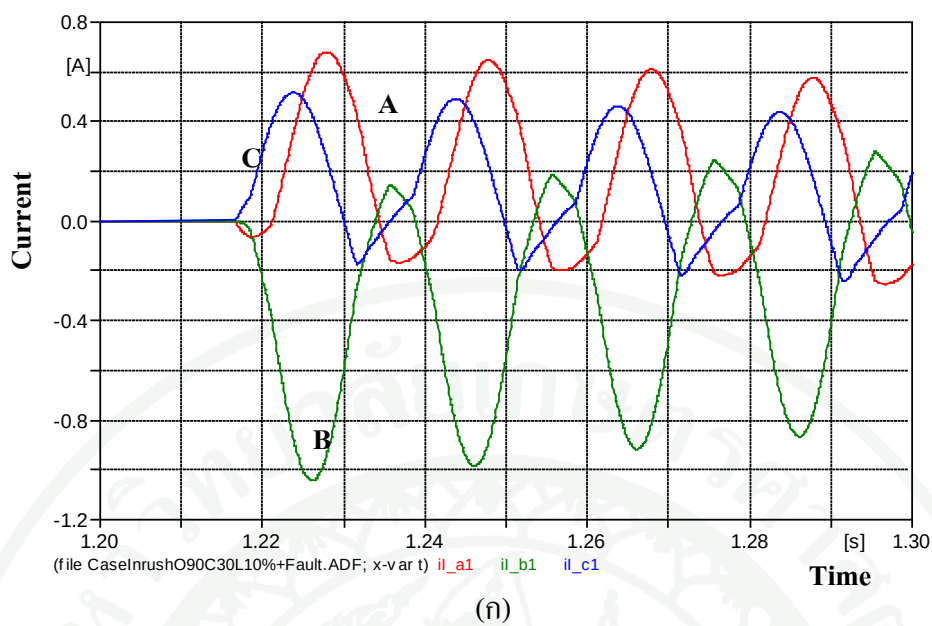


(ก)

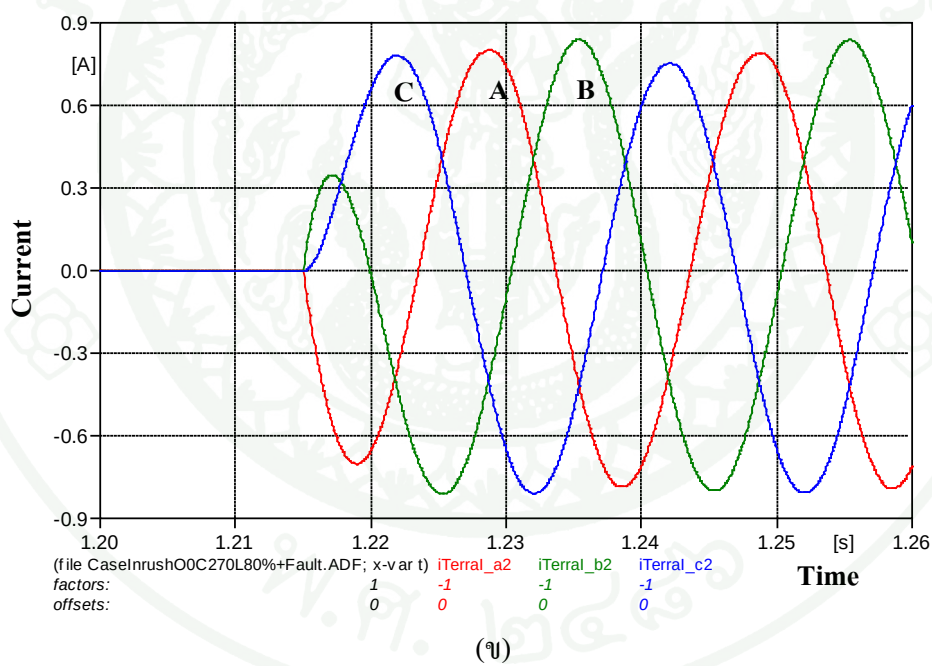
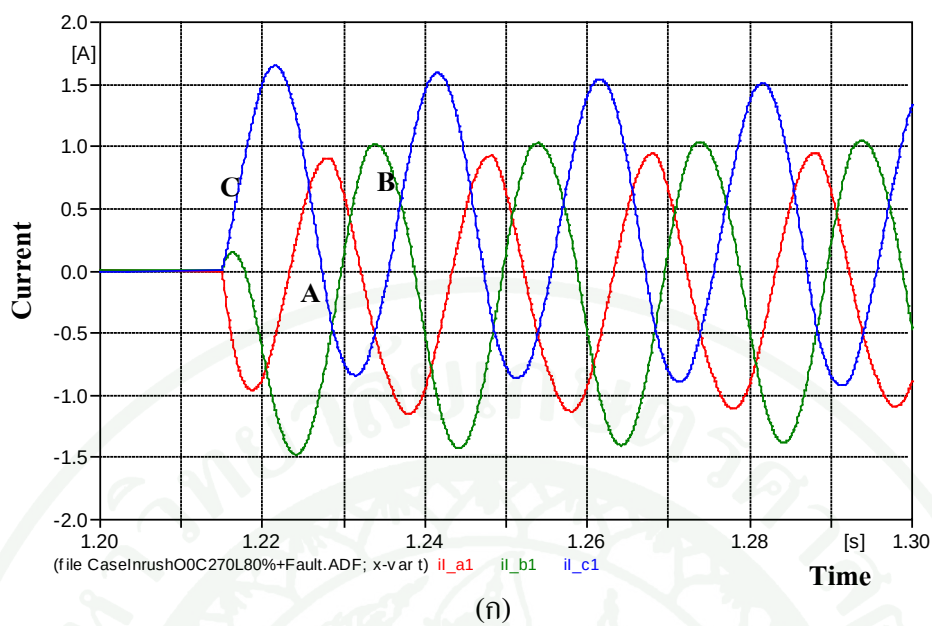


(ข)

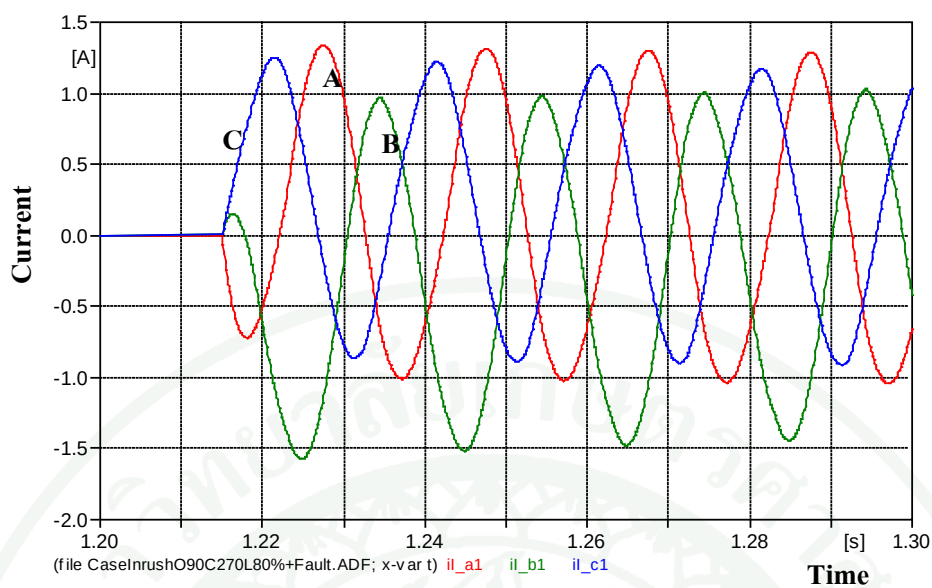
ภาพผนวกที่ ค7 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา OOC30L10



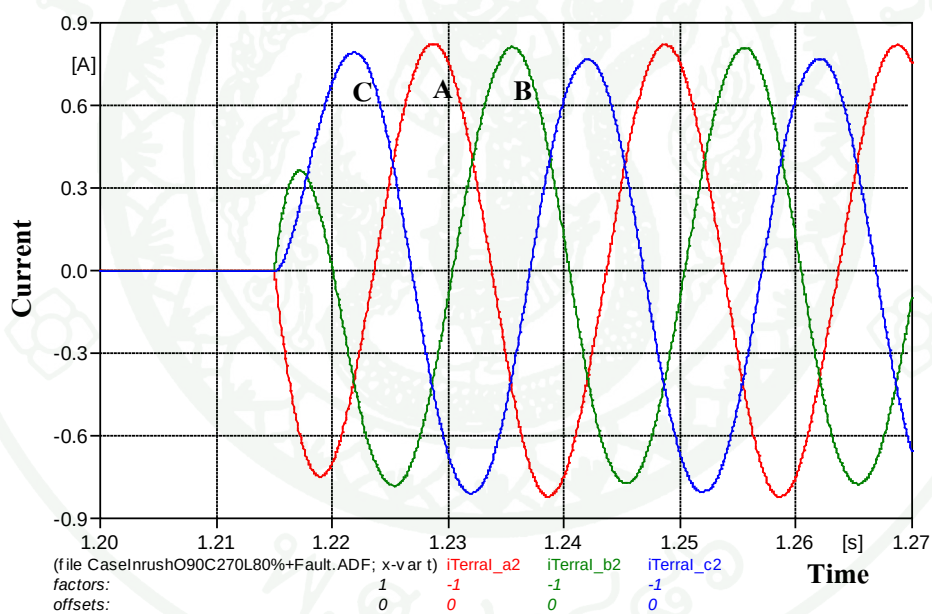
ภาพผนวกที่ ค8 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C30L10



ภาพผนวกที่ ค9 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O0C270L80

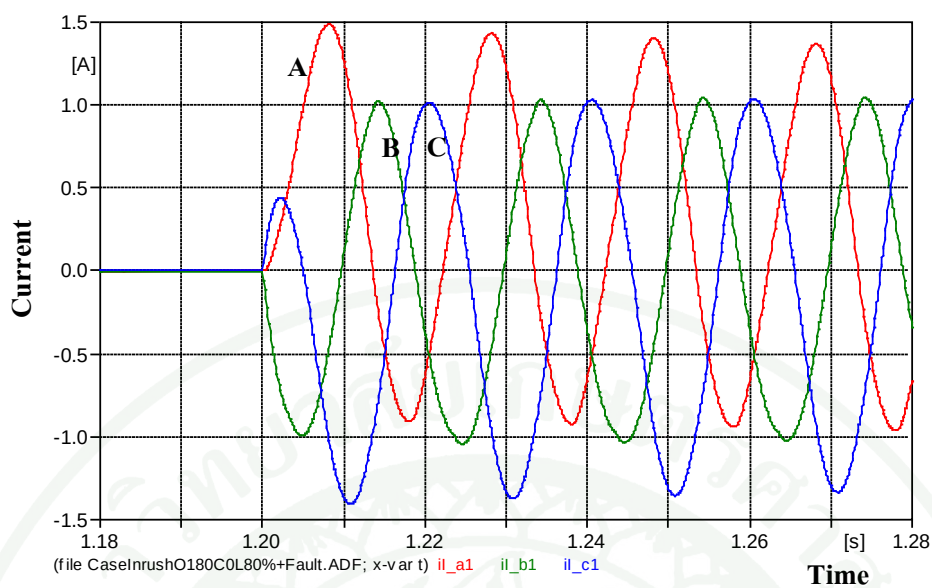


(ก)

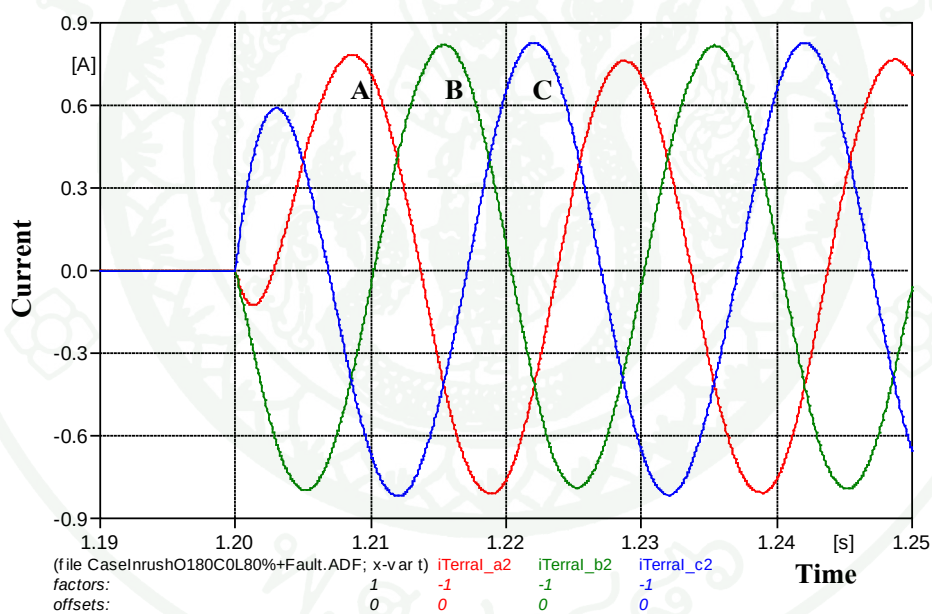


(ข)

ภาพผนวกที่ ค10 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C270L80

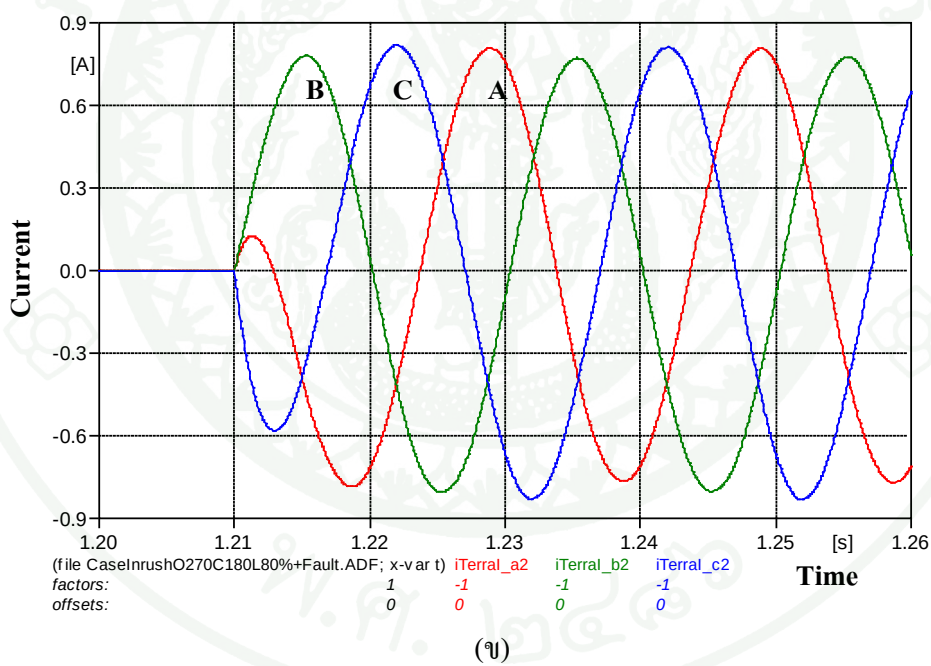
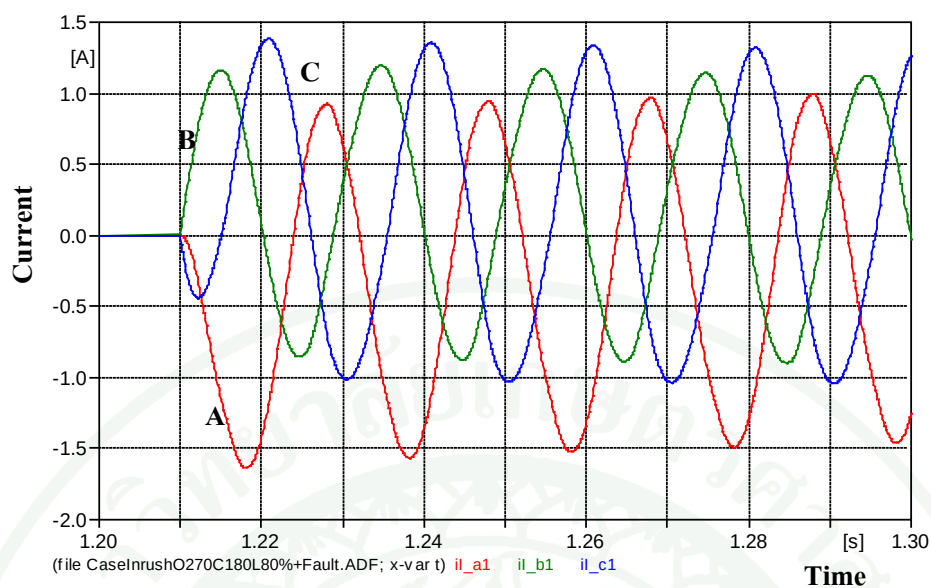


(ก)

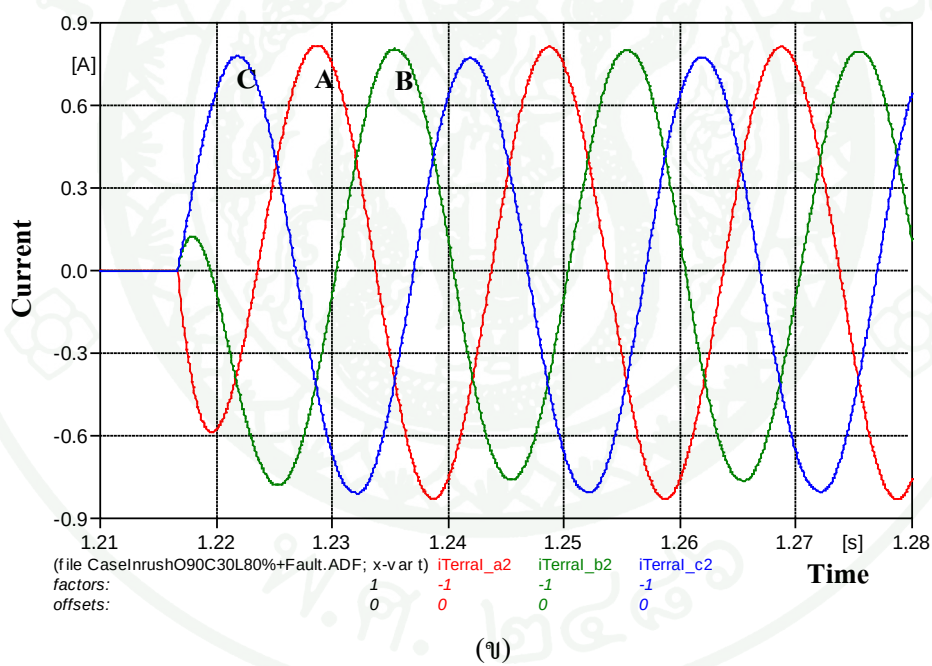
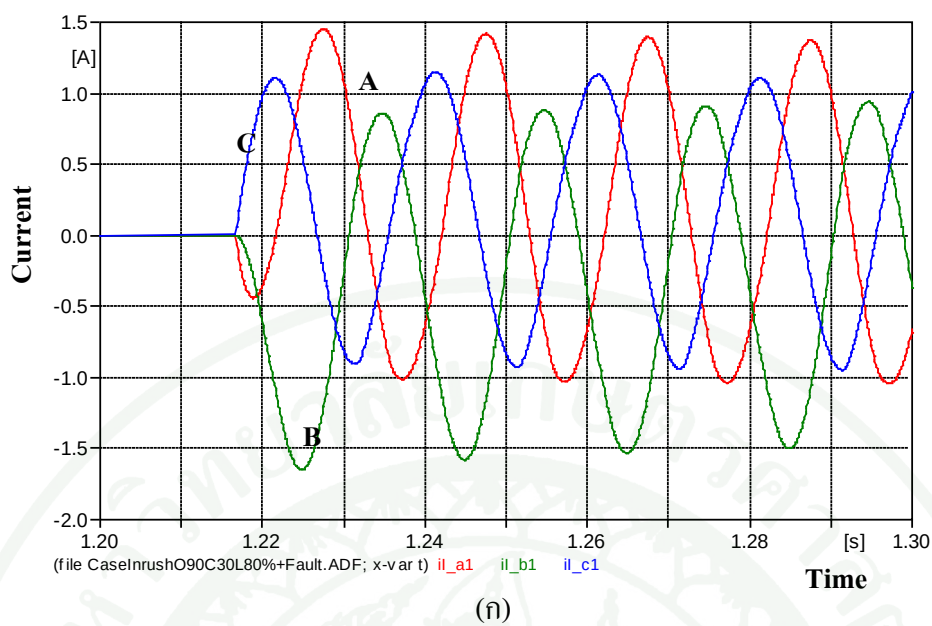


(ข)

ภาพผนวกที่ ค11 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O180COL80



ภาพผนวกที่ ค12 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O270C180L80

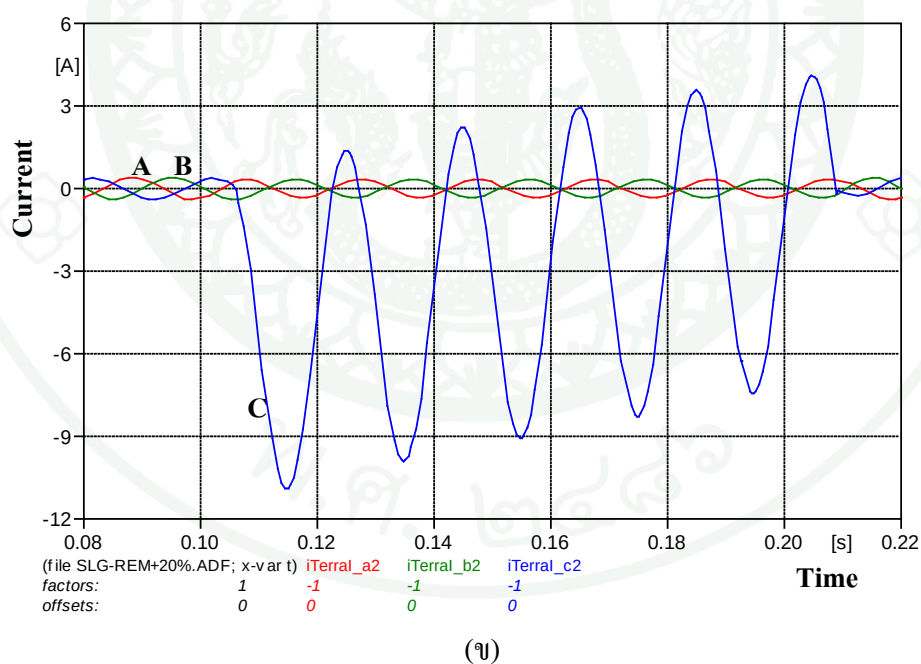
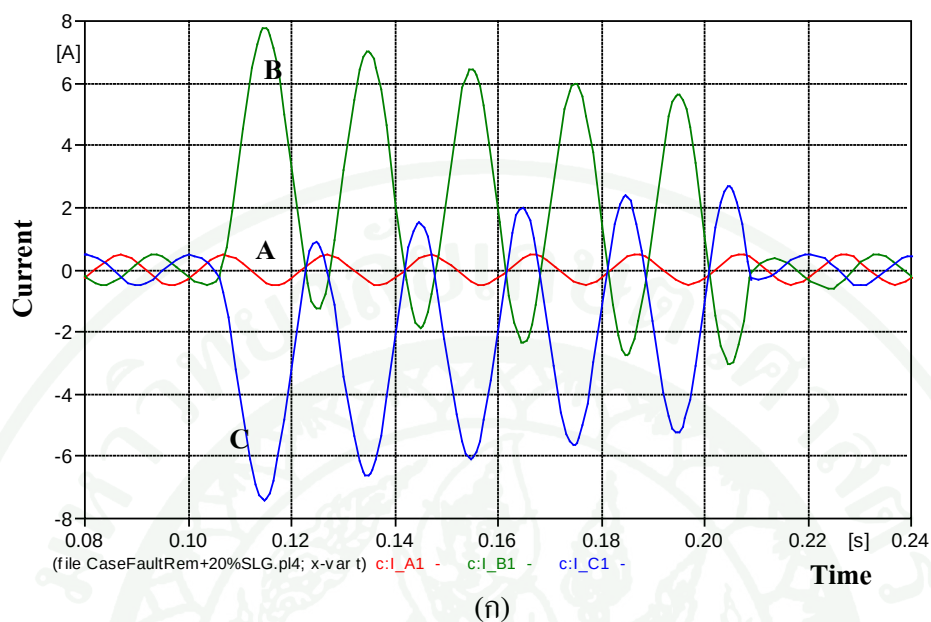


ภาพผนวกที่ ค13 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา O90C30L80

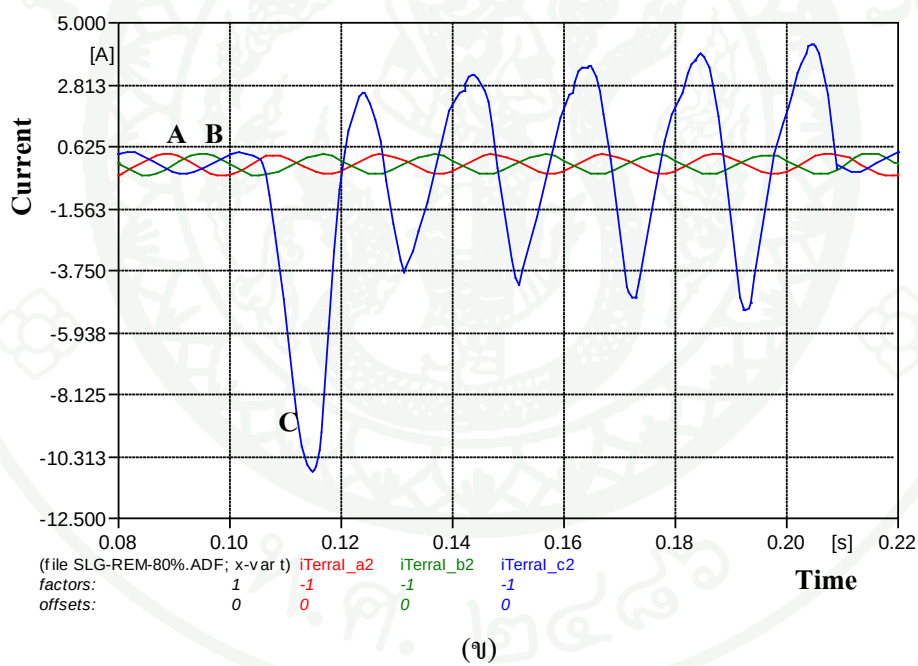
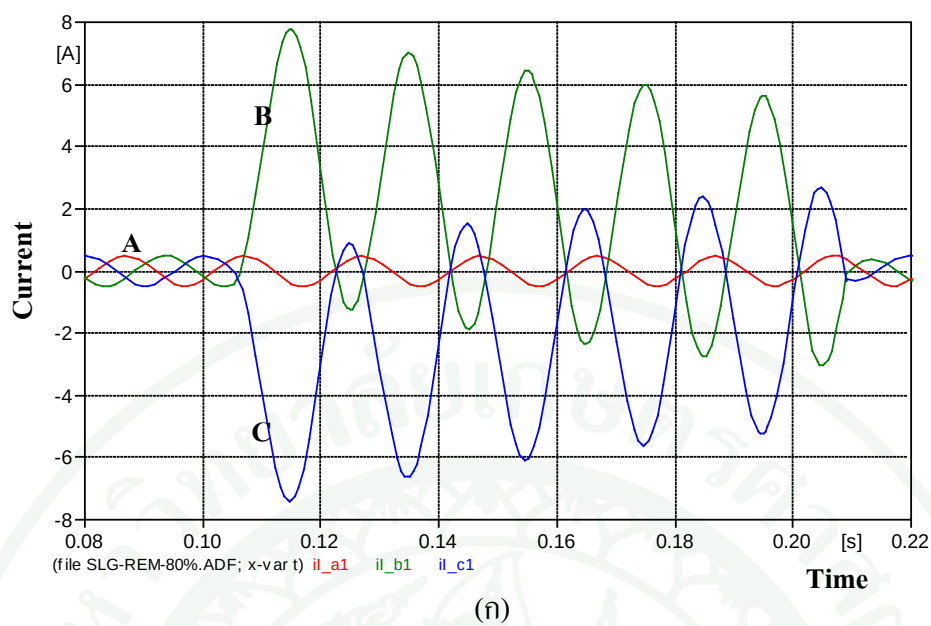


พฤติกรรมตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแส
เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง
(กรณีศึกษากลุ่ม B)

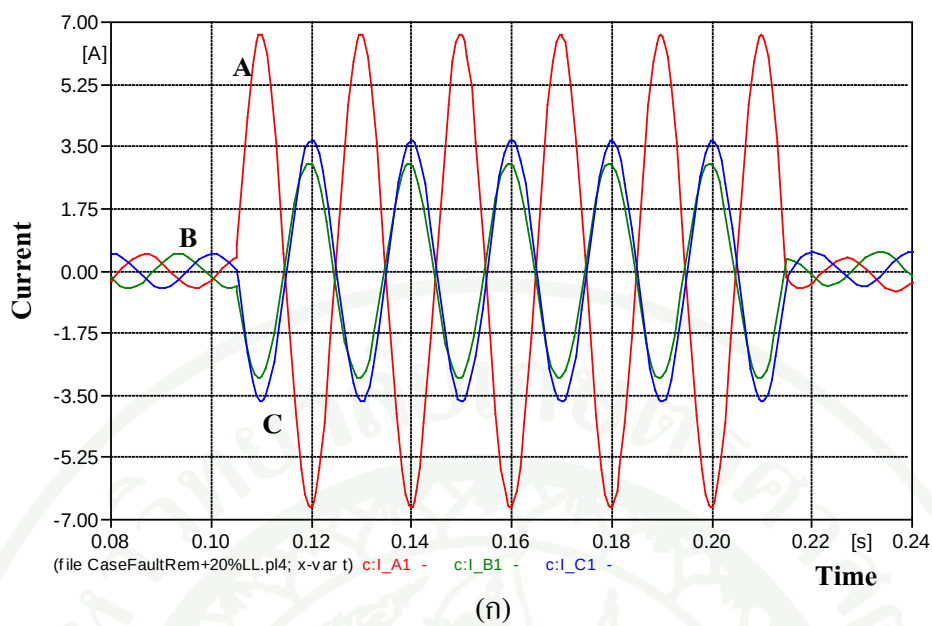
พฤติกรรมตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแสเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง



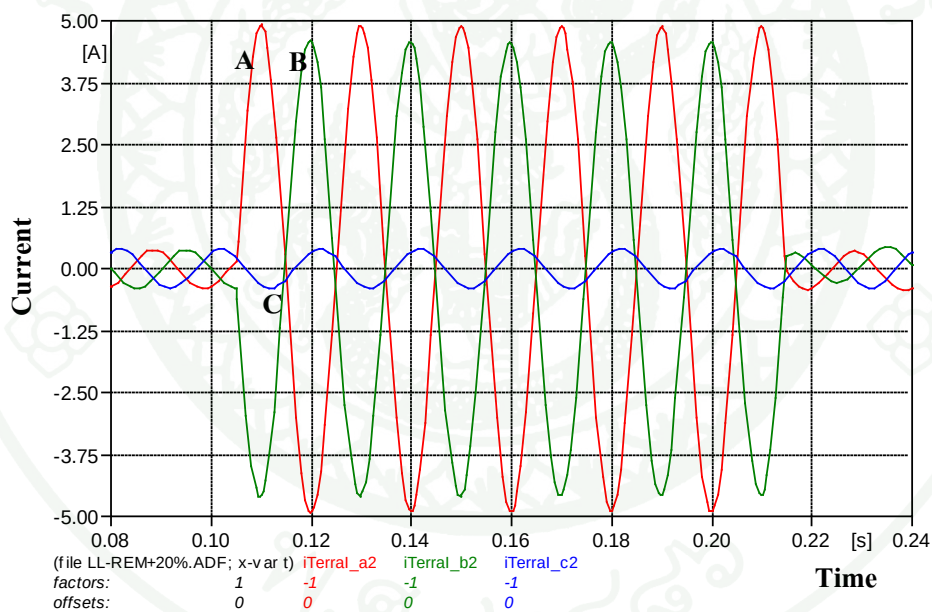
ภาพผนวกที่ ค14 พฤติกรรมตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF1



ภาพผนวกที่ ค15 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R80NF1

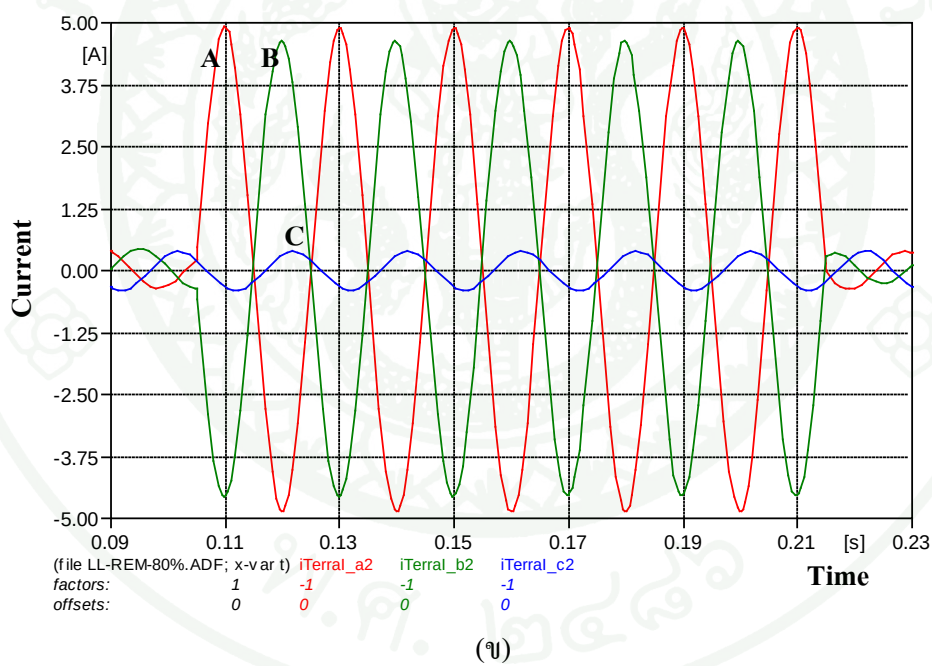
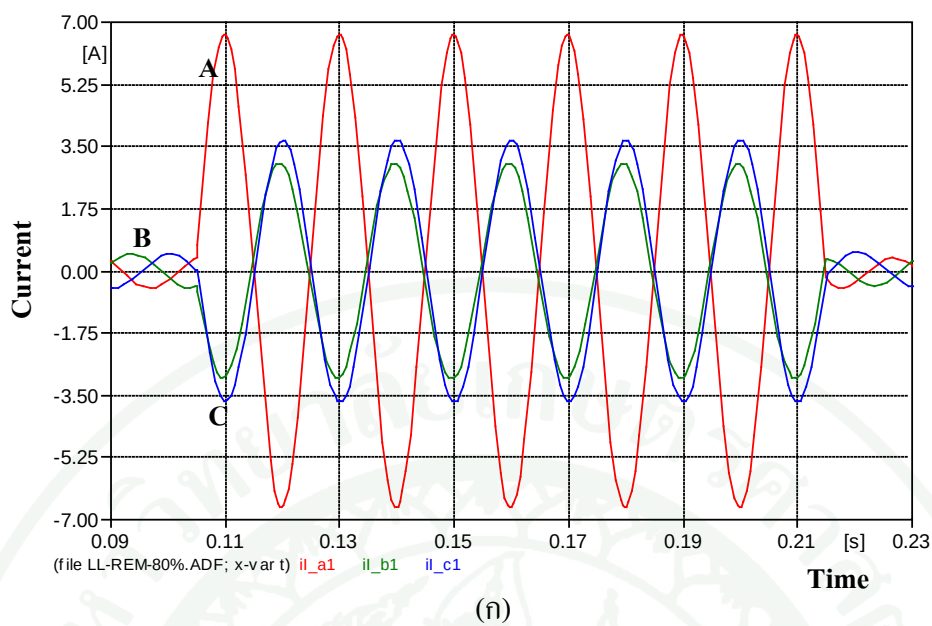


(ก)

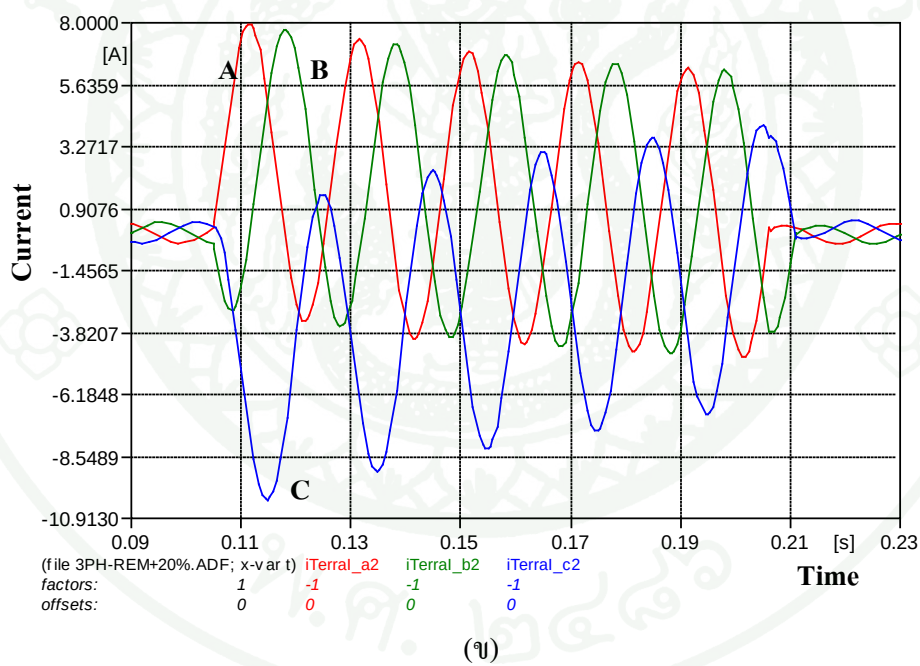
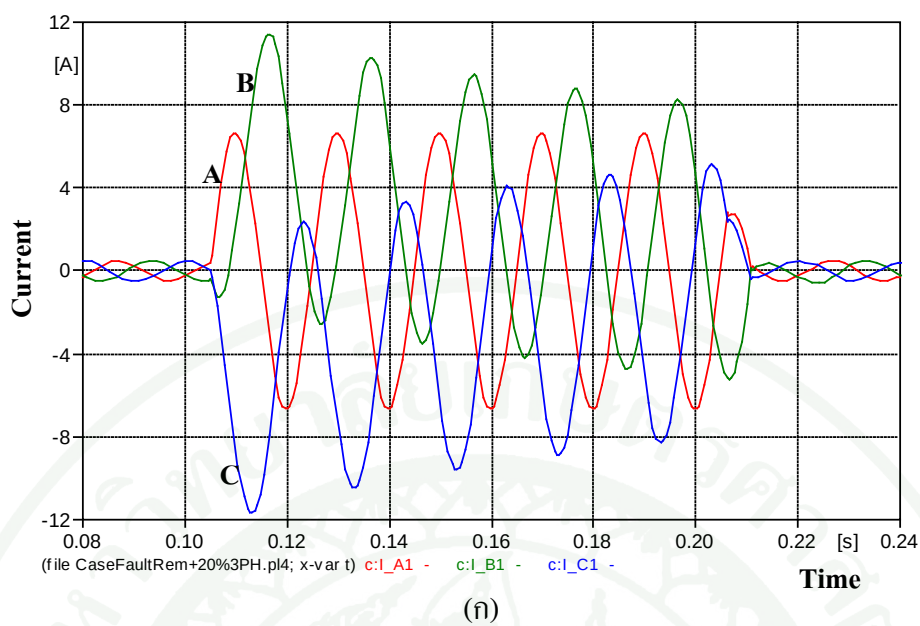


(ข)

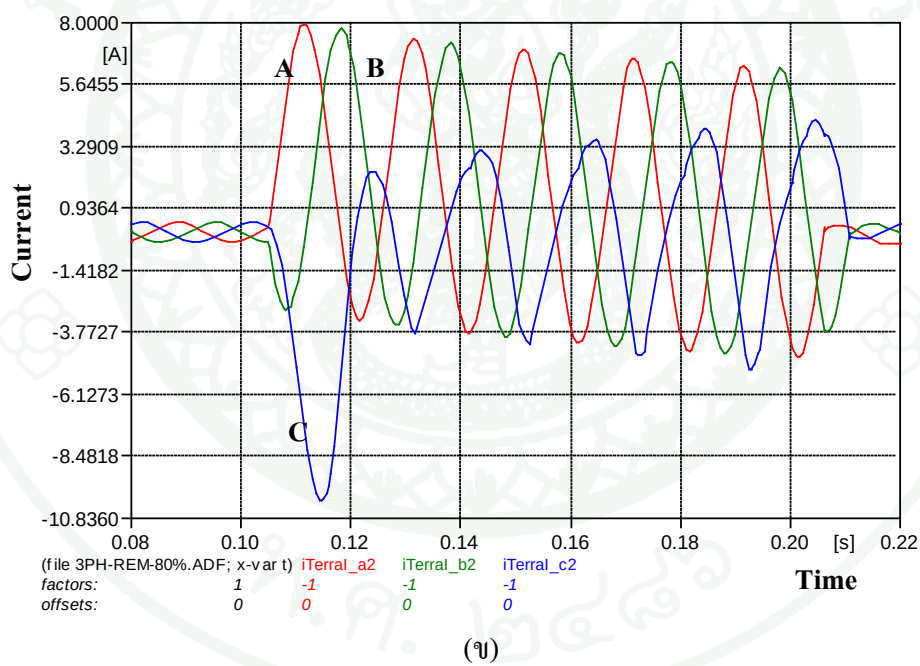
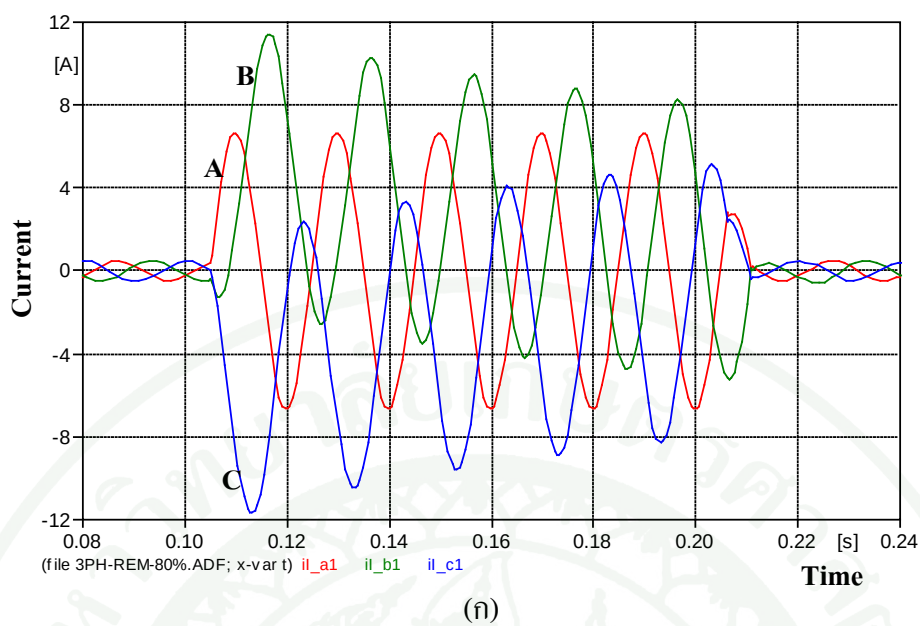
ภาพผนวกที่ ค16 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF2



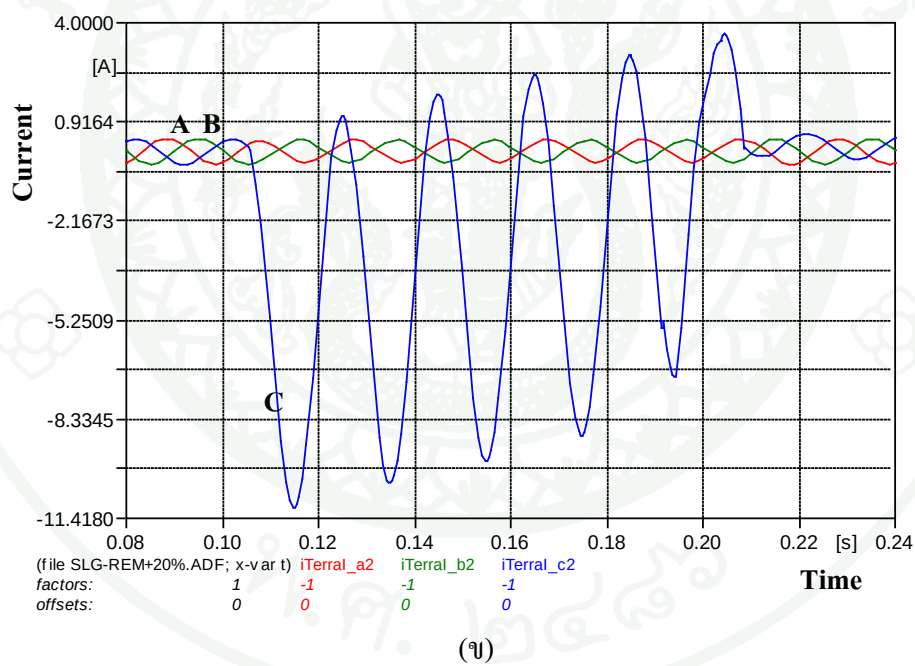
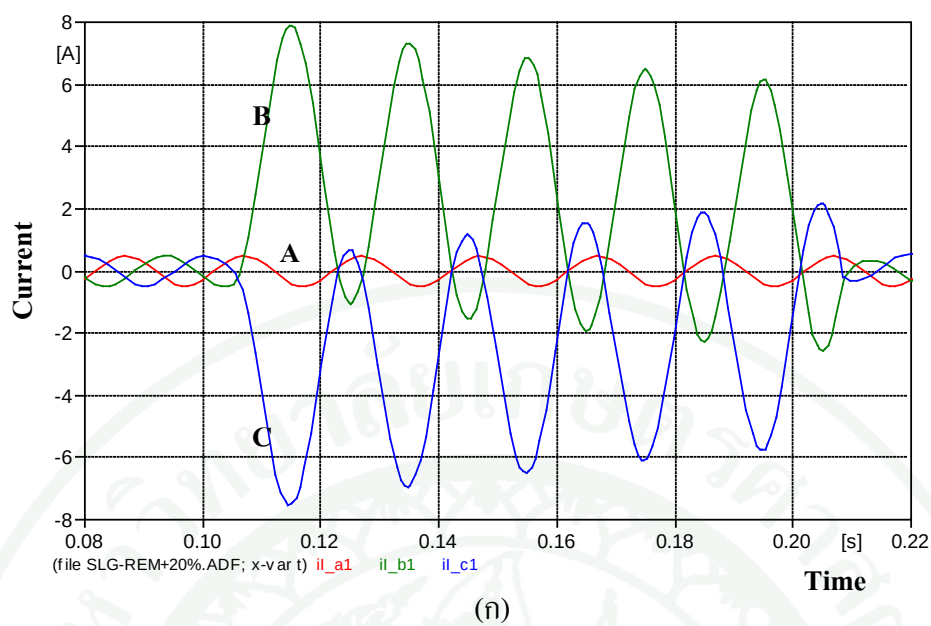
ภาพผนวกที่ ค17 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R80NF2



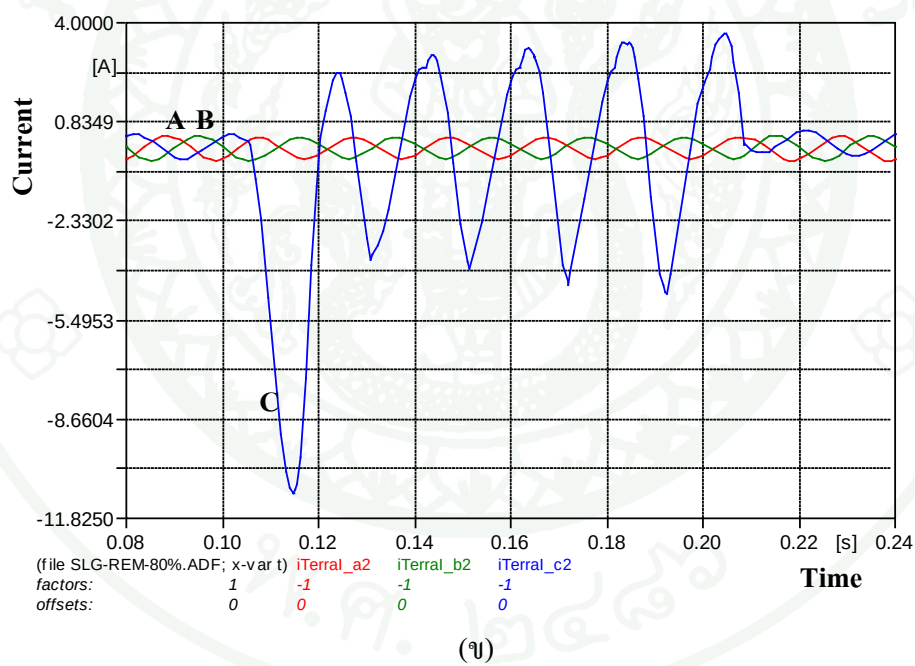
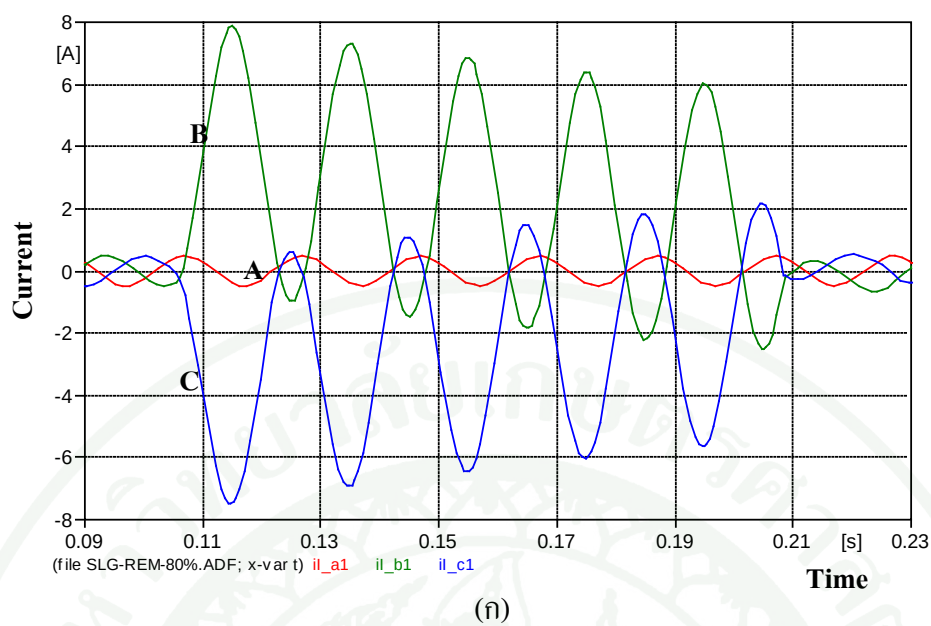
ภาพผนวกที่ ค18 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R20PF3



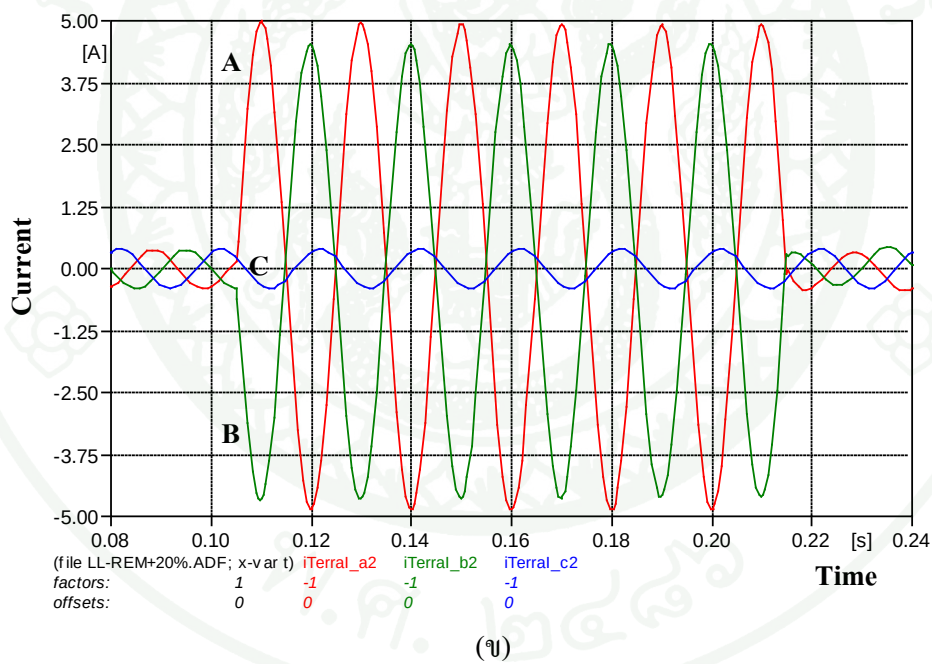
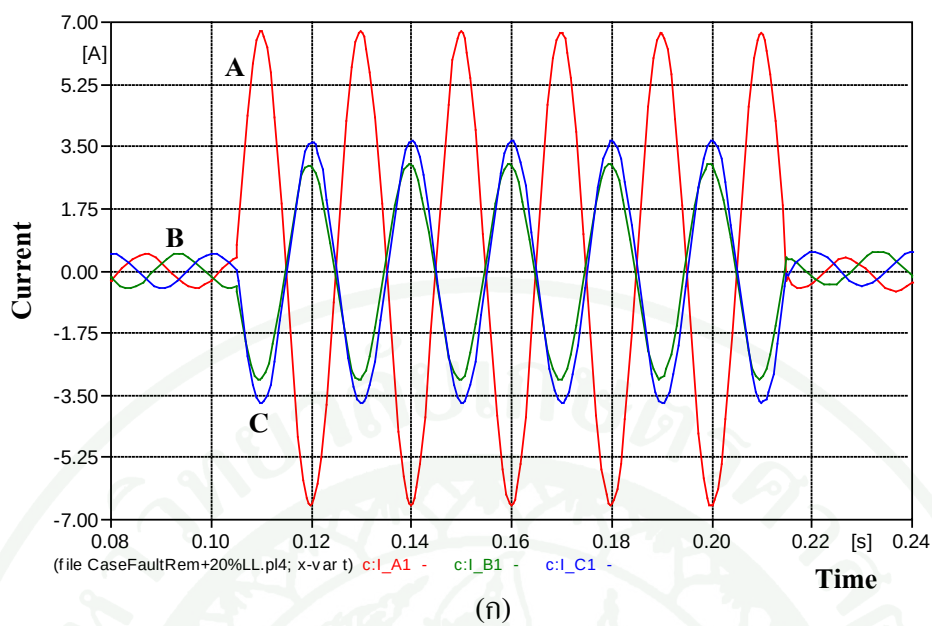
ภาพผนวกที่ ค19 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B1R80NF3



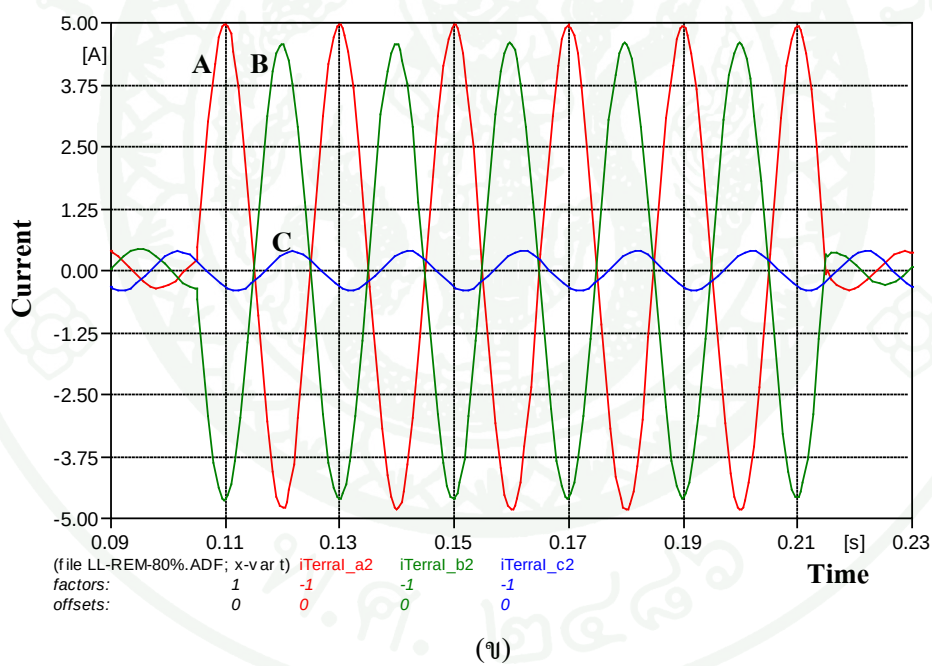
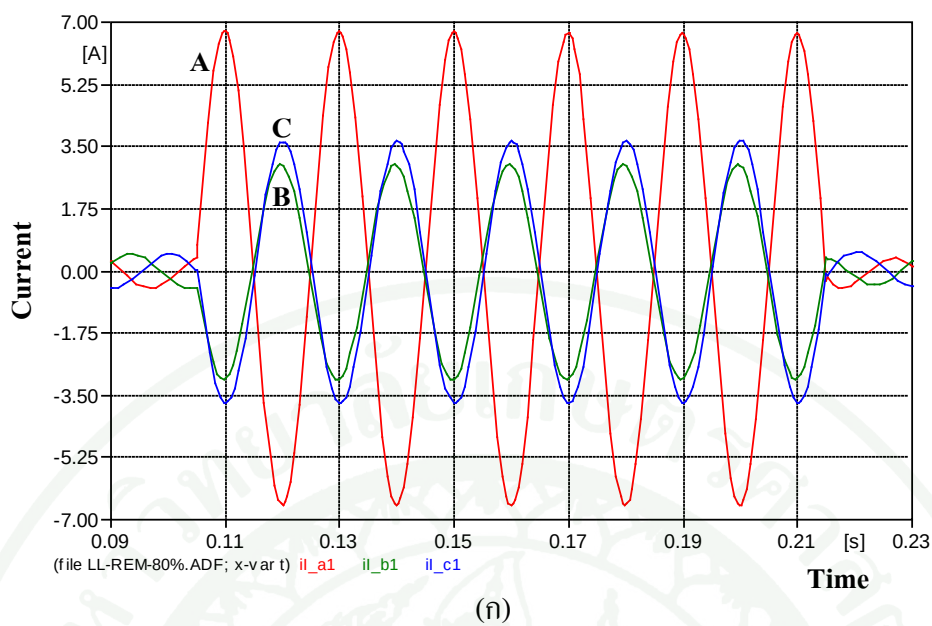
ภาพผนวกที่ ค20 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R20PF1



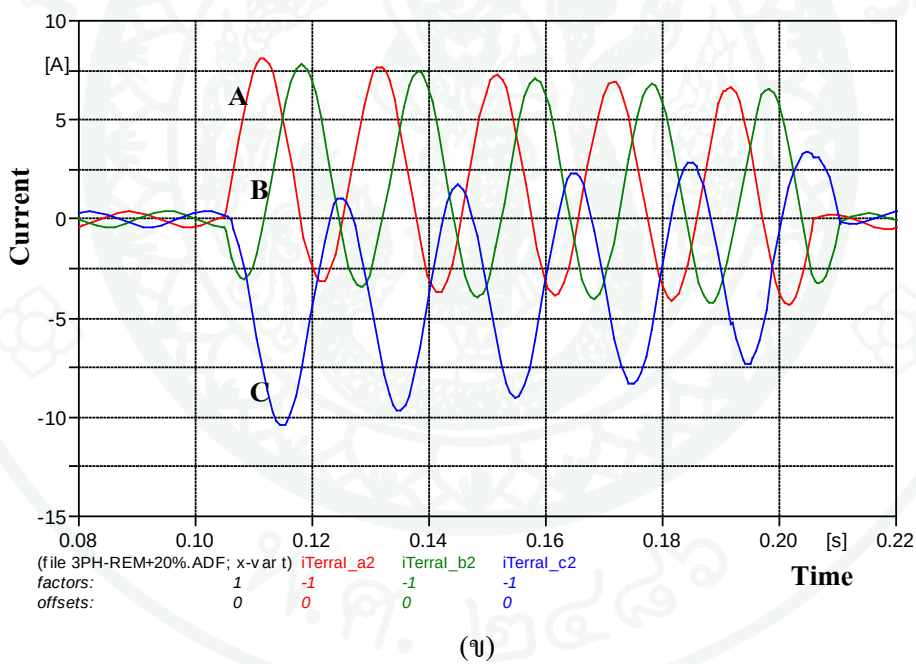
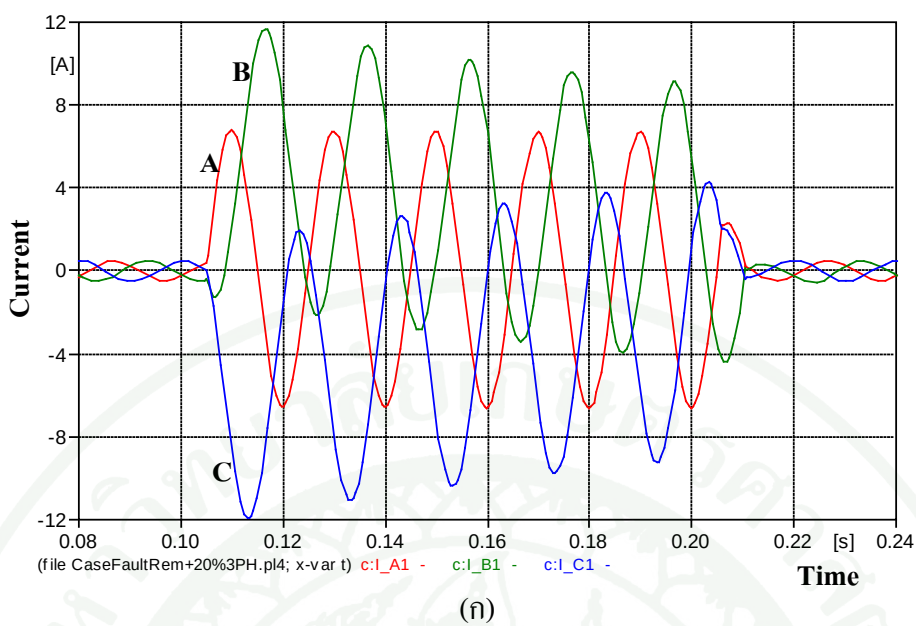
ภาพผนวกที่ ค21 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R80NF1



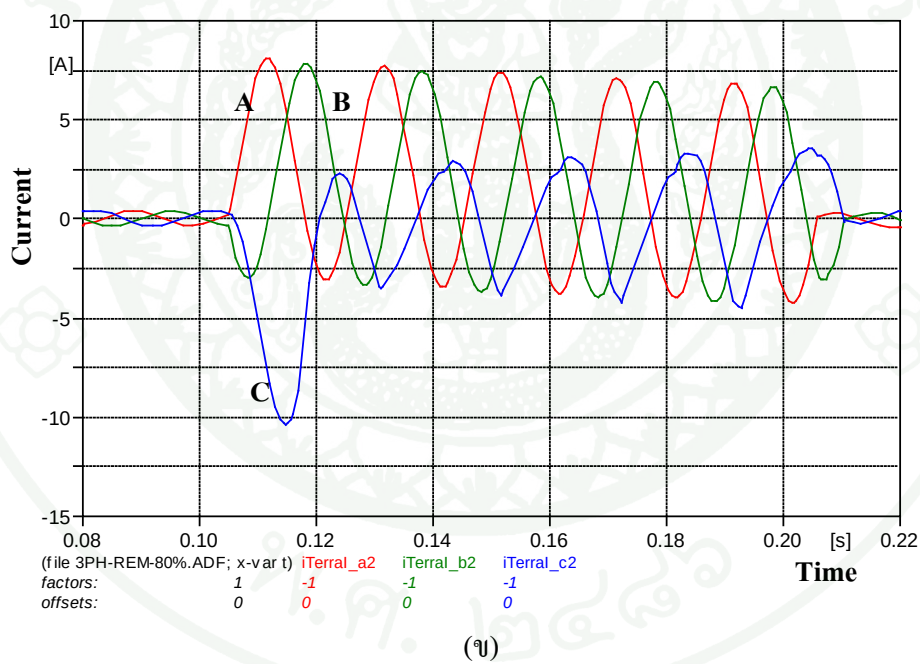
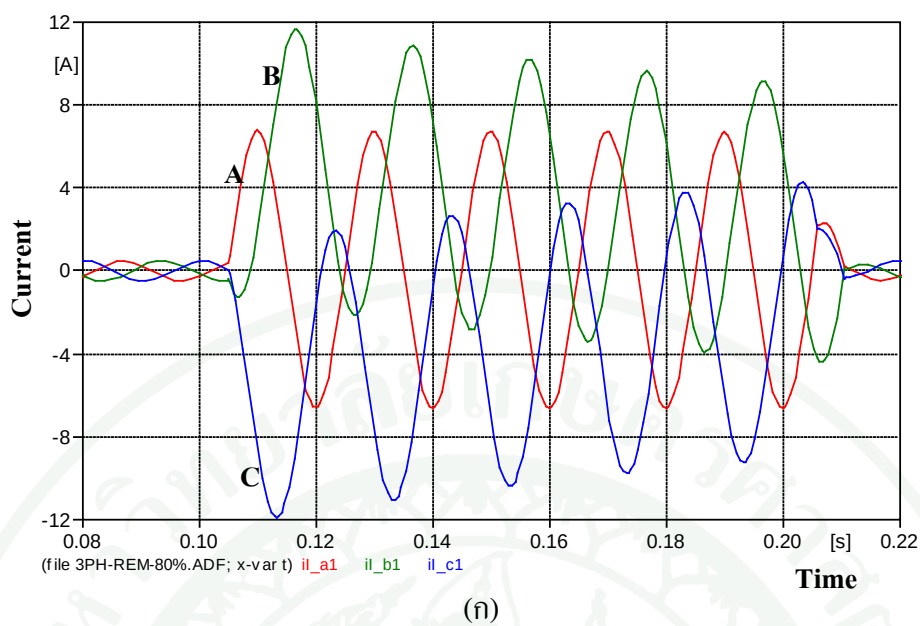
ภาพผนวกที่ ค22 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R20PF2



ภาพผนวกที่ ค23 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R80NF2

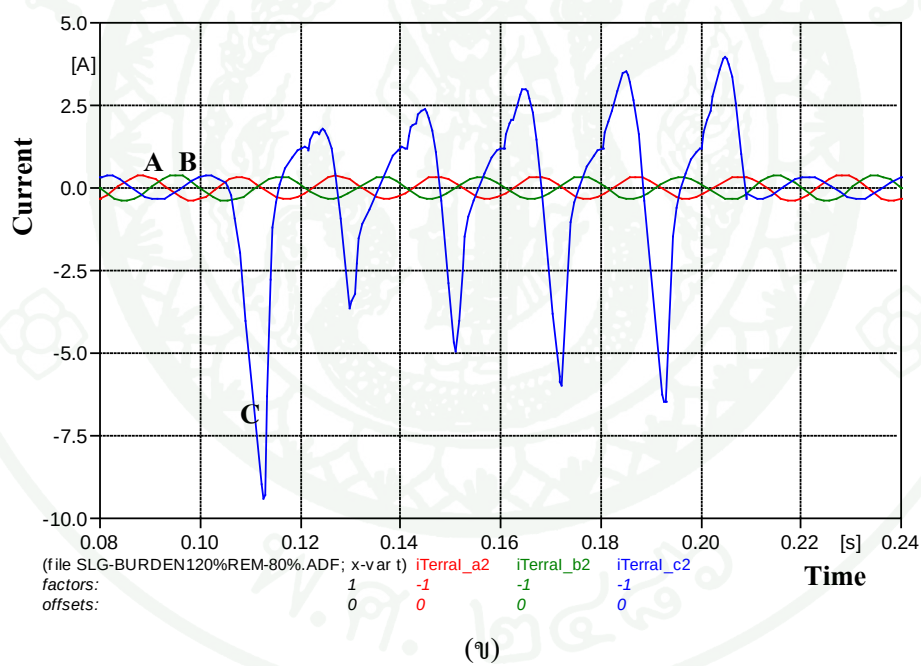
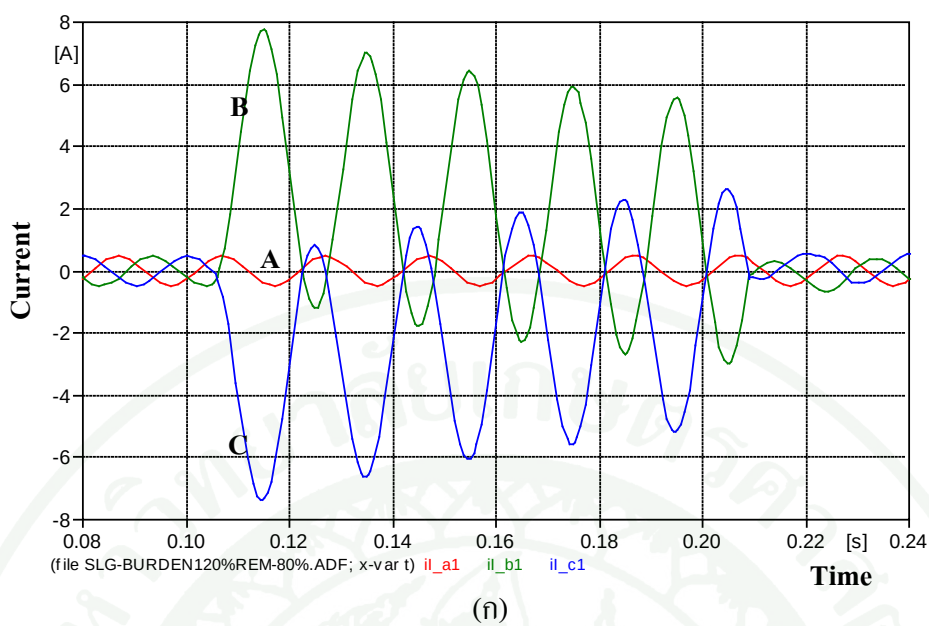


ภาพผนวกที่ ค24 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R20PF3

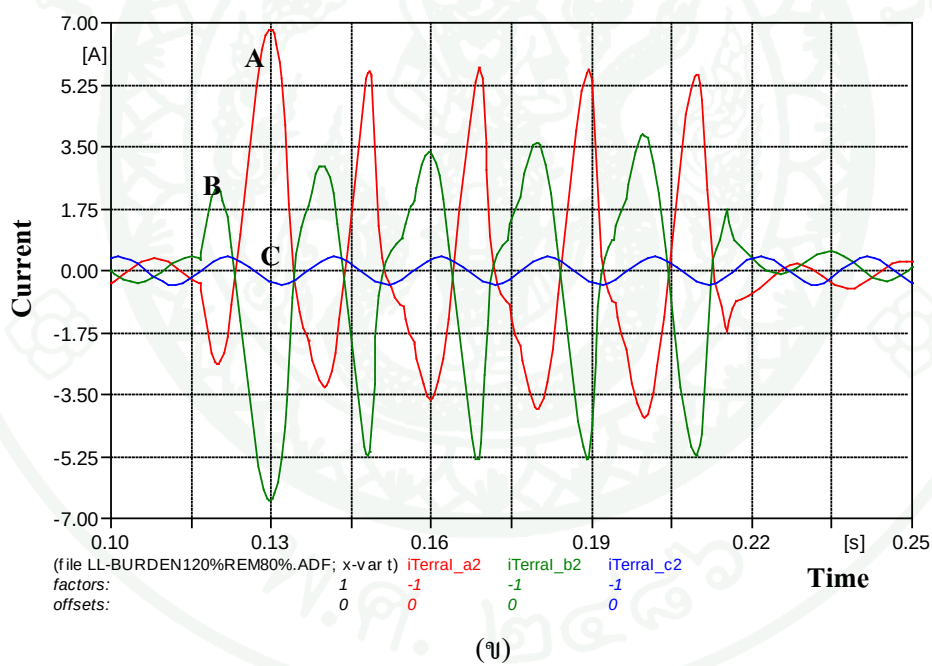
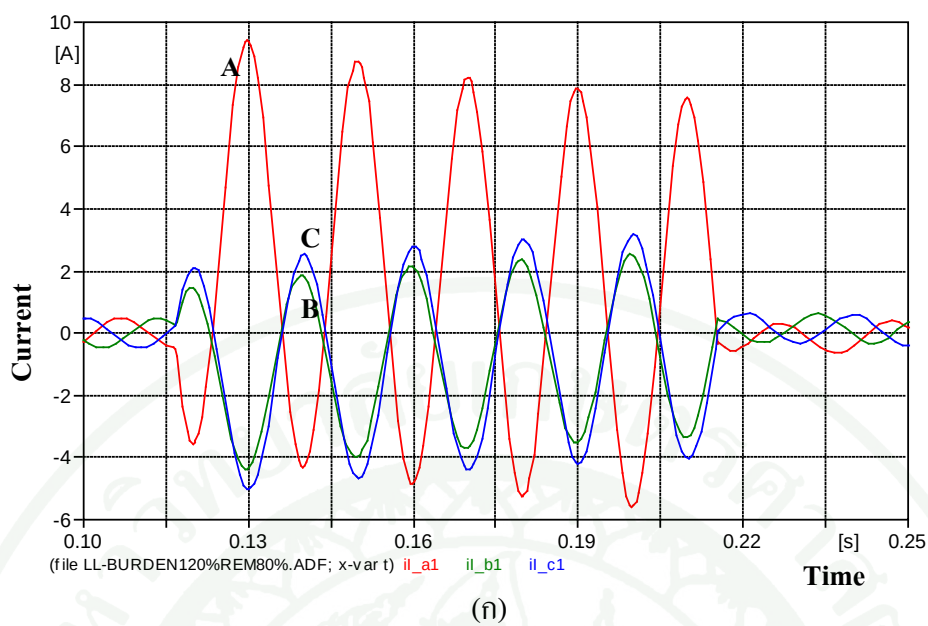


ภาพผนวกที่ ค25 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา B2R80NF3

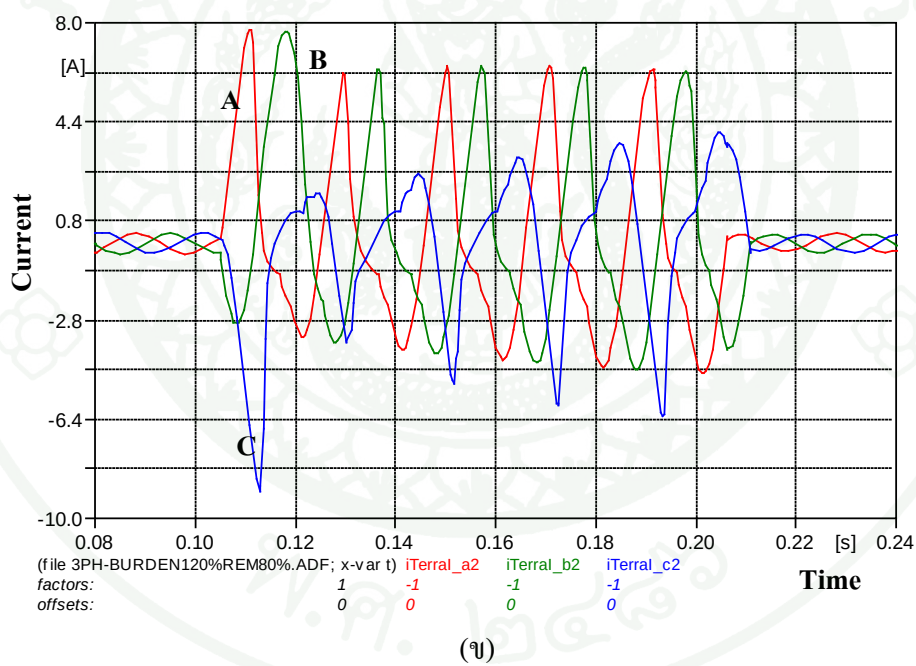
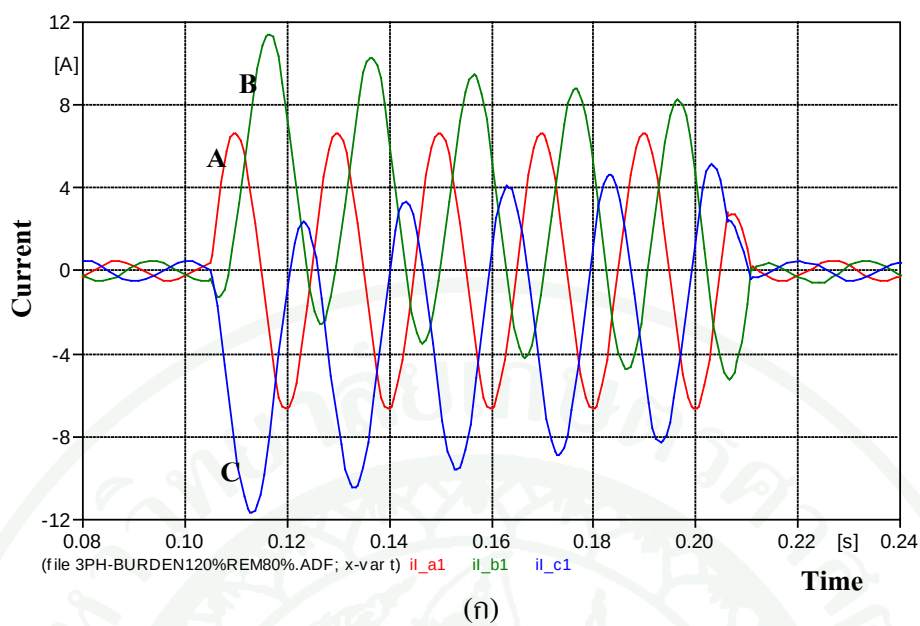
พฤติกรรมตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแสเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง
(กรณีศึกษากลุ่ม C)



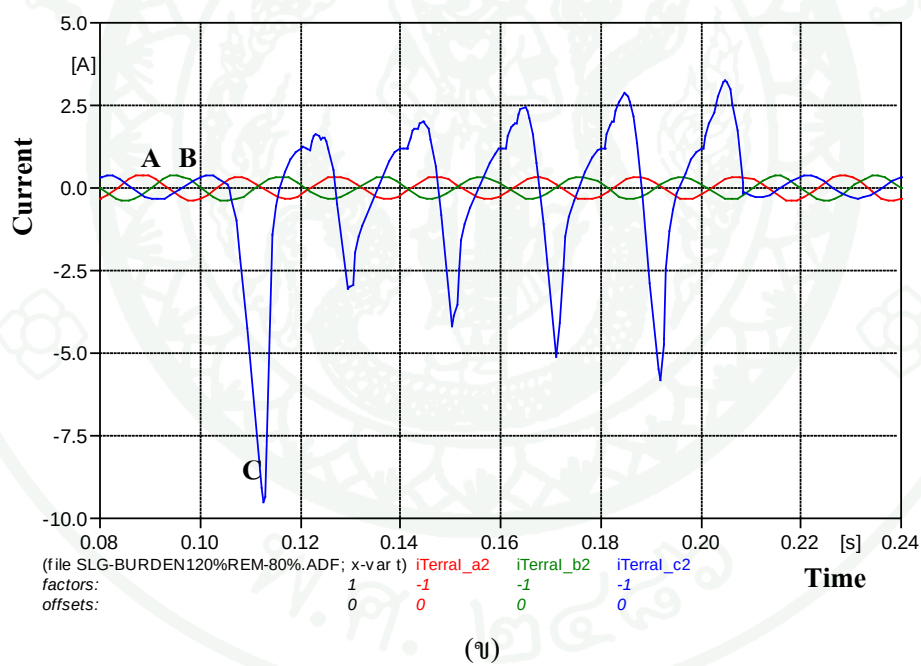
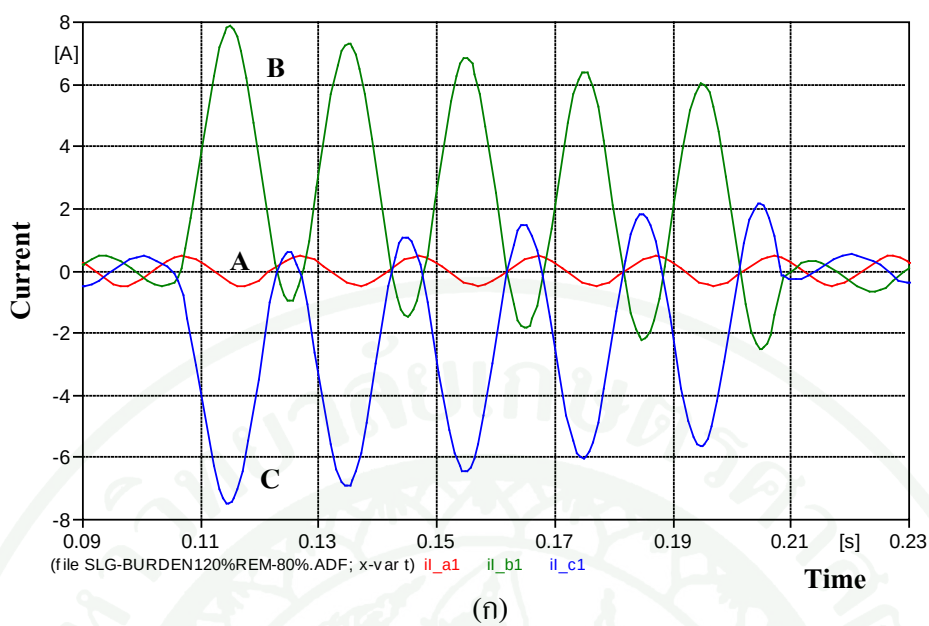
ภาพผนวกที่ ค26 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา C1R80B120F1



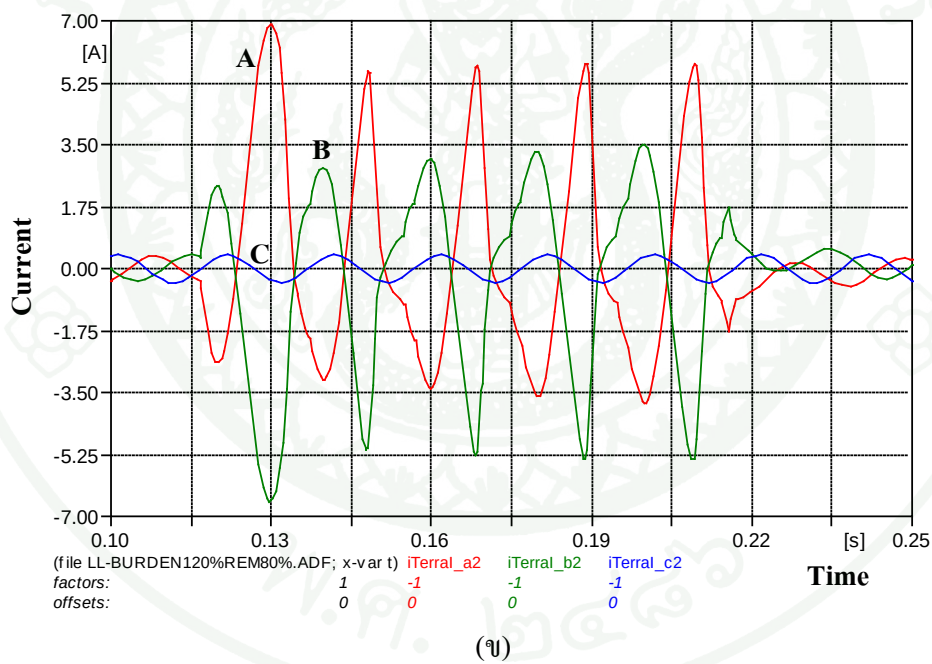
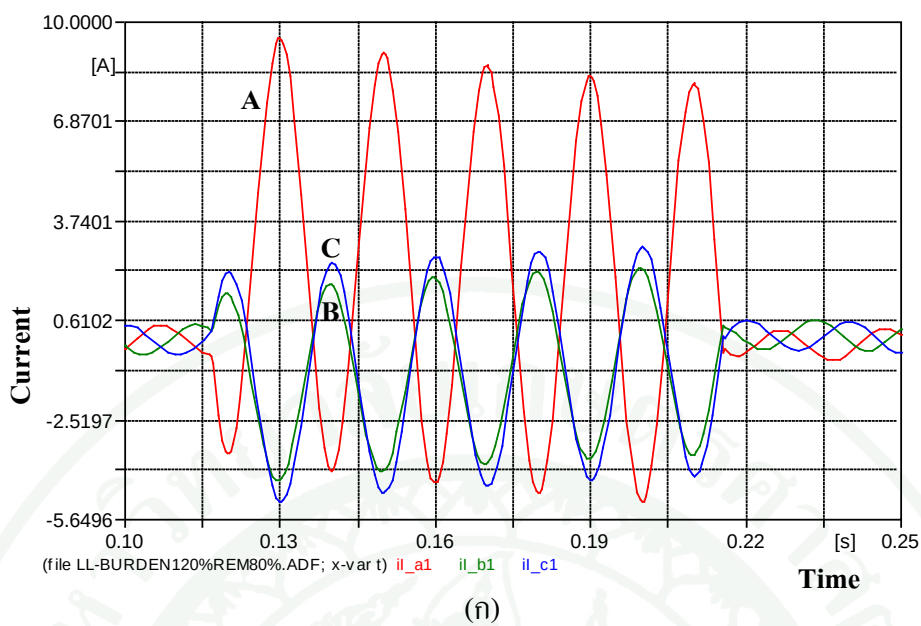
ภาพผนวกที่ ค27 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา C1R80B120F2



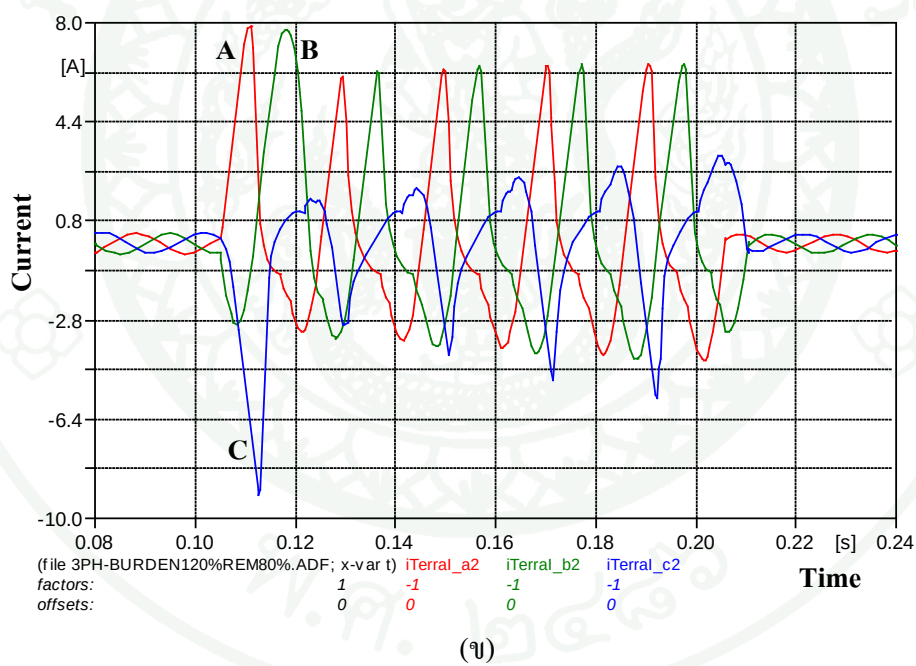
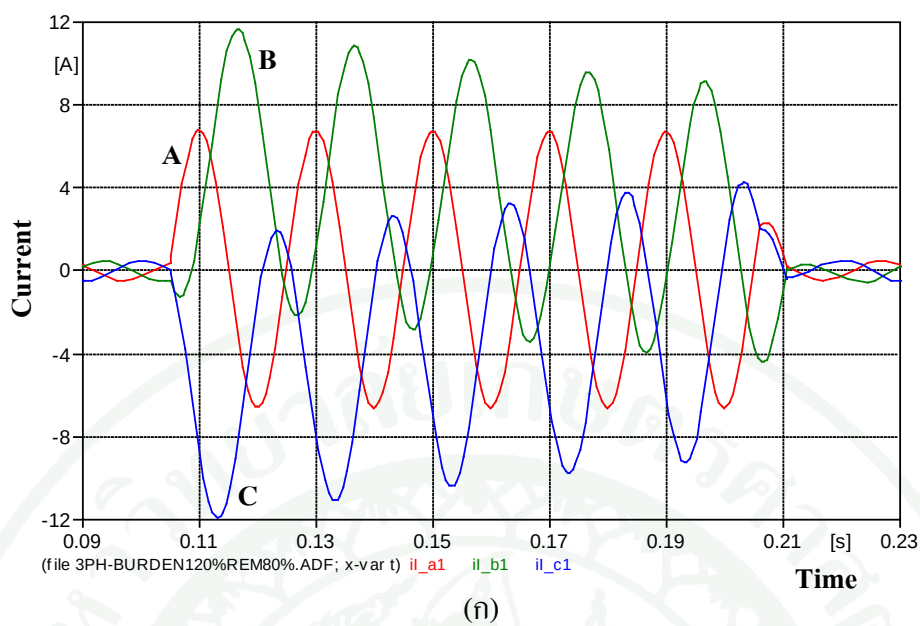
ภาพผนวกที่ ค28 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา C1R80B120F3



ภาพผนวกที่ ค29 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา C2R80B120F1

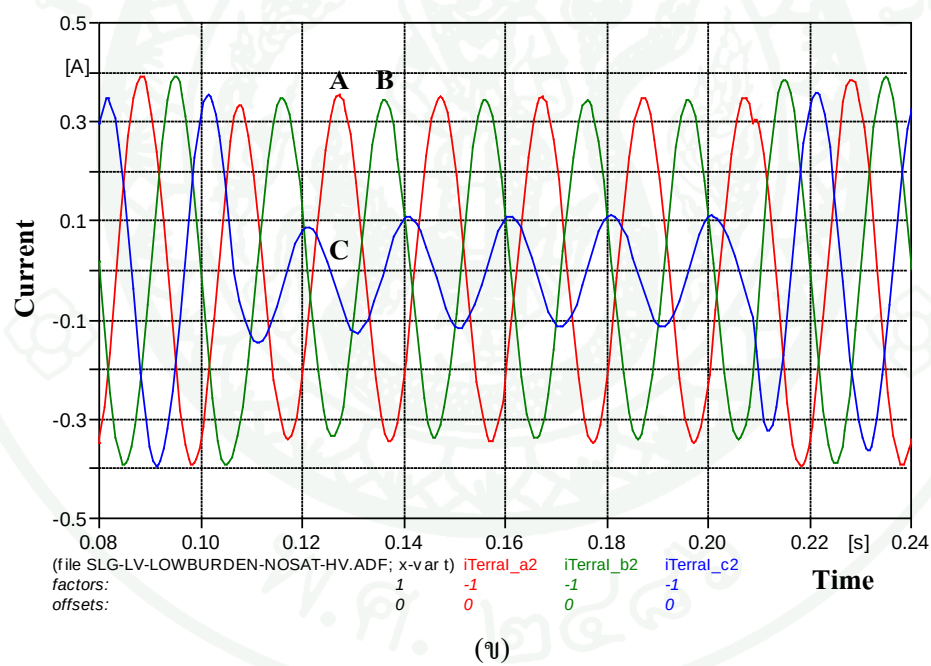
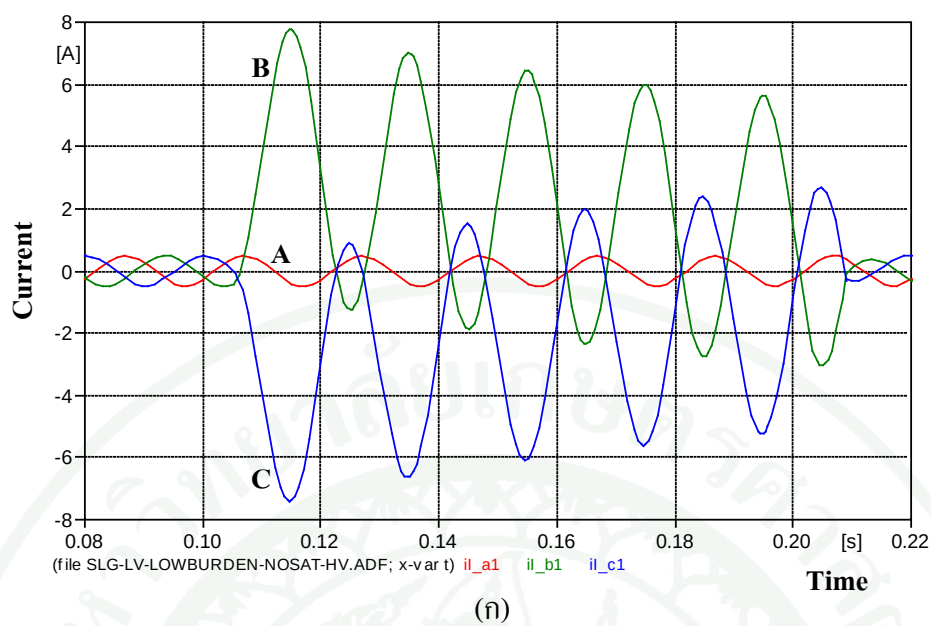


ภาพผนวกที่ ค30 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา C2R80B120F2

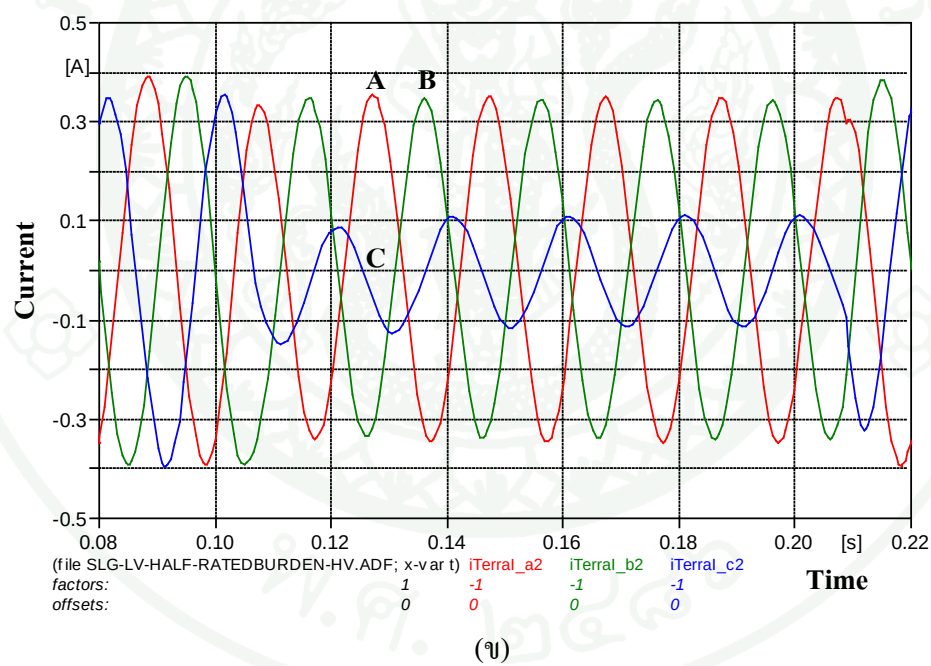
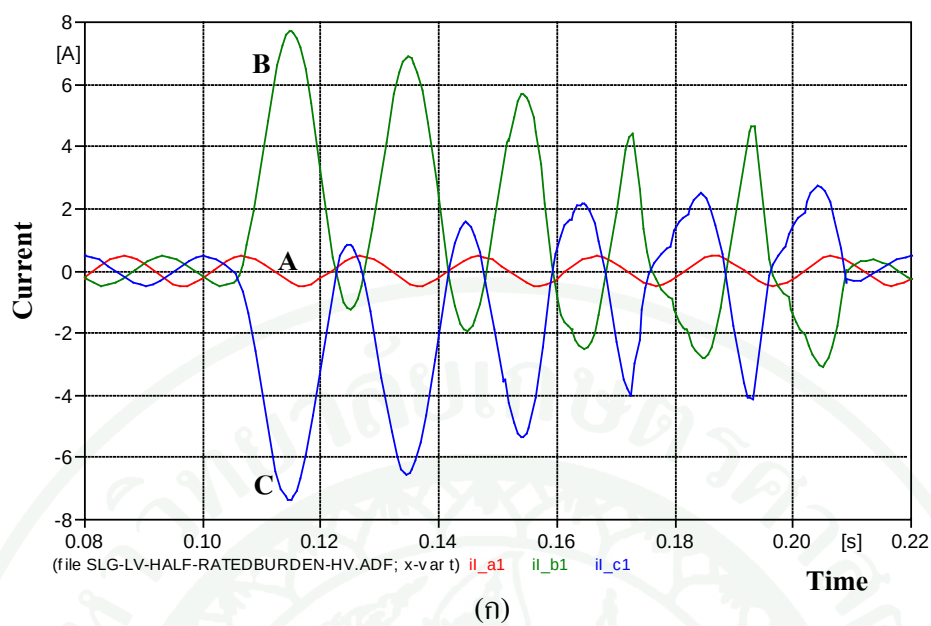


ภาพผนวกที่ ค31 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา C2R80B120F3

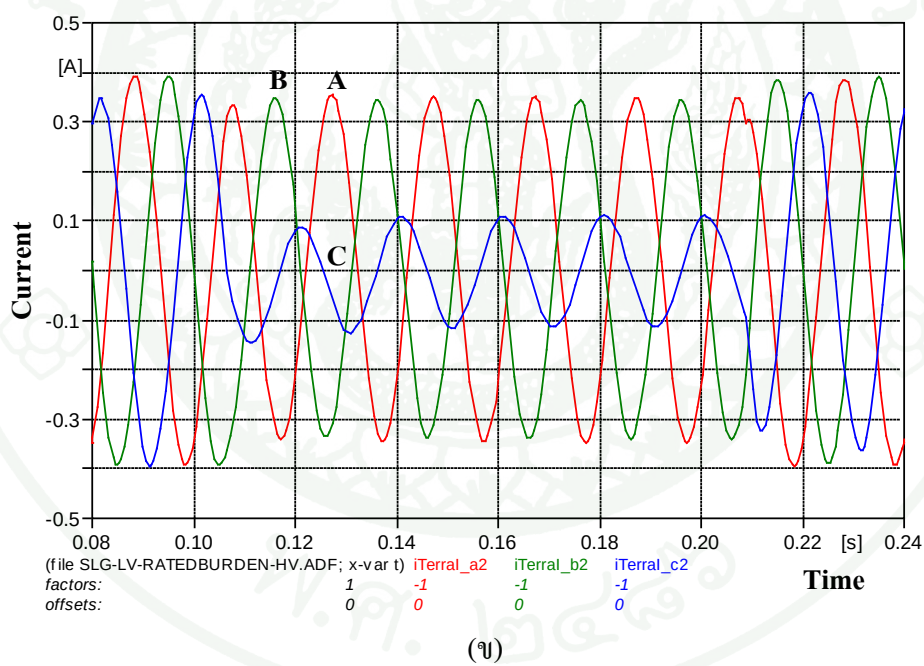
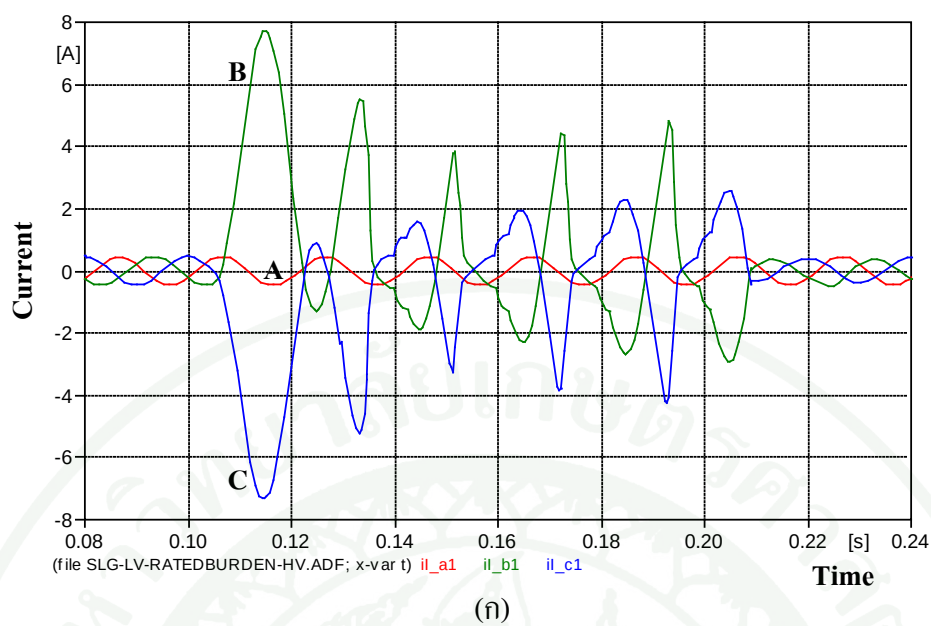
พฤติกรรมตอบสนองของหม้อแปลงทดกระแสเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง
(กรณีศึกษากลุ่ม D)



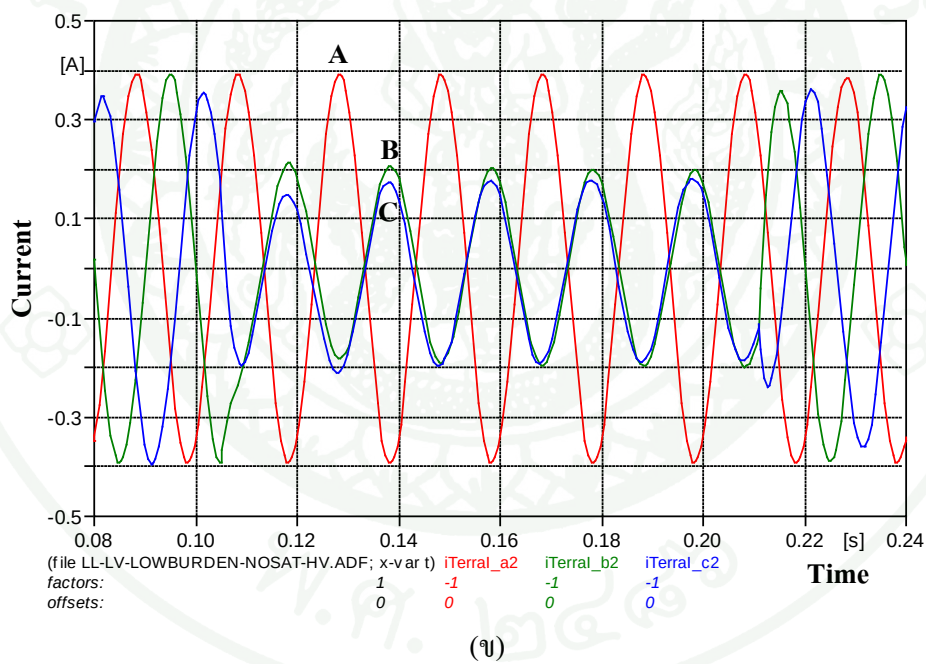
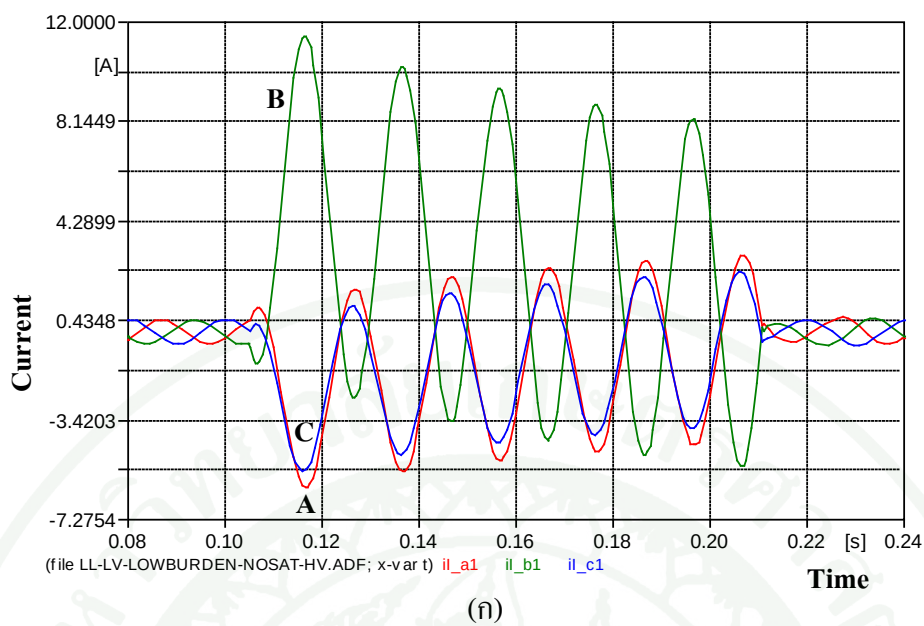
ภาพผนวกที่ ค32 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัย DB1F1



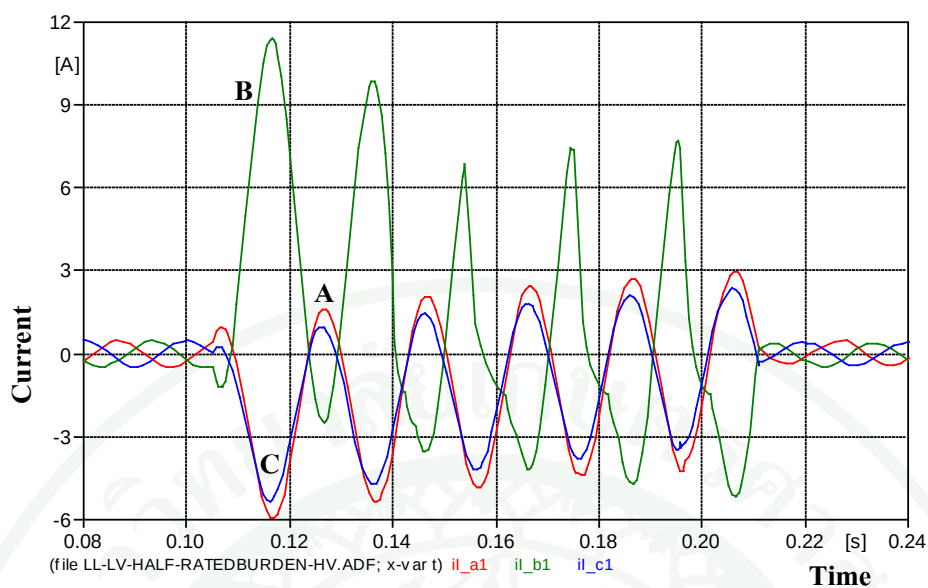
ภาพผนวกที่ ค33 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB2F1



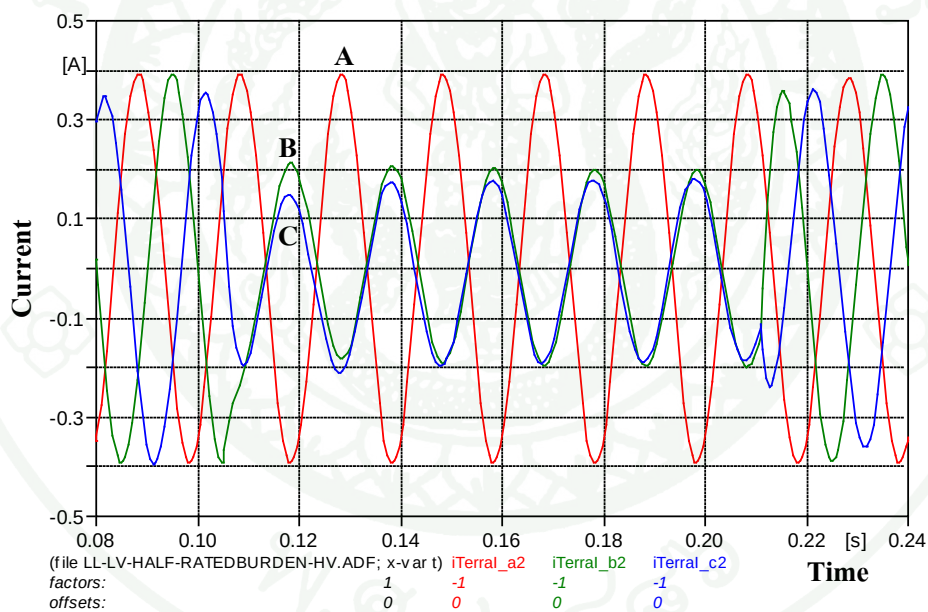
ภาพผนวกที่ ค34 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB3F1



ภาพผนวกที่ ค35 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB1F2

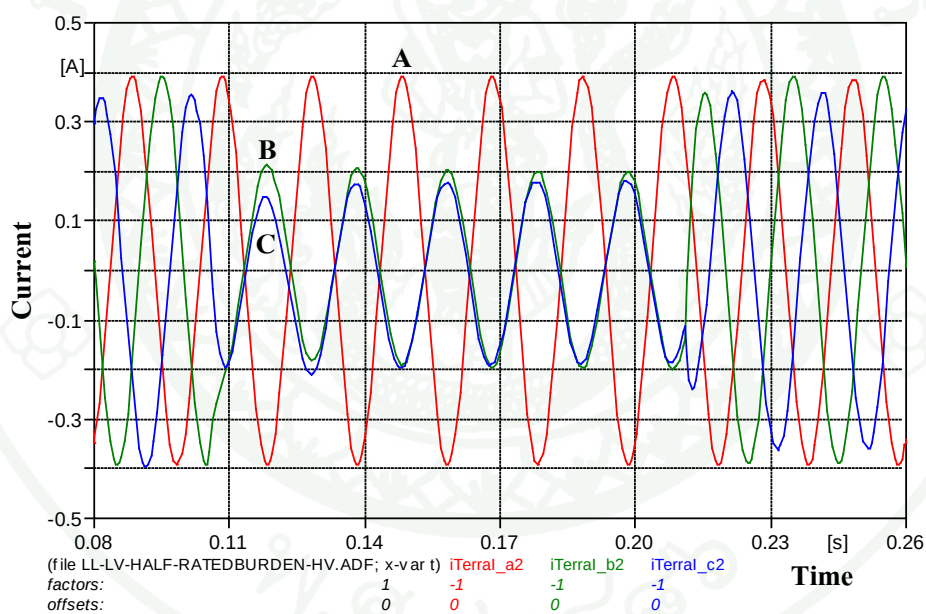
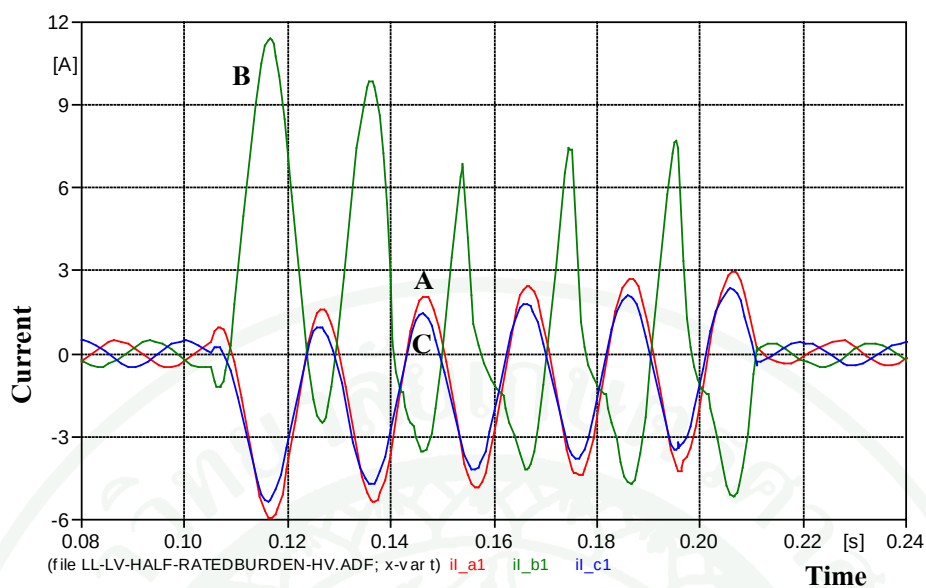


(ก)

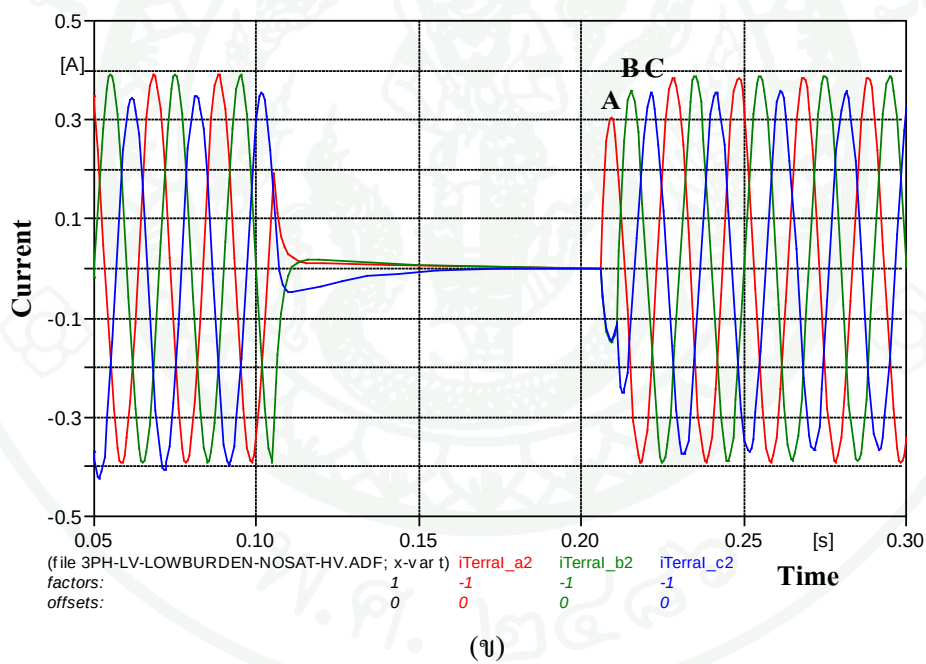
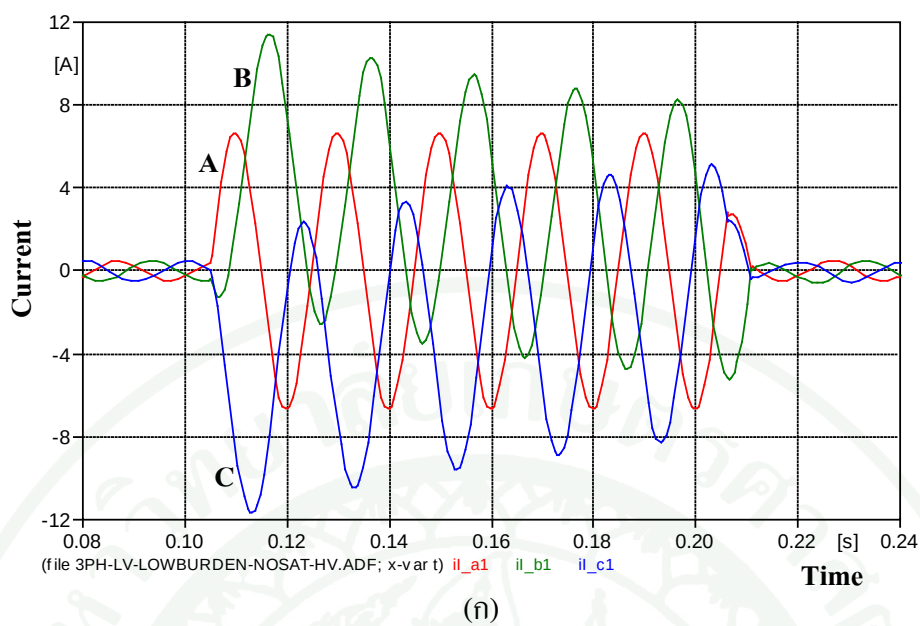


(ข)

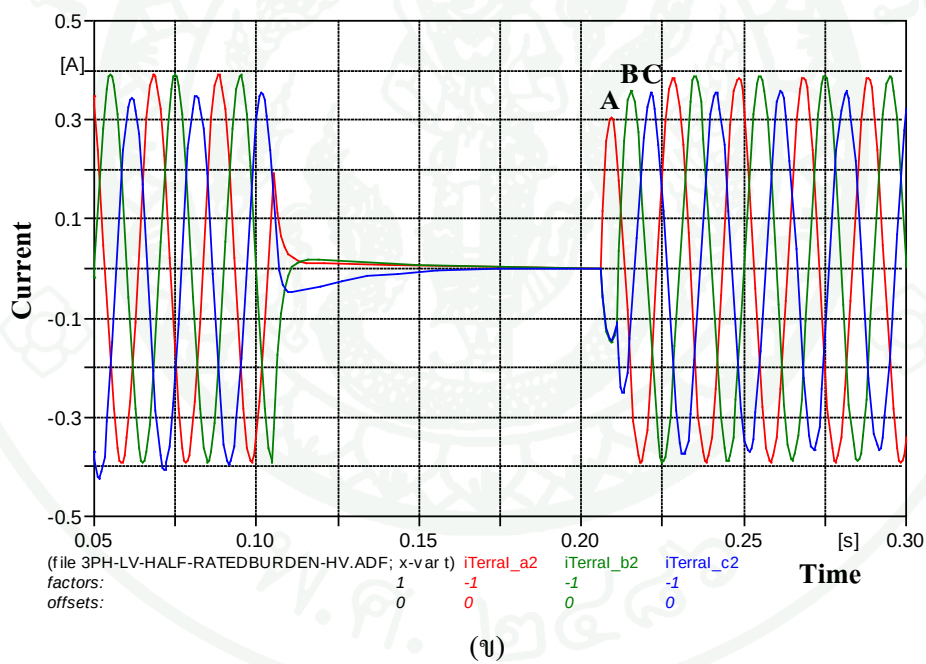
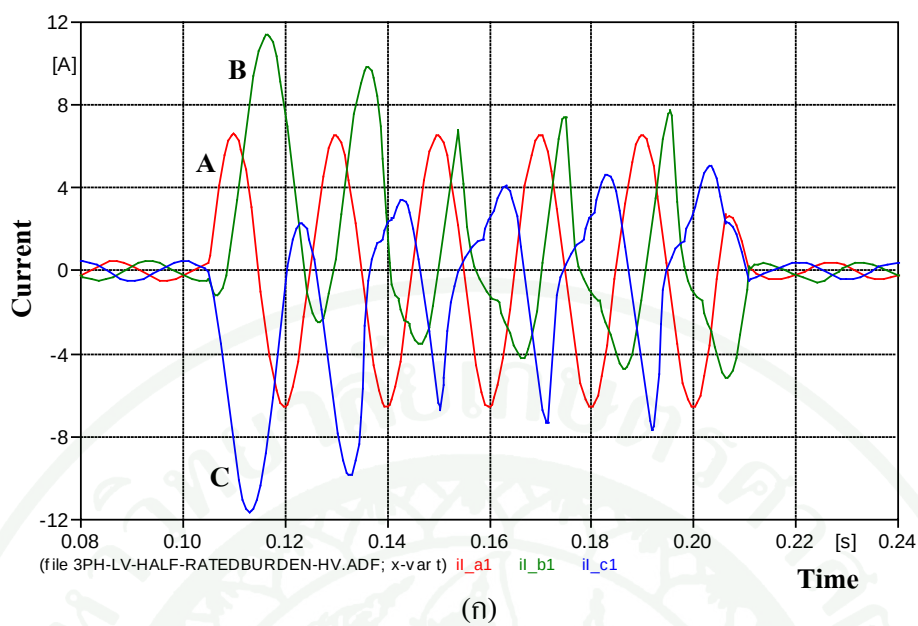
ภาพผนวกที่ ค36 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB2F2



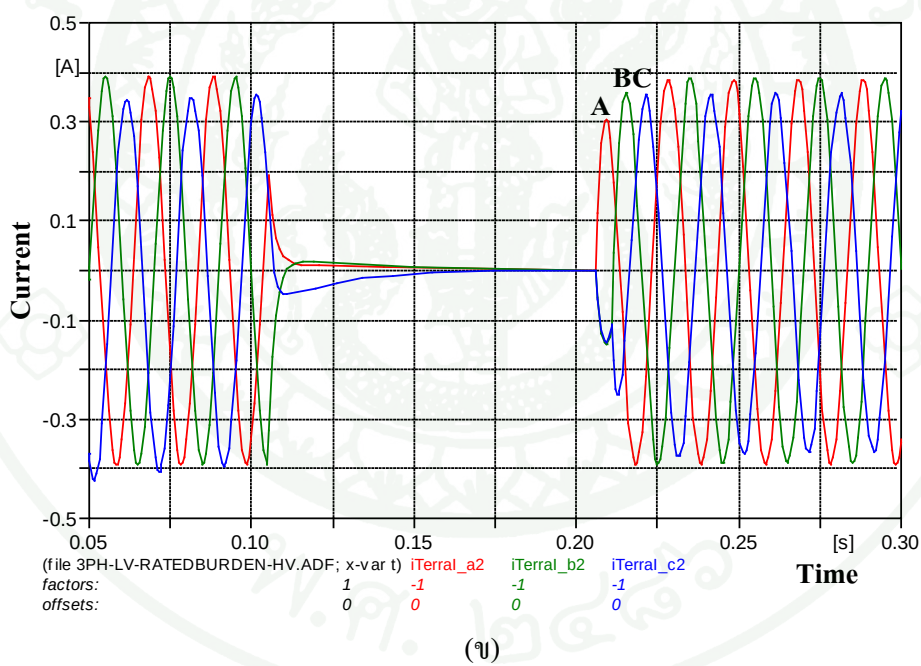
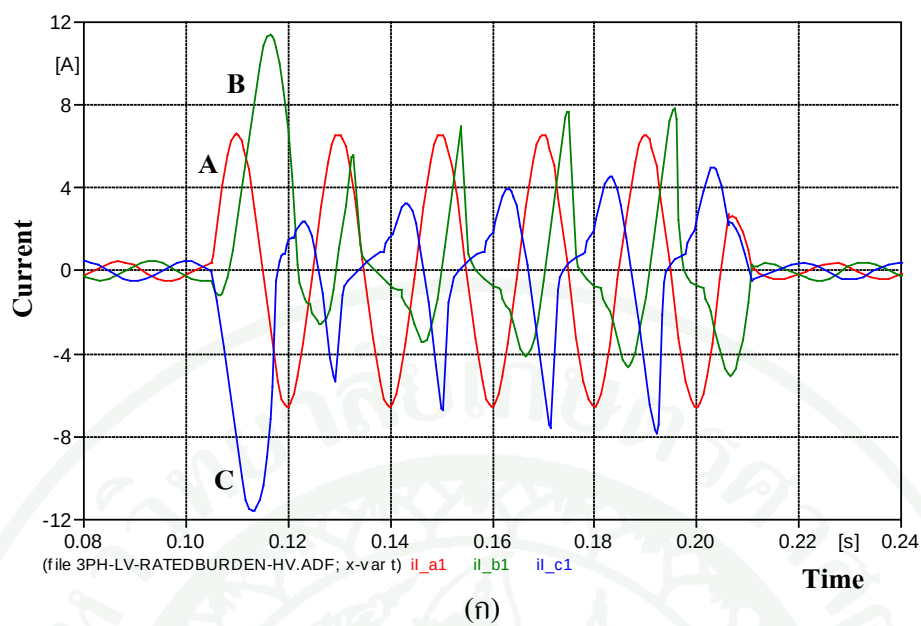
ภาพผนวกที่ ค37 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB3F2



ภาพผนวกที่ ค38 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัย DB1F3



ภาพผนวกที่ ค39 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB2F3

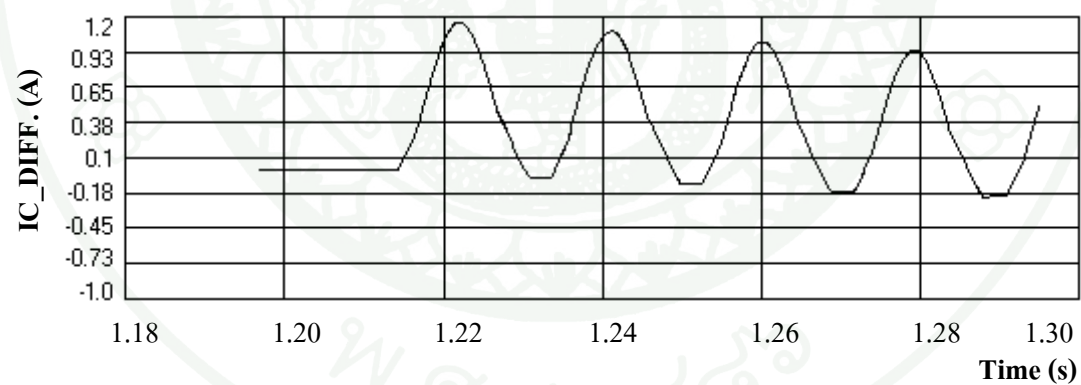
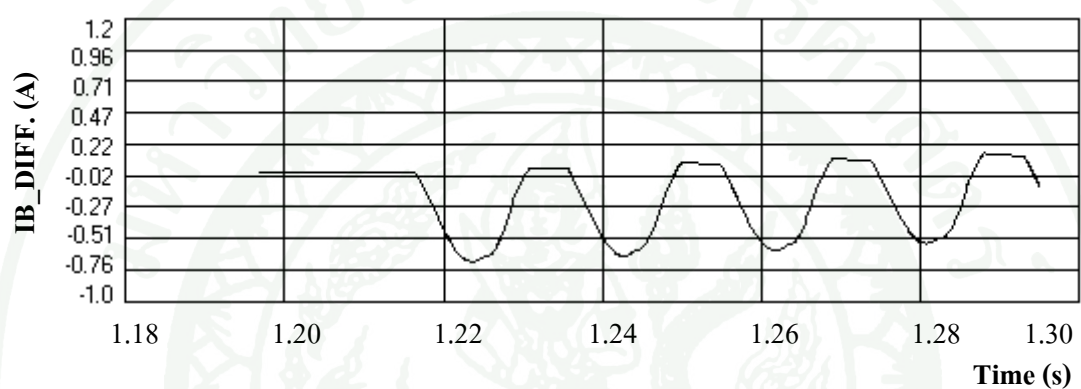
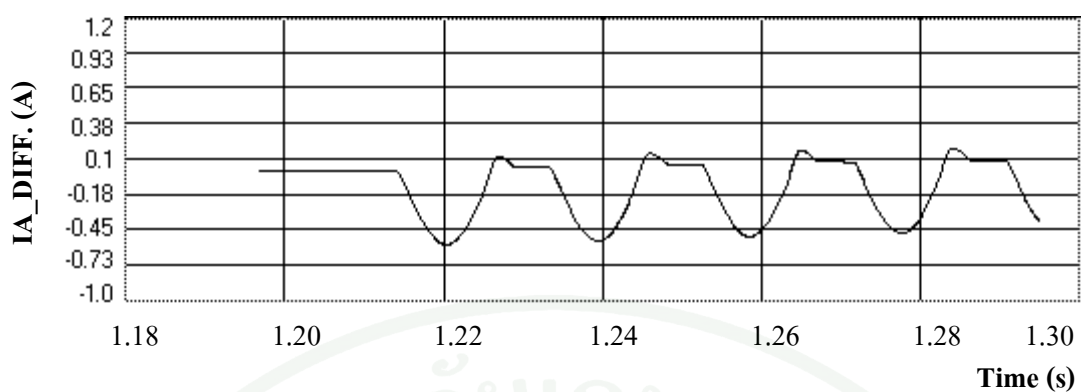


ภาพผนวกที่ ค40 พฤติกรรมการตอบสนองของ CT ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กรณีศึกษา DB3F3

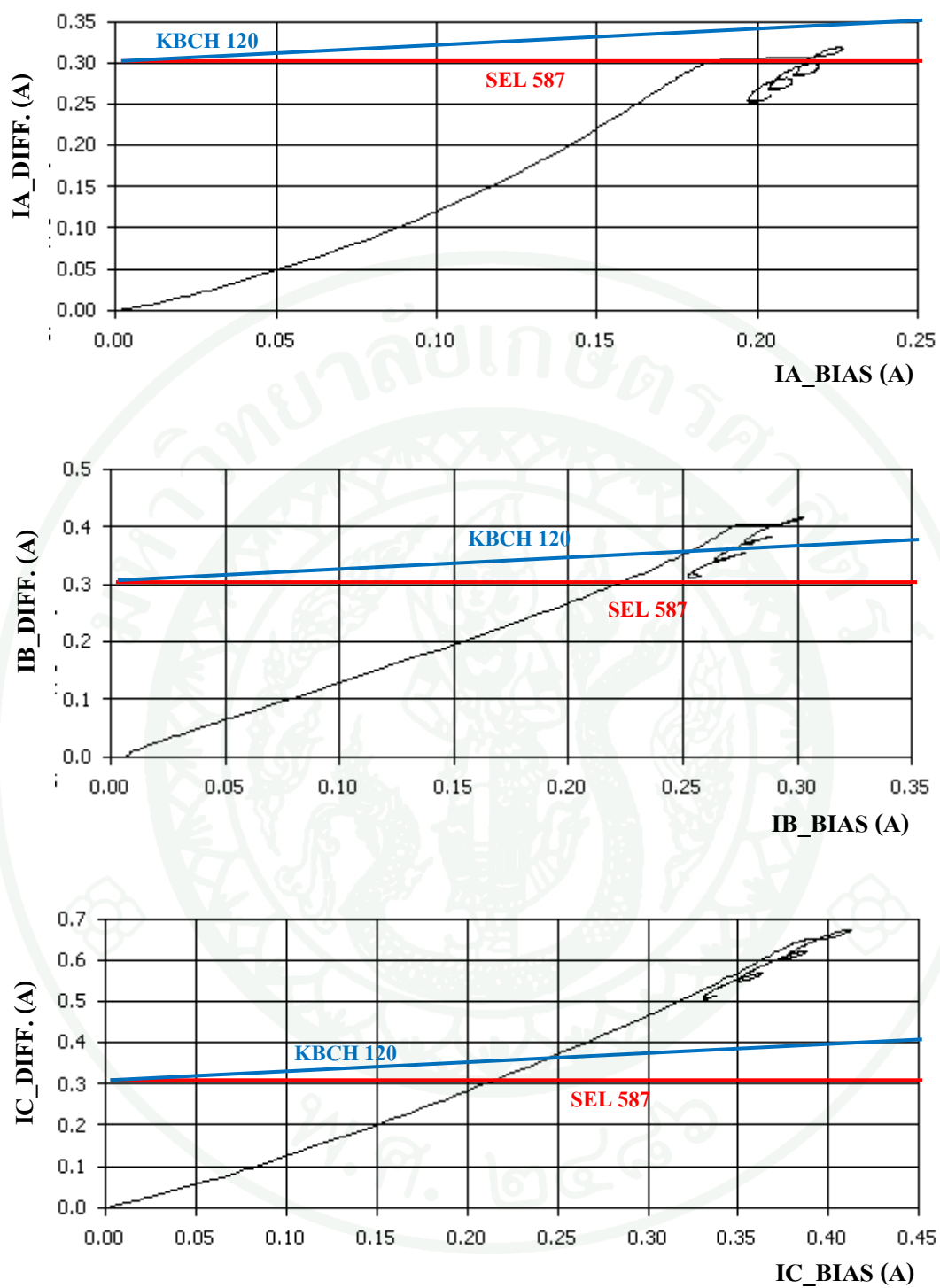
ภาคผนวก ง

รูปคลื่นกระแสผลต่าง, Locus กระแสผลต่าง / กระแสต้านการทำงานของรีเลย์
(กรณีศึกษากลุ่ม A, B, C และ D)

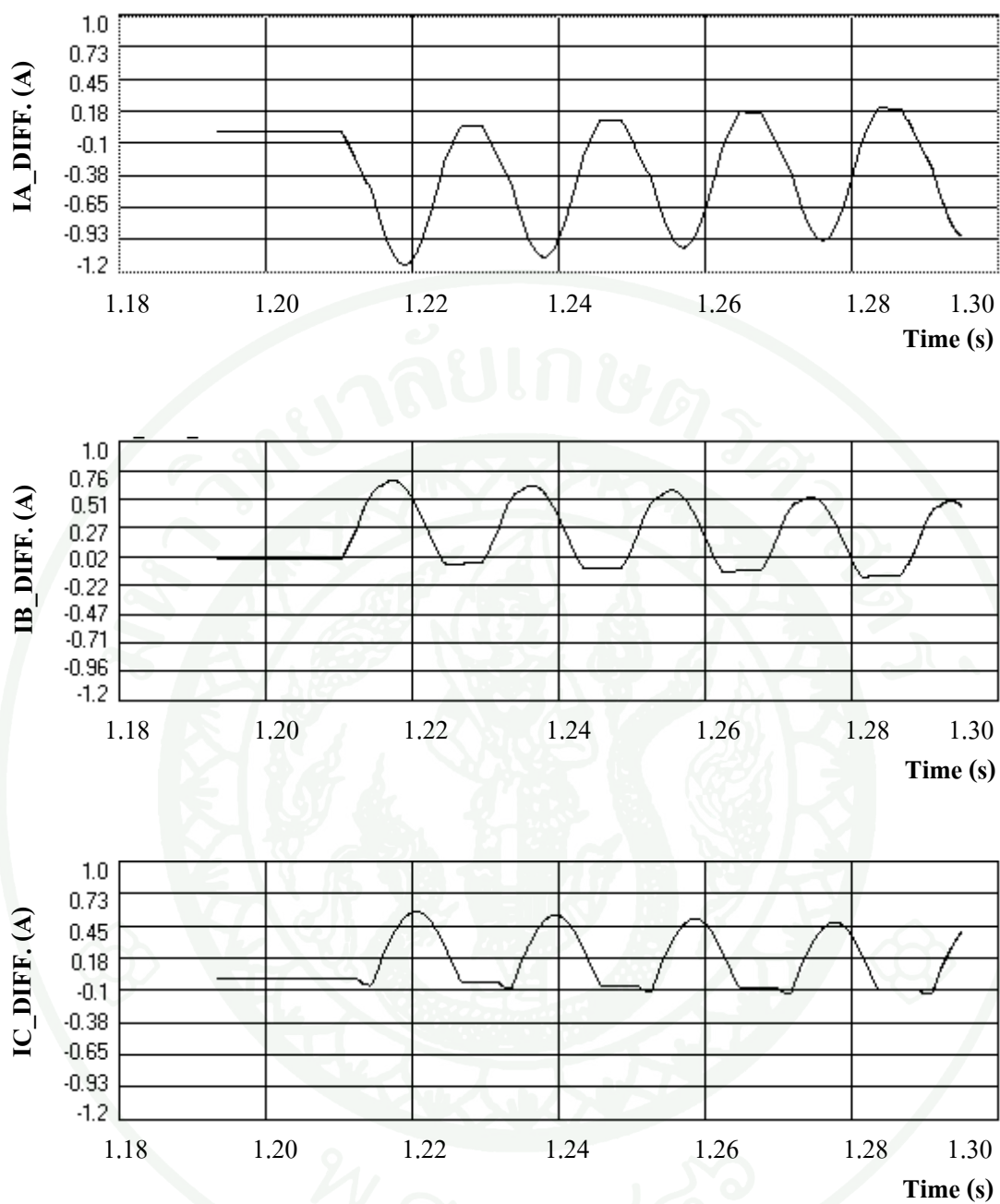
รูปคลื่นกระแผลต่าง, Locus กระแผลต่าง / กระแสด้านการทำงานของรีเลย์
(กรณีศึกษากลุ่ม A)



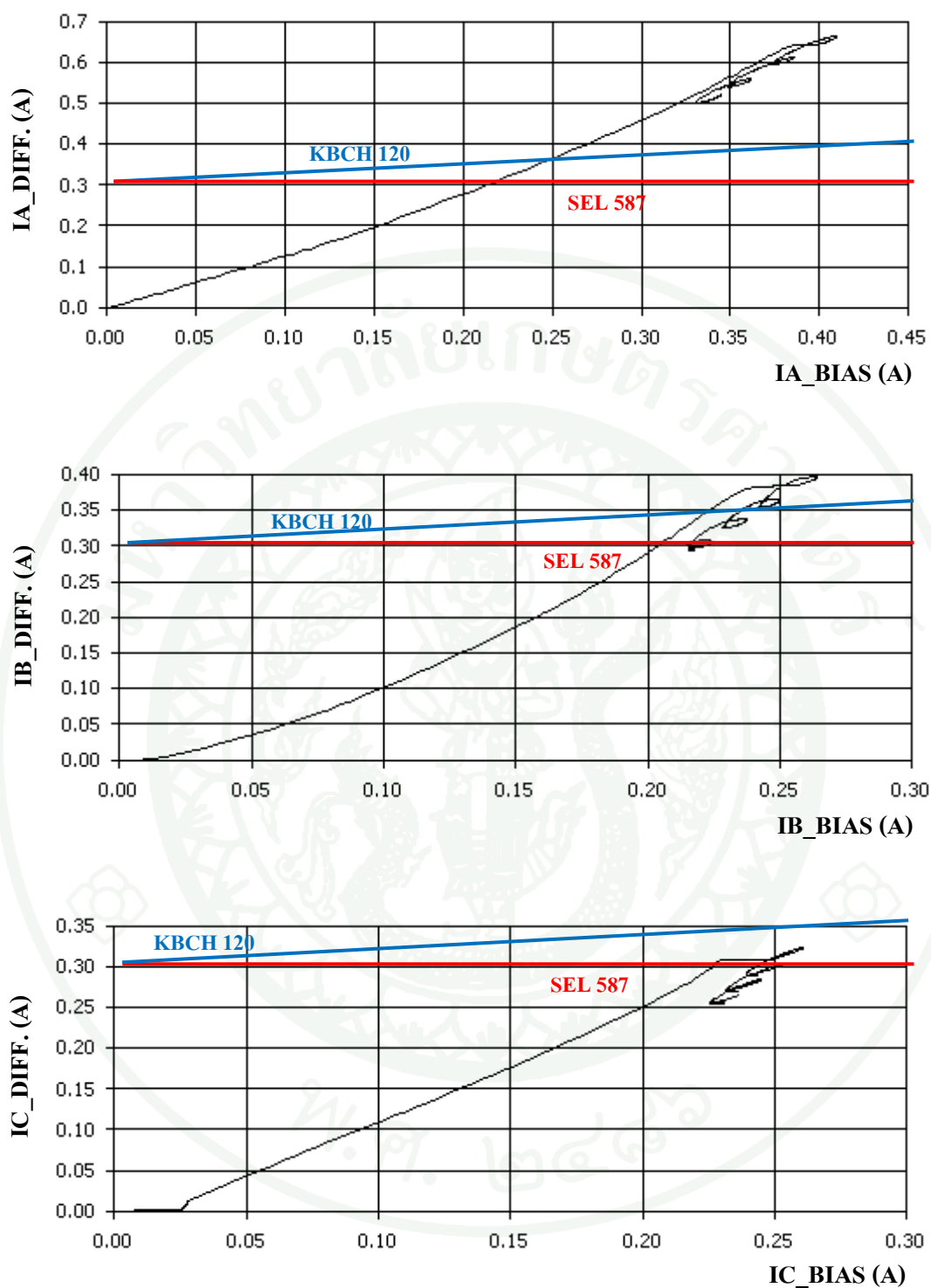
ภาพผนวกที่ ง1 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา O0C270L10



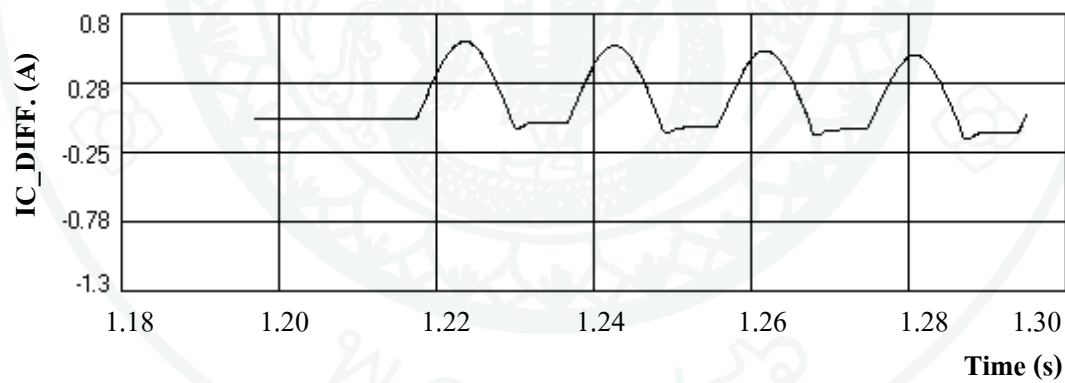
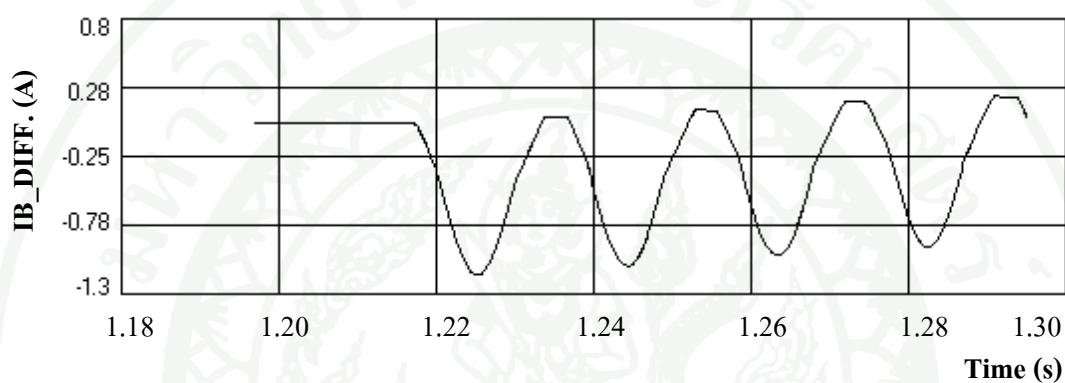
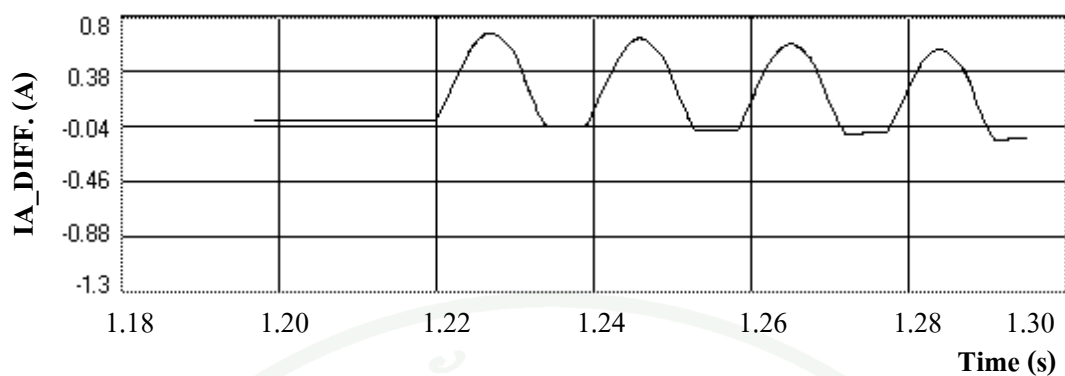
ภาพผนวกที่ ๑๒ Locus กระแสผลต่าง / กระแสต้านการทำงาน กรณีศึกษา 00C270L10



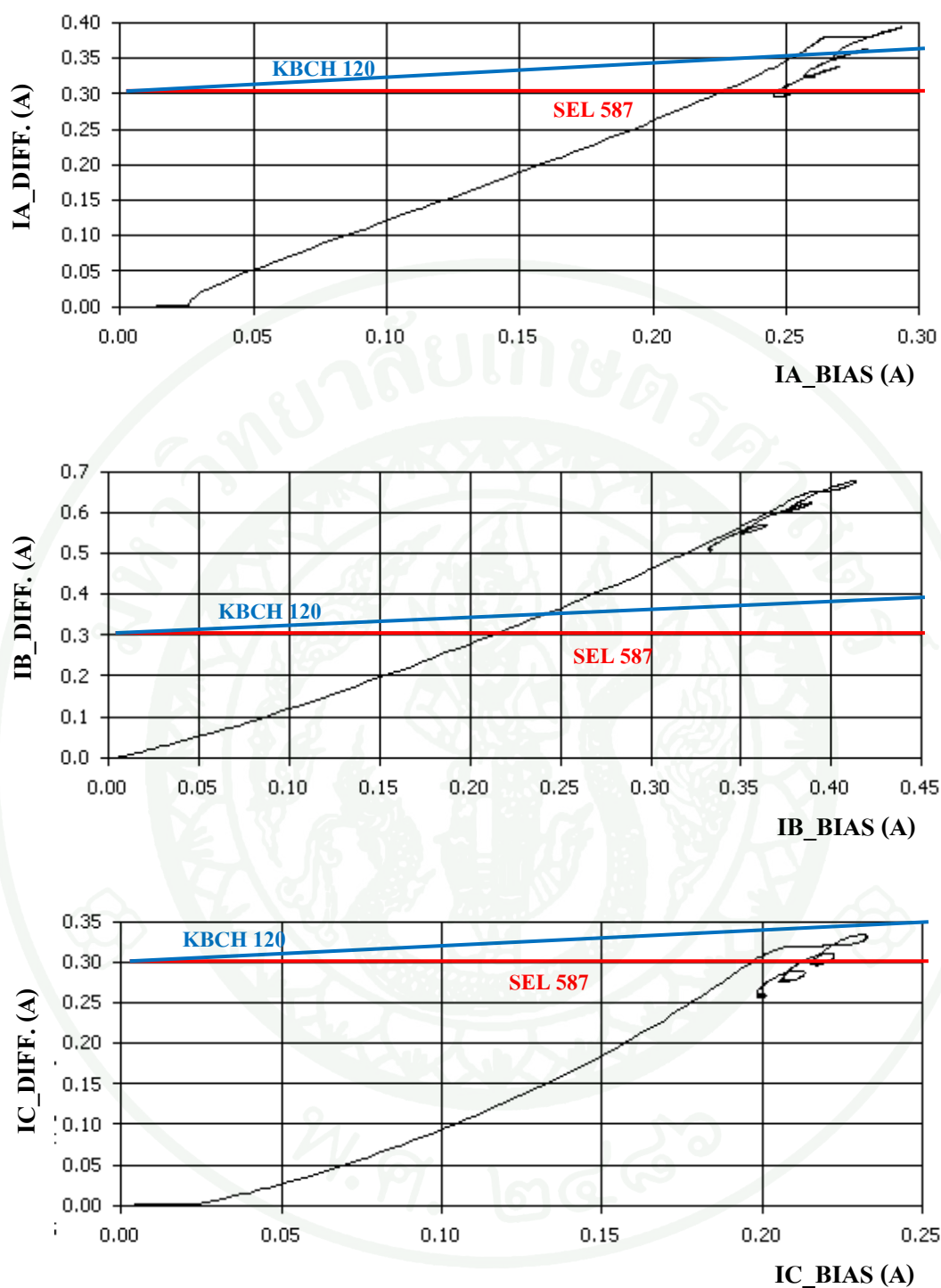
ภาพผนวกที่ ๓ รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา O270C180L10



ภาพผนวกที่ ๓4 Locus กระแสผลต่าง / กระแสต้านการทำงาน กรณีศึกษา O270C180L10

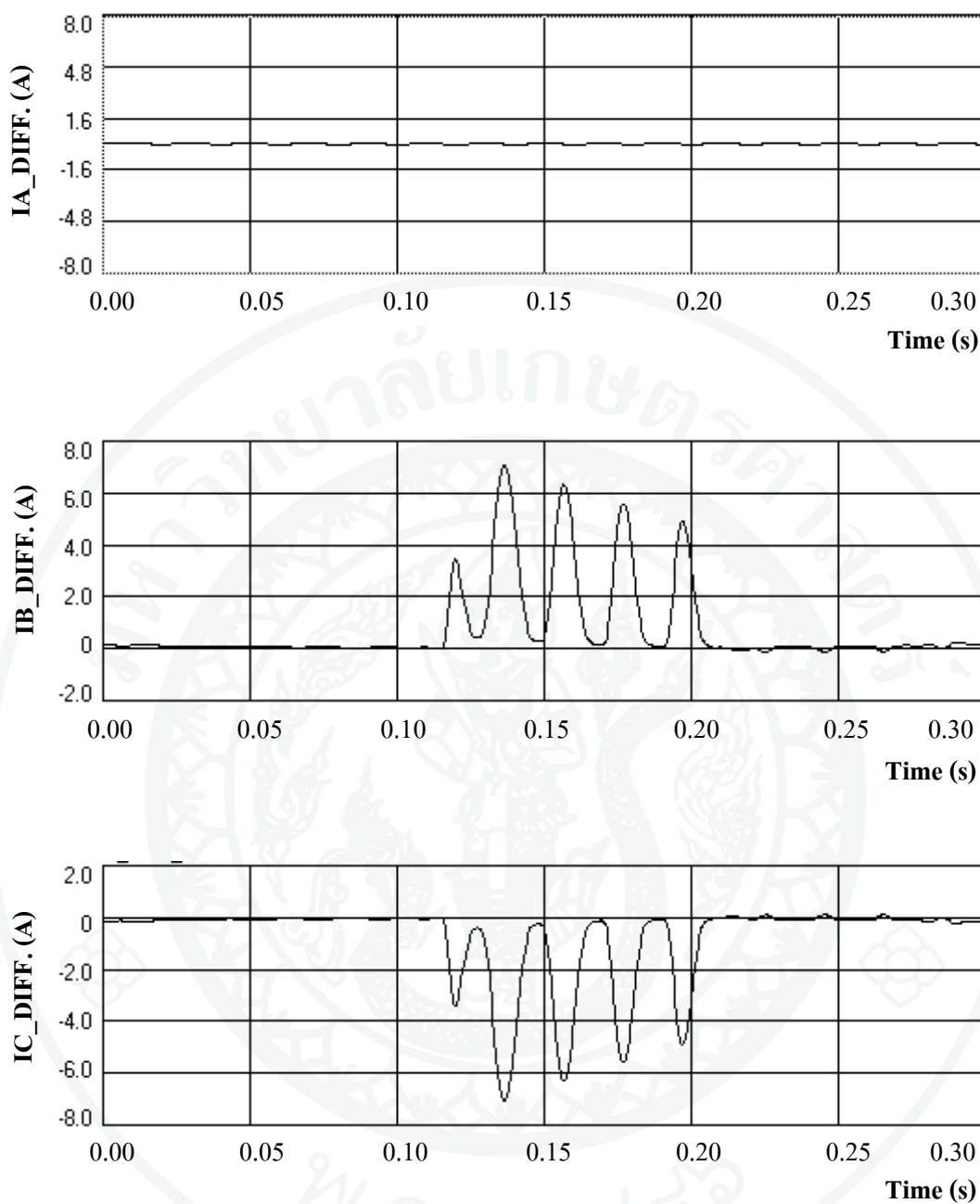


ภาพผนวกที่ 5 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา O90C30L10

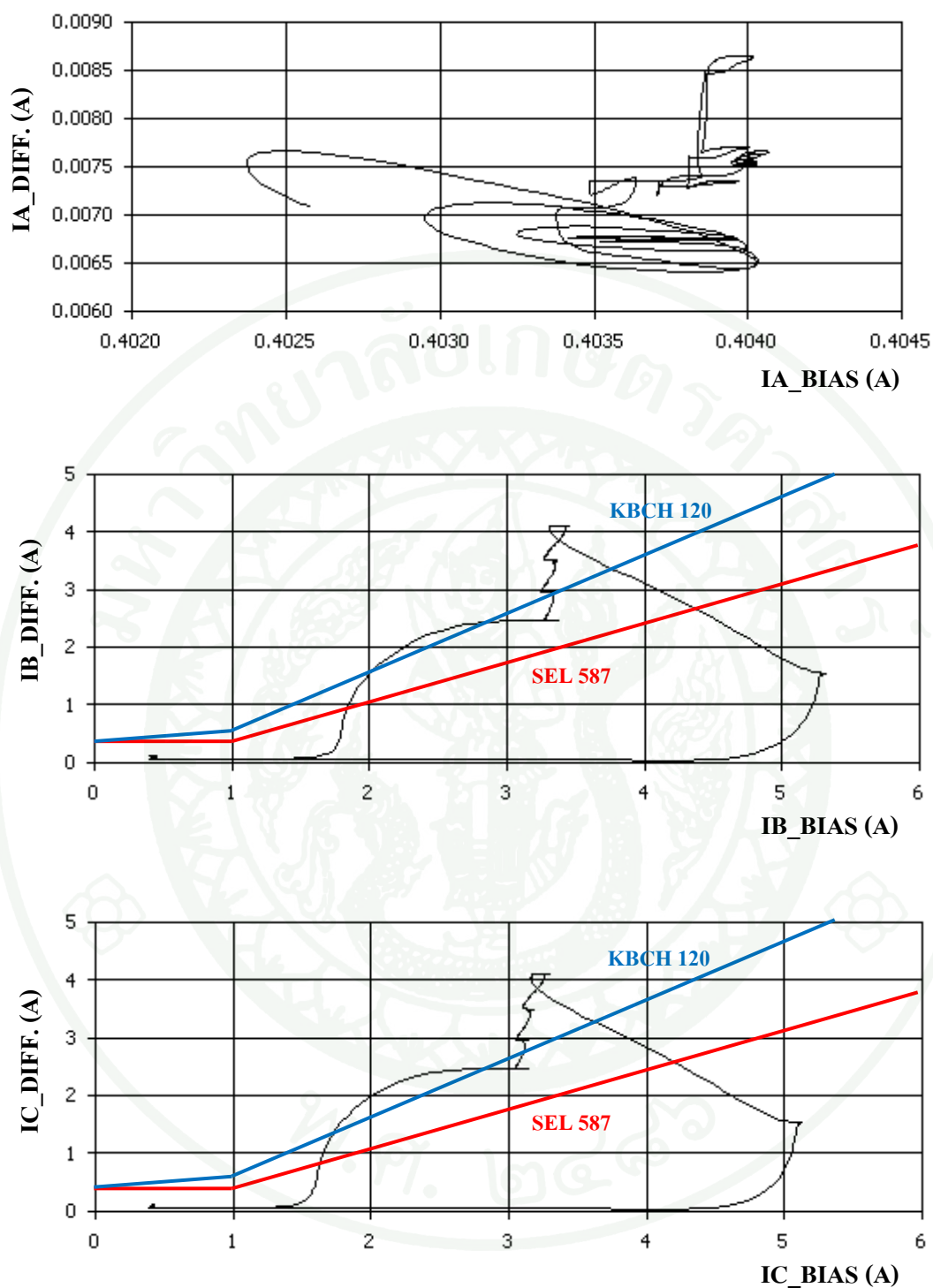


ภาพผนวกที่ ๖ Locus กระแสผลต่าง / กระแสต้านการทำงาน กรณีศึกษา O90C30L10

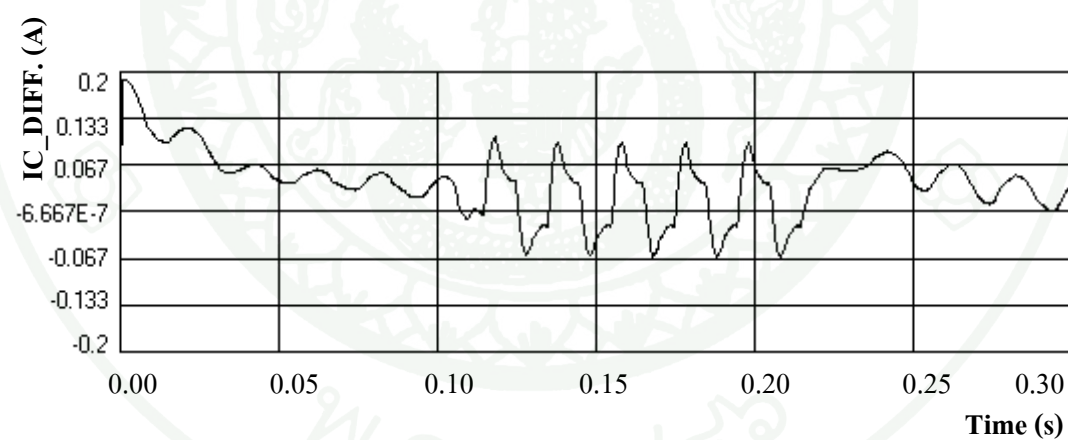
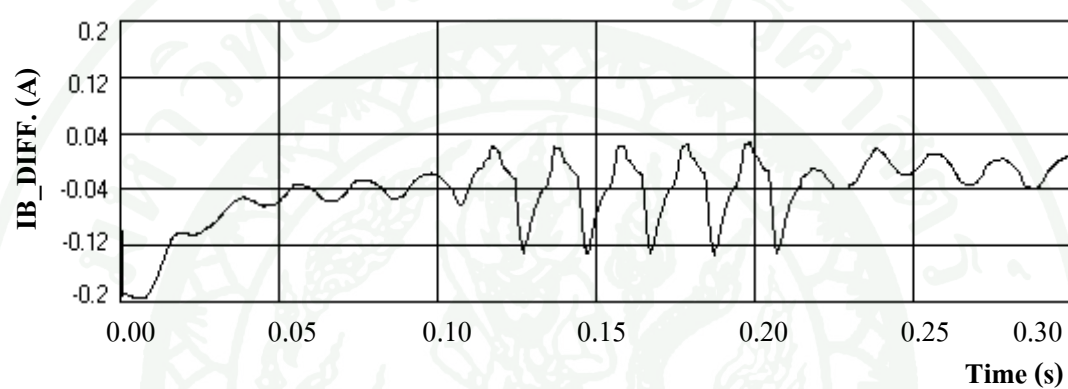
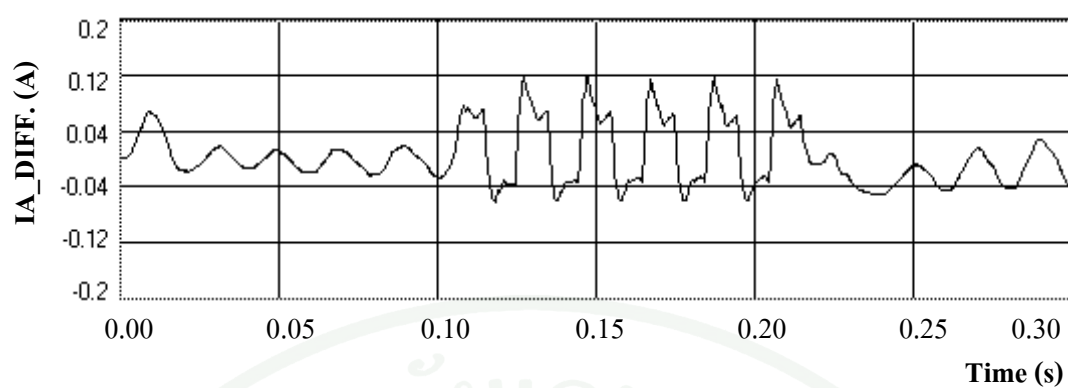
รูปคลื่นกระแผลต่าง, Locus กระแผลต่าง / กระแสด้านการทำงานของรีเลย์
(กรณีศึกษากลุ่ม B)



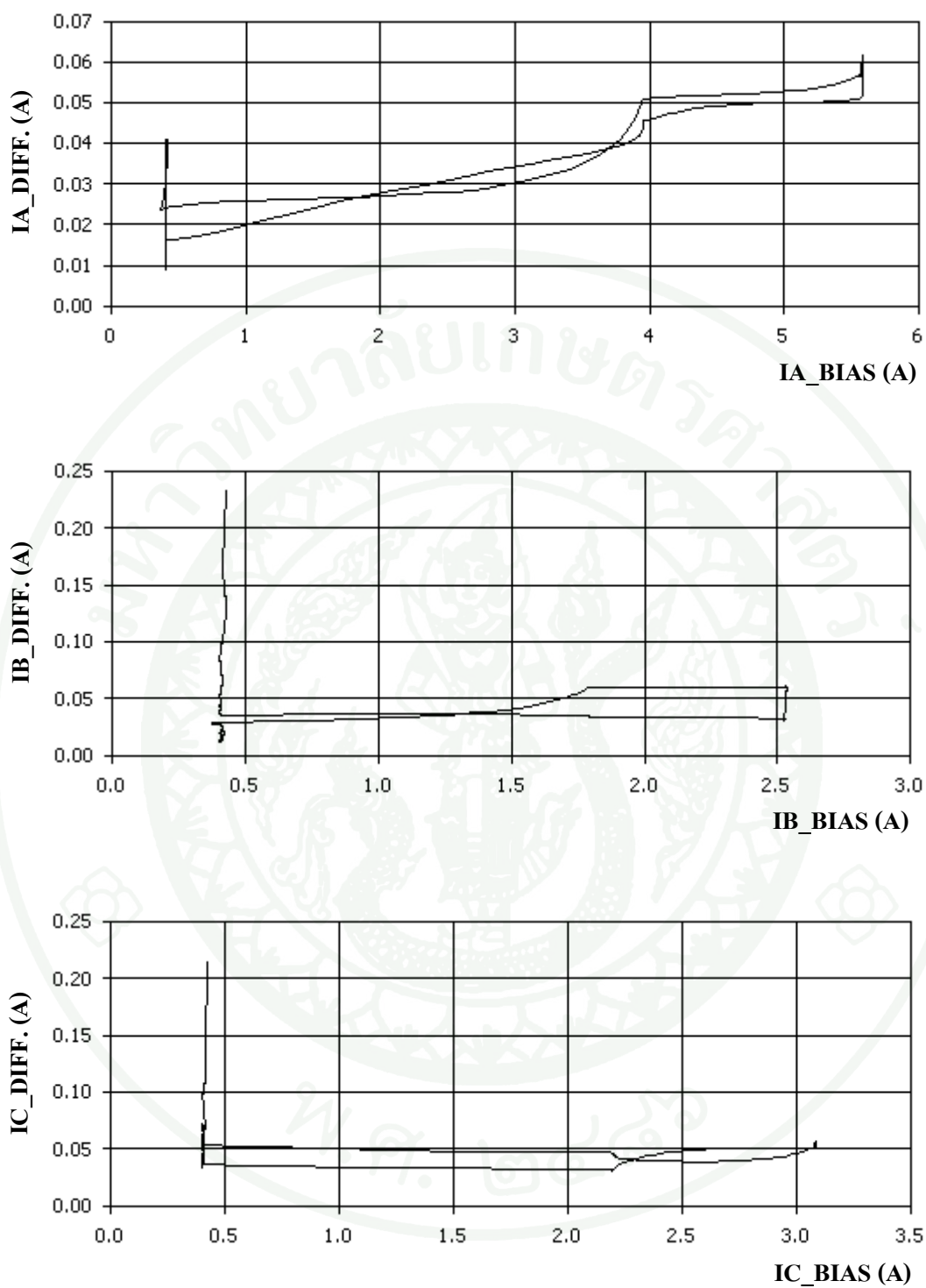
ภาพผนวกที่ ๗ รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา B1R80NF1



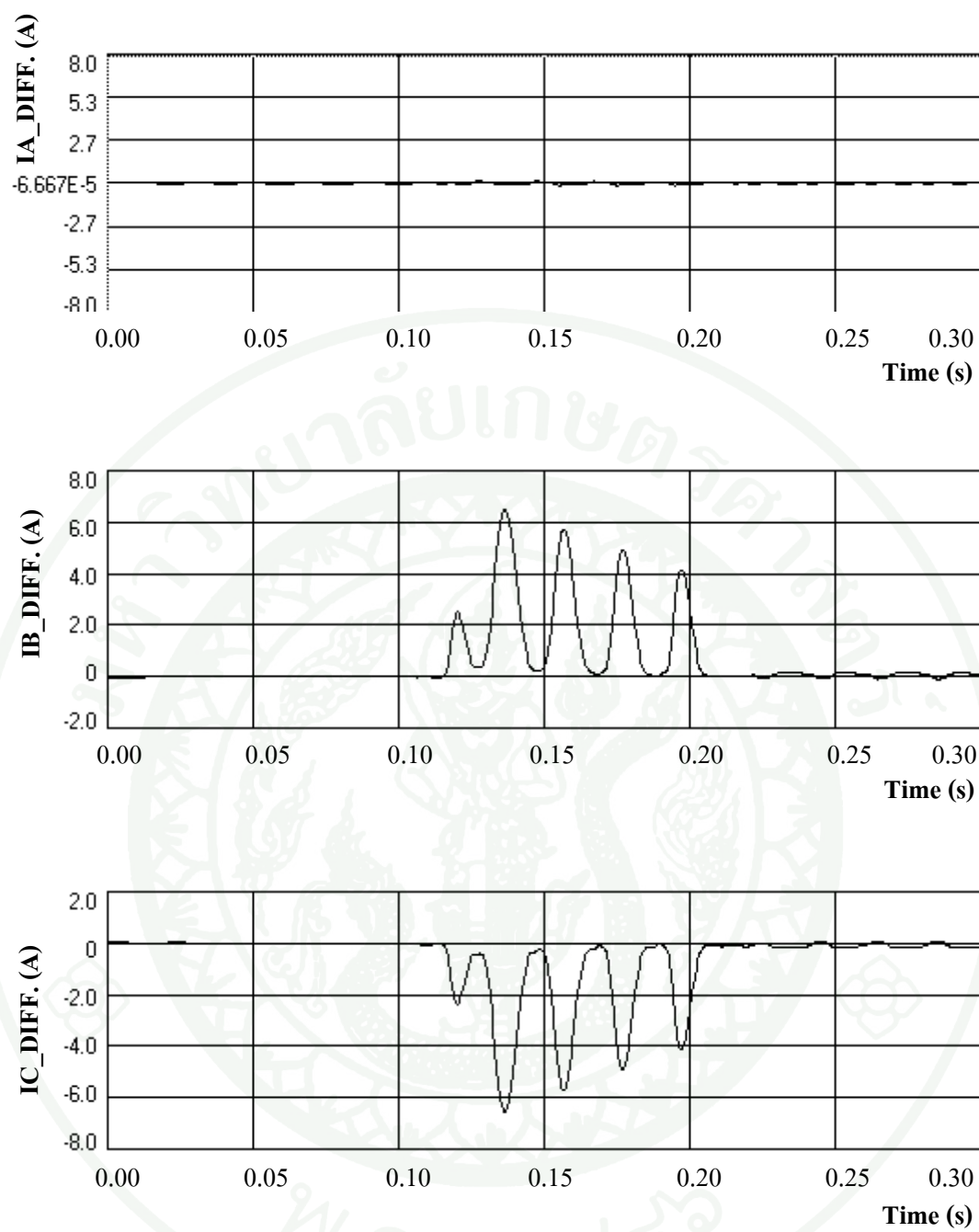
ภาพผนวกที่ ๘ Locus กระแสผลต่าง / กระแสต้านการทำงาน กรณีศึกษา B1R80NF1



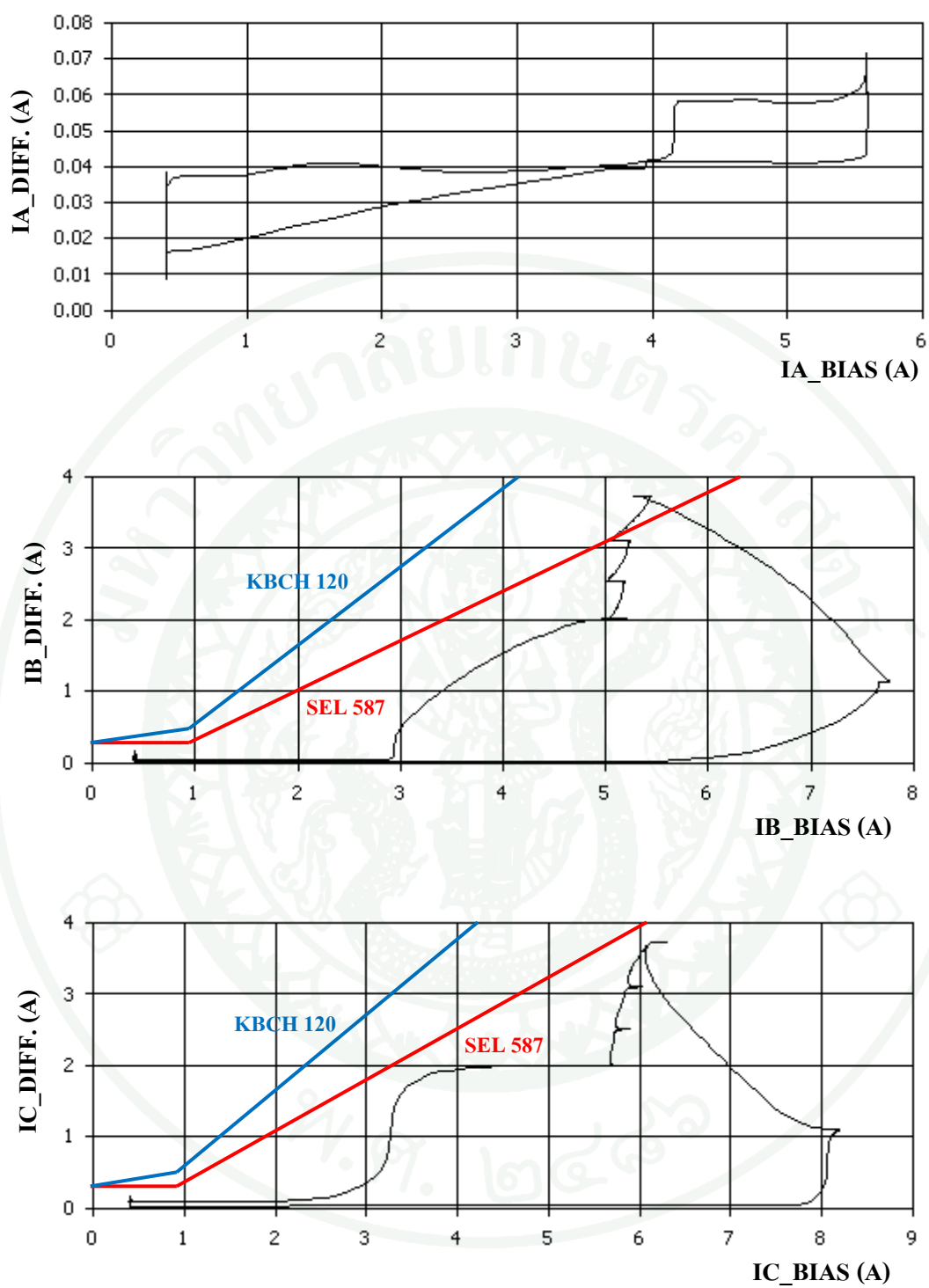
ภาพผนวกที่ ๑๑ รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา B1R80NF2



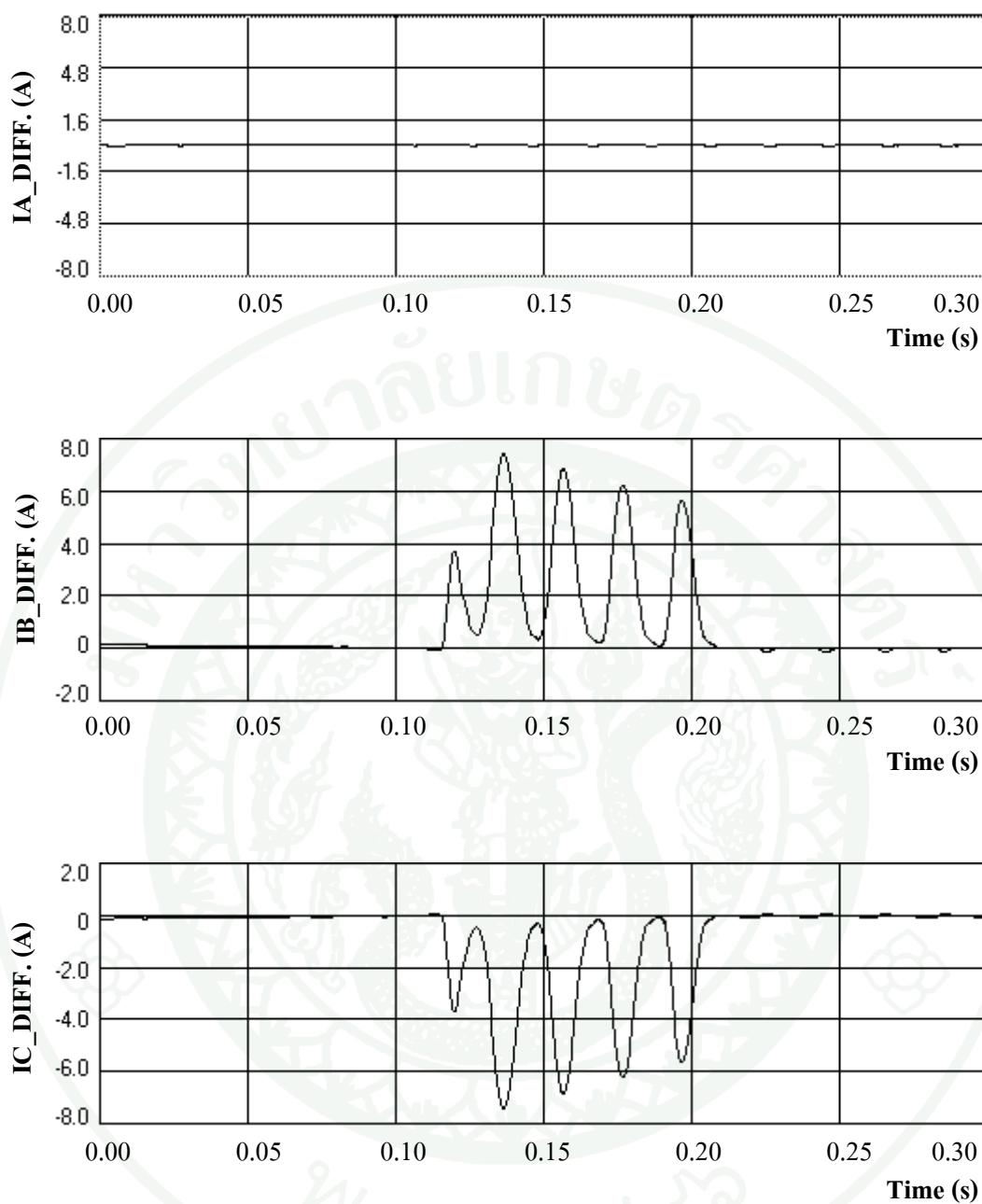
ภาพผนวกที่ ๑๑๐ Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา B1R80NF2



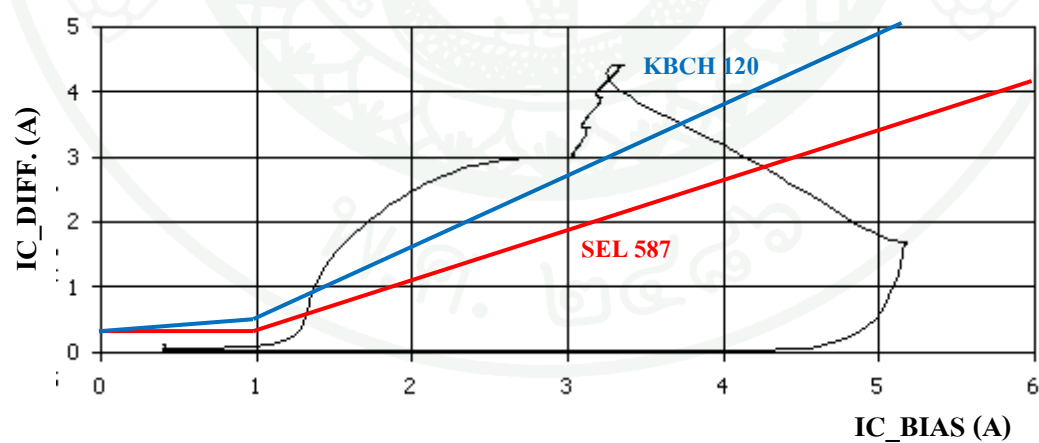
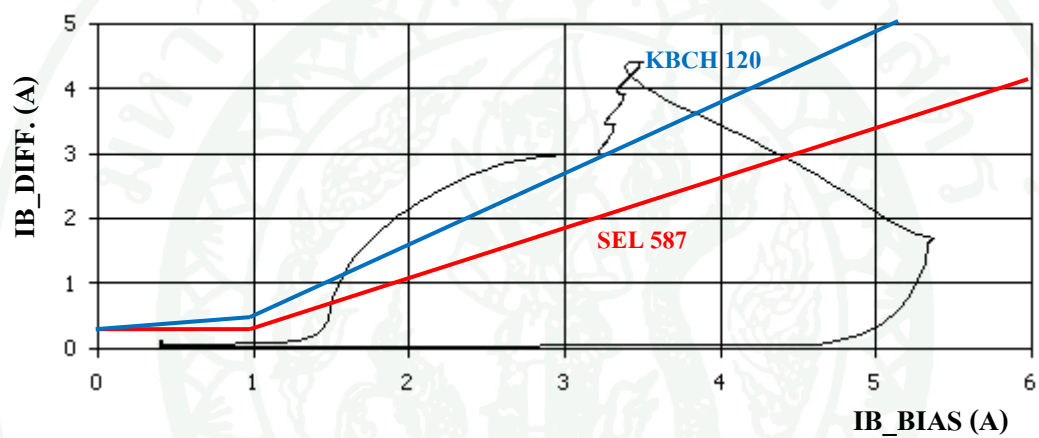
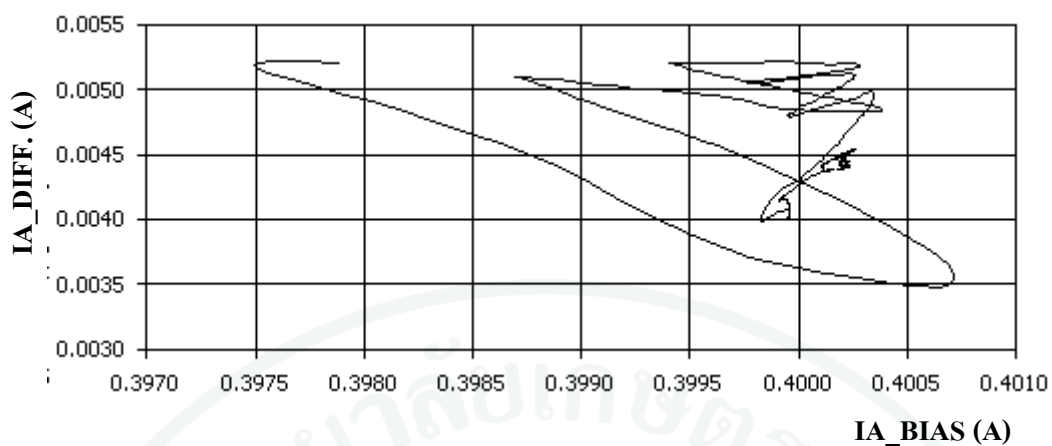
ภาพผนวกที่ 11 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา B1R80NF3



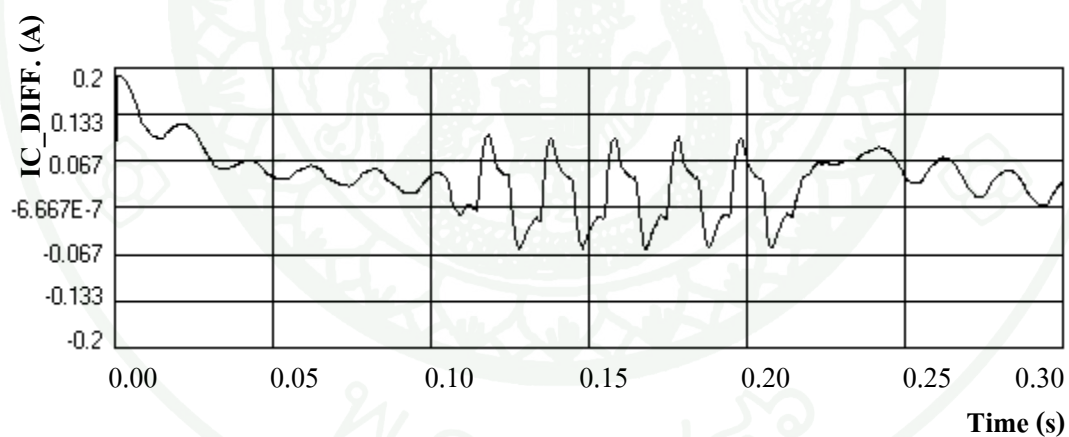
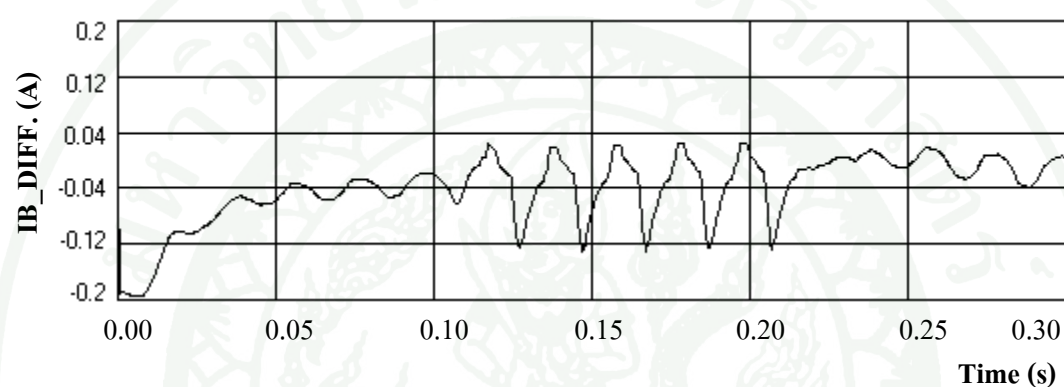
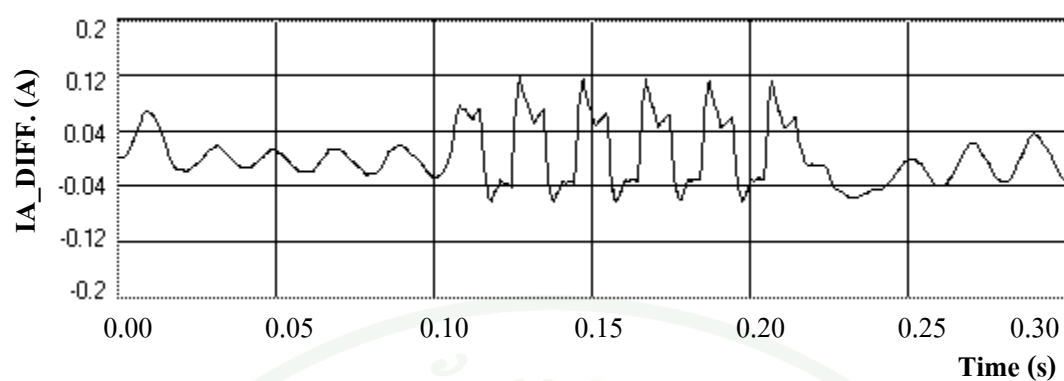
ภาพผนวกที่ 12 Locus กระแสผลต่าง / กระแสต้านการทำงาน กรณีศึกษา B1R80NF3



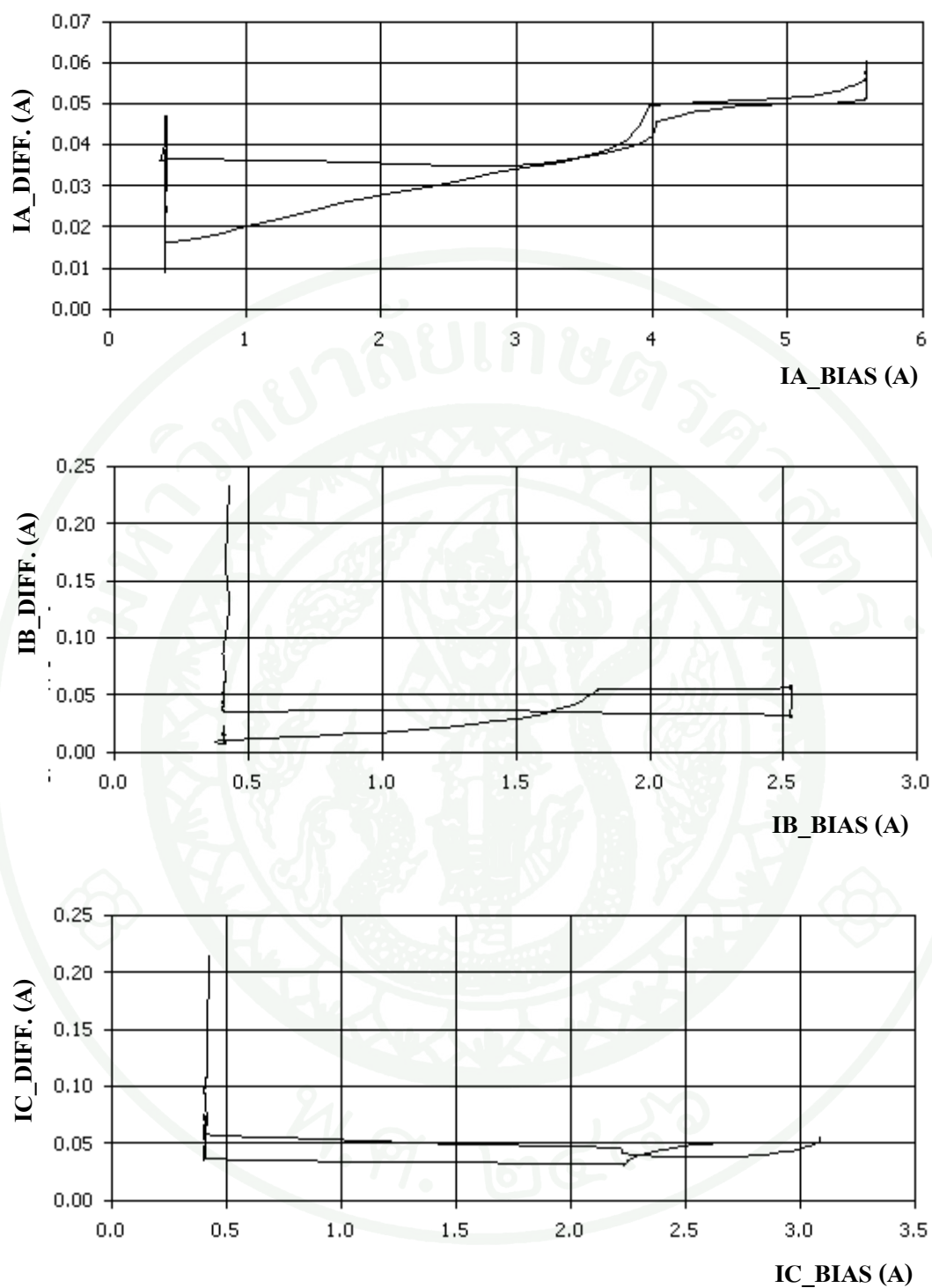
ภาพผนวกที่ 13 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา B2R80NF1



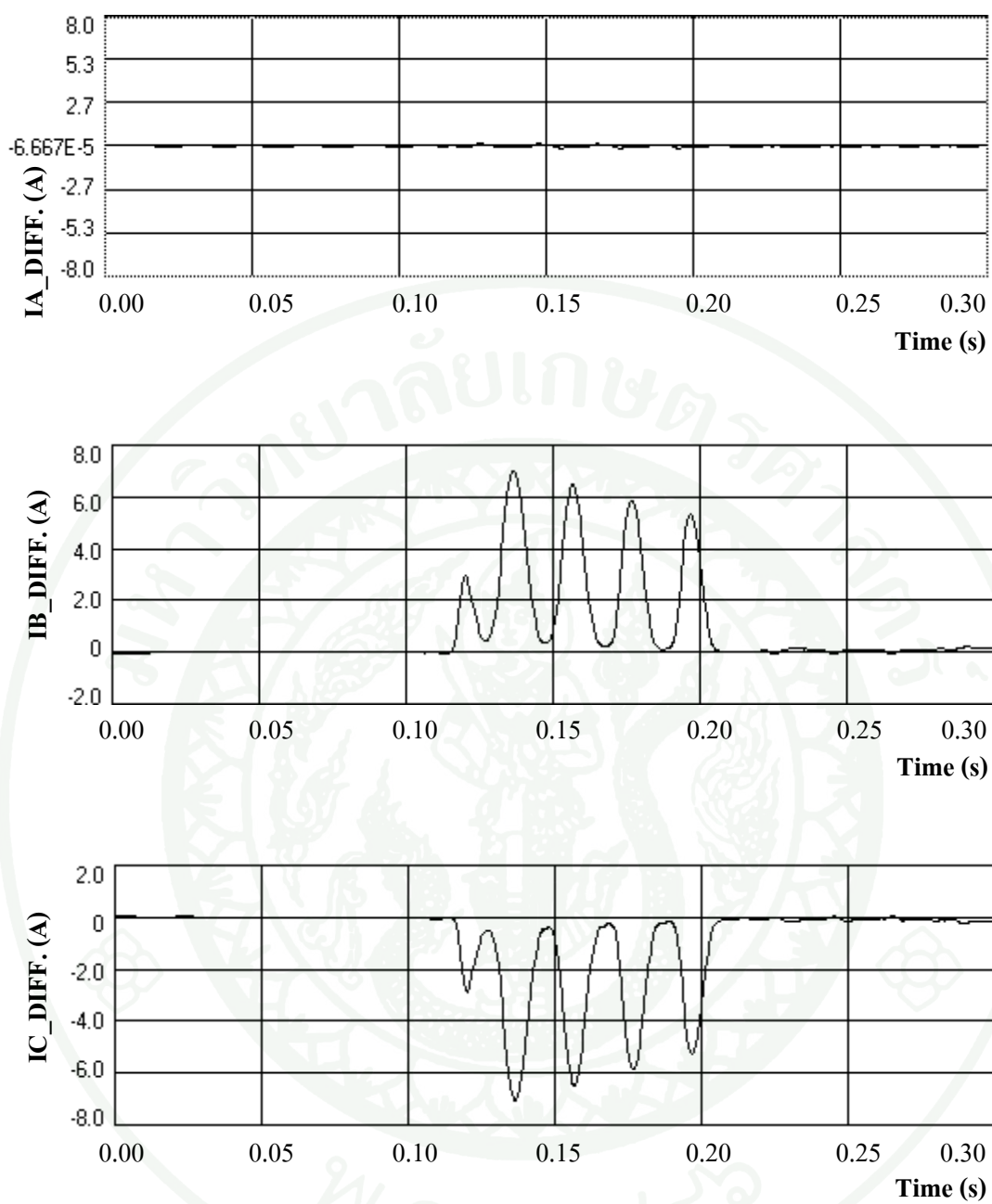
ภาพผนวกที่ 14 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา B2R80NF1



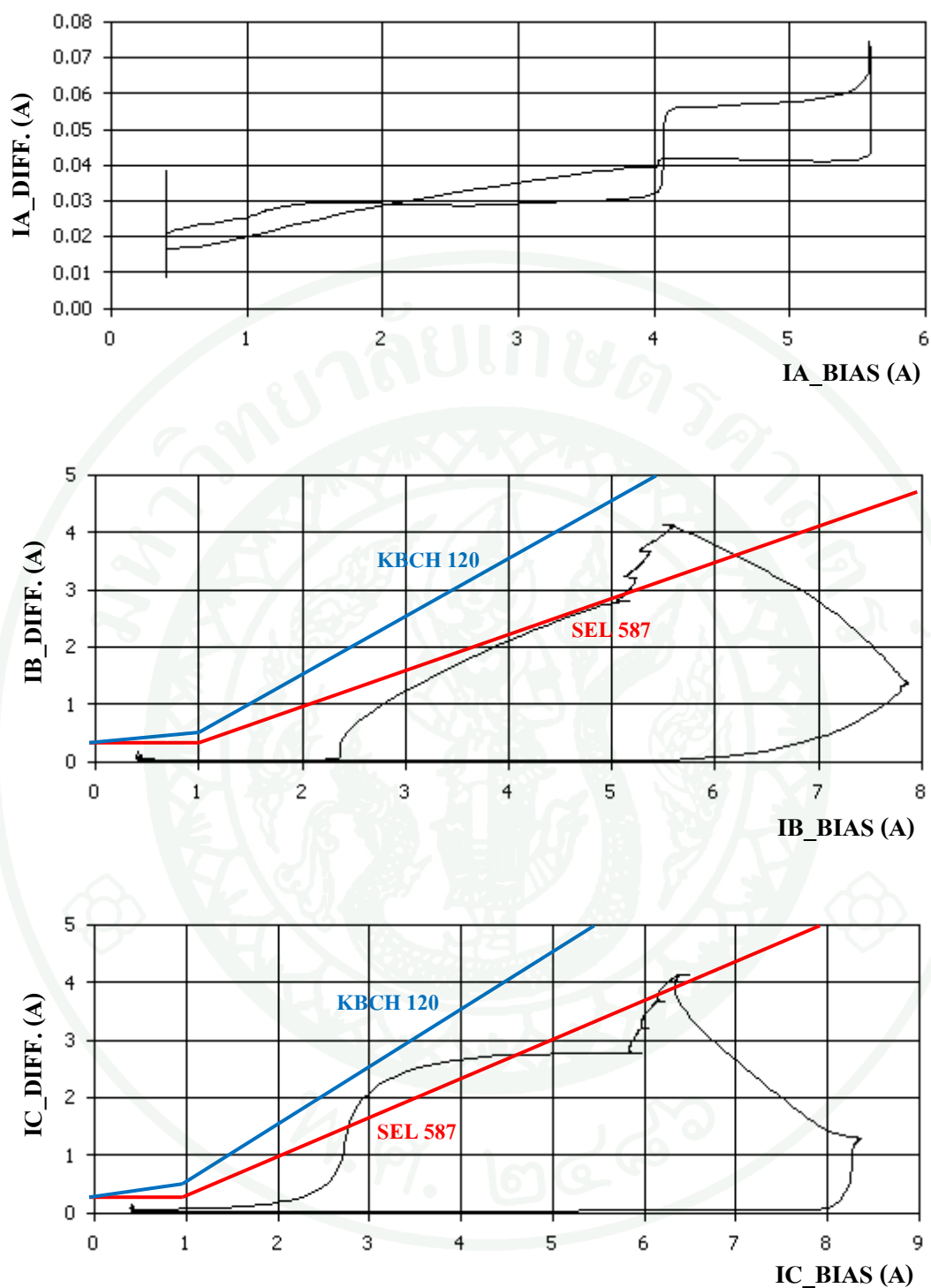
ภาพผนวกที่ 15 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา B2R80NF2



ภาพผนวกที่ 16 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา B2R80NF2

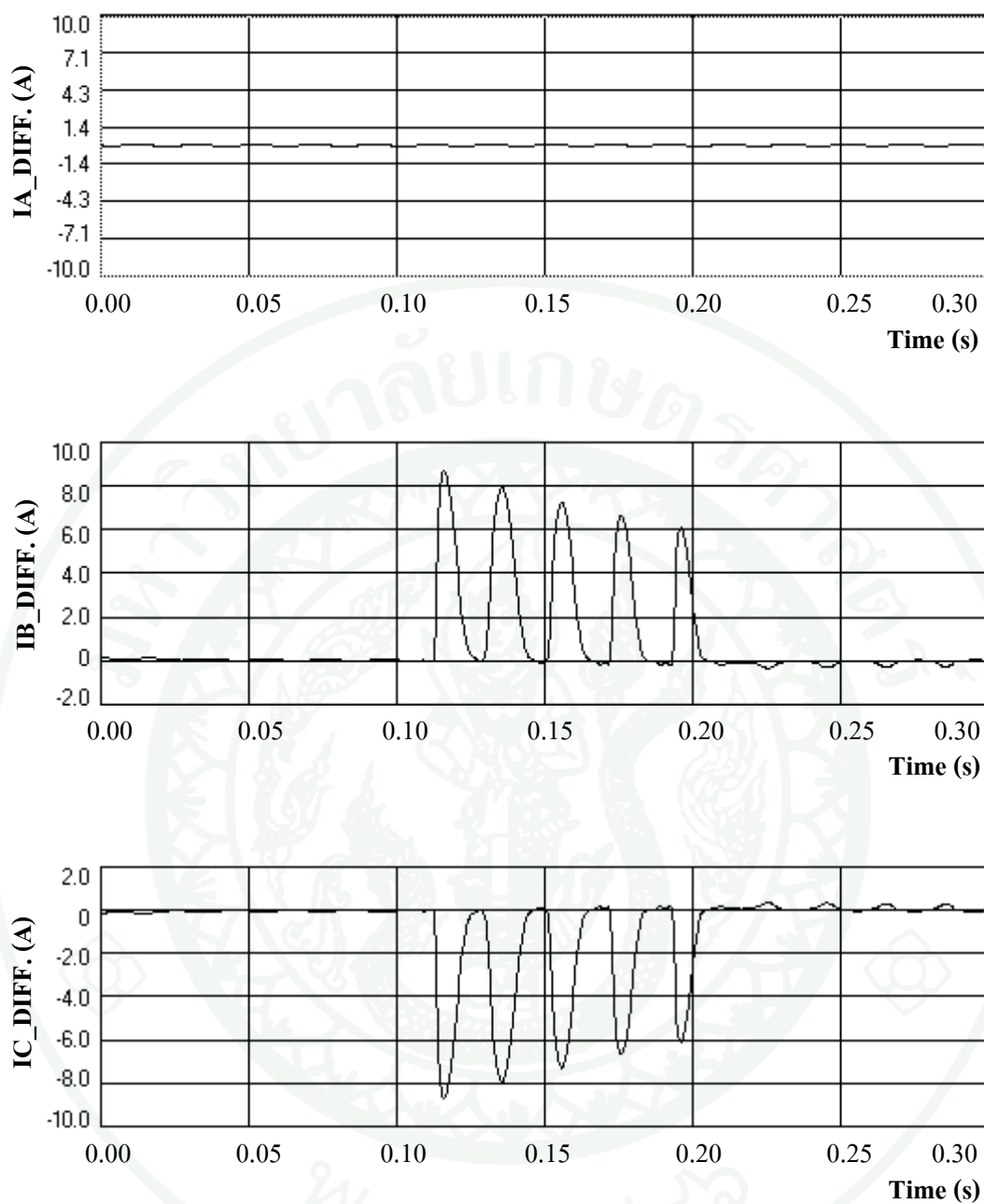


ภาพผนวกที่ 17 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา B2R80NF3

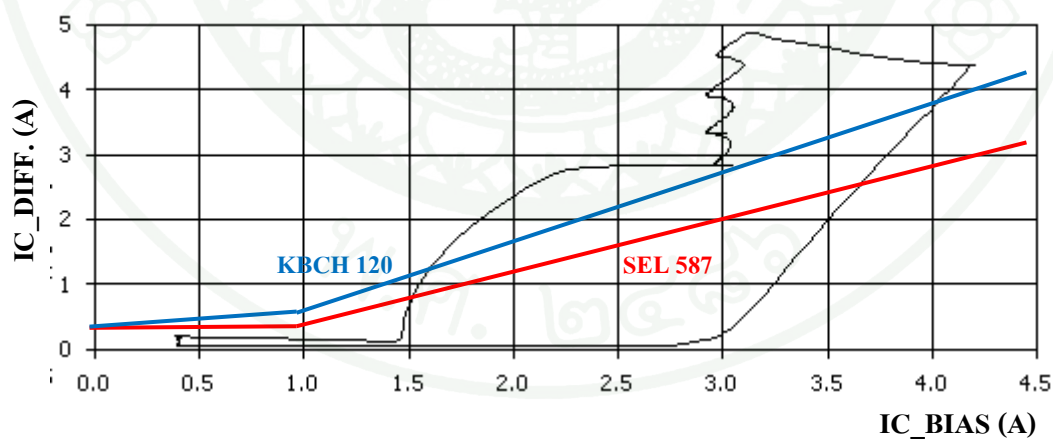
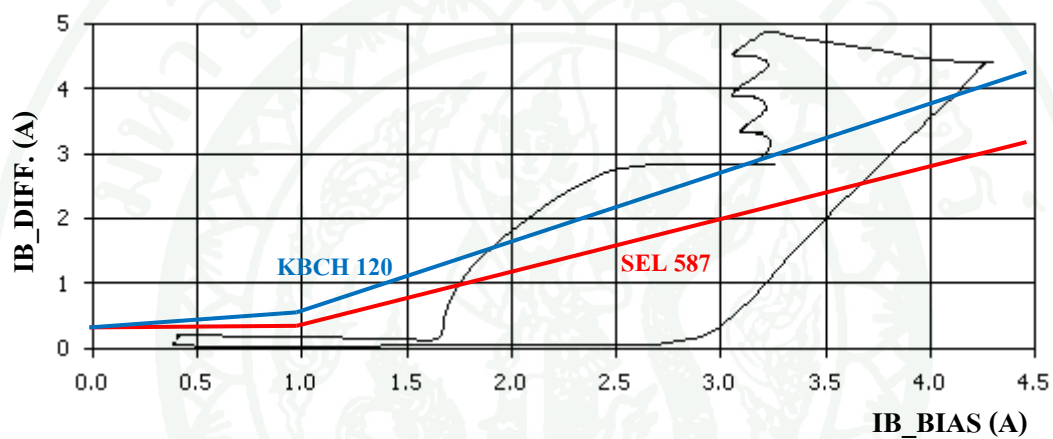
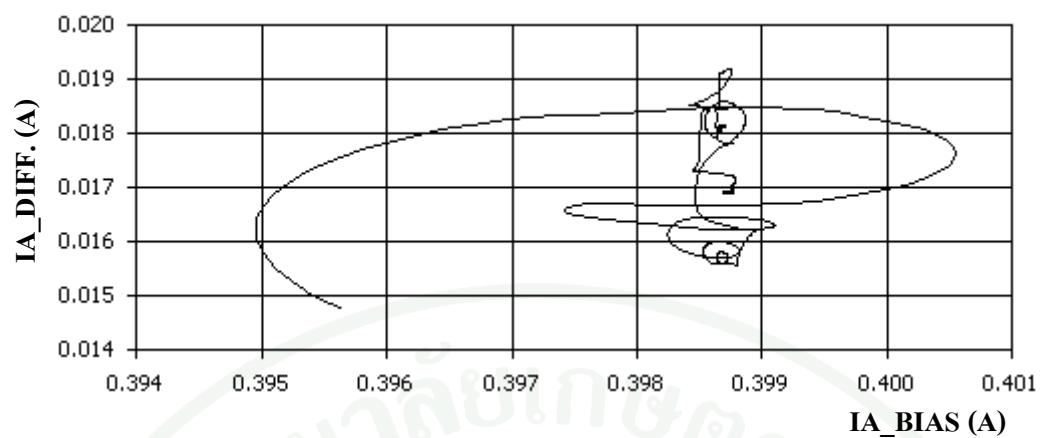


ภาพผนวกที่ 18 Locus กระแสผลต่าง / กระแสต้านการทำงาน กรณีศึกษา B2R80NF3

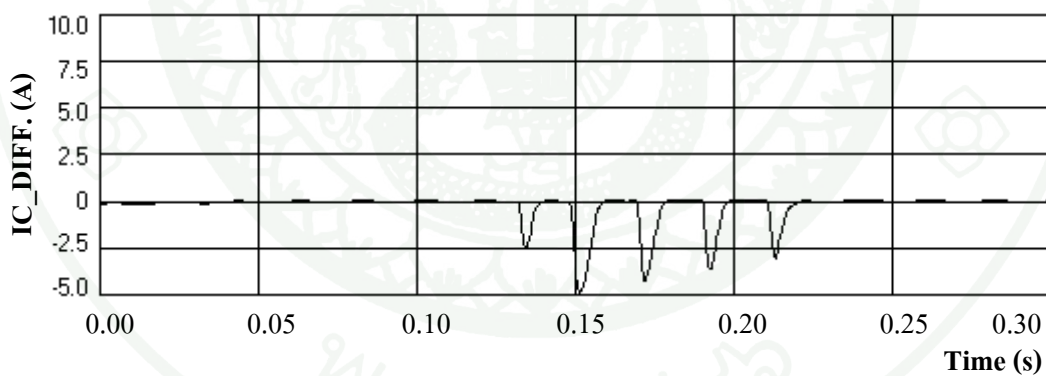
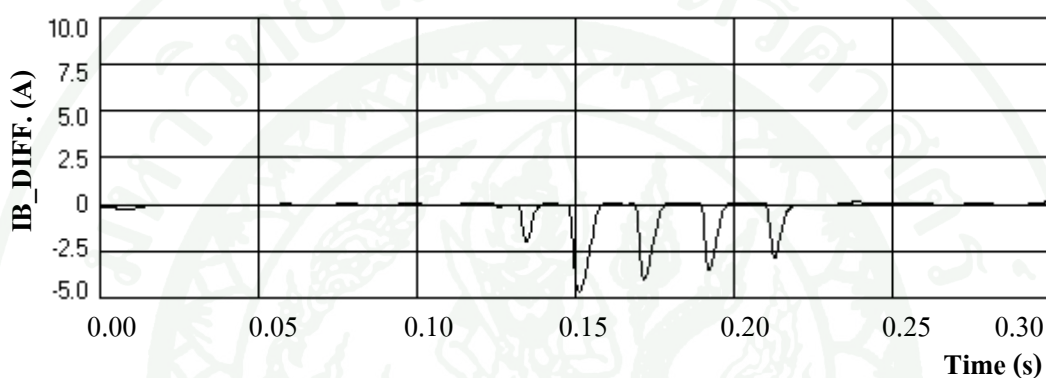
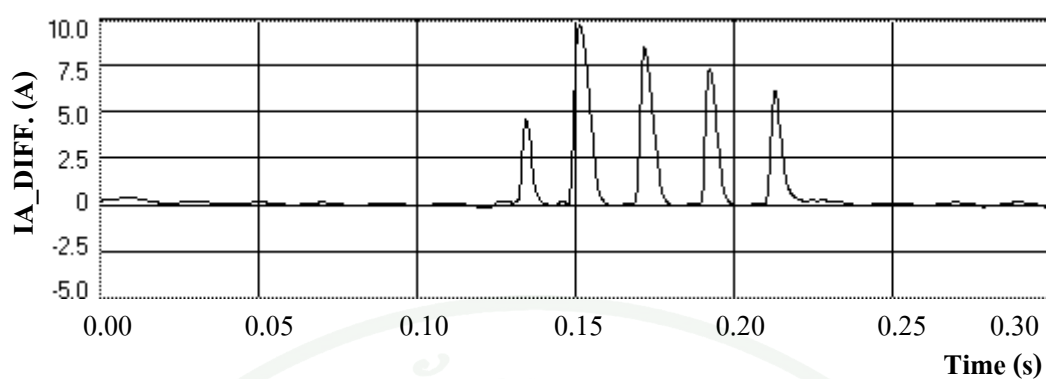
รูปคลื่นกระแผลต่าง, Locus กระแผลต่าง / กระแสด้านการทำงานของรีเลย์
(กรณีศึกษา กลุ่ม C)



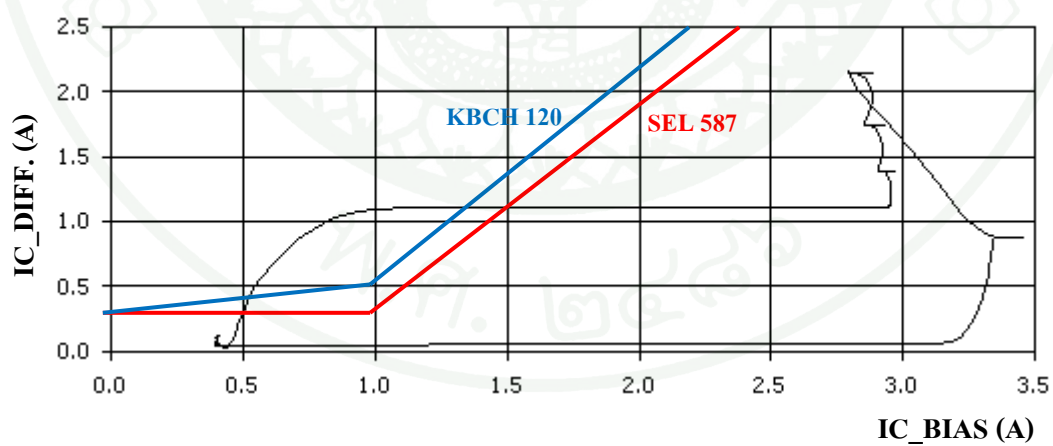
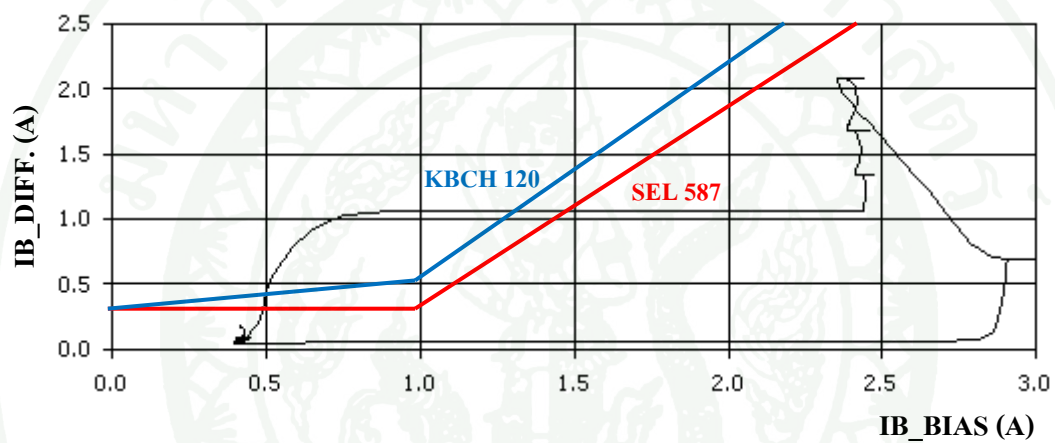
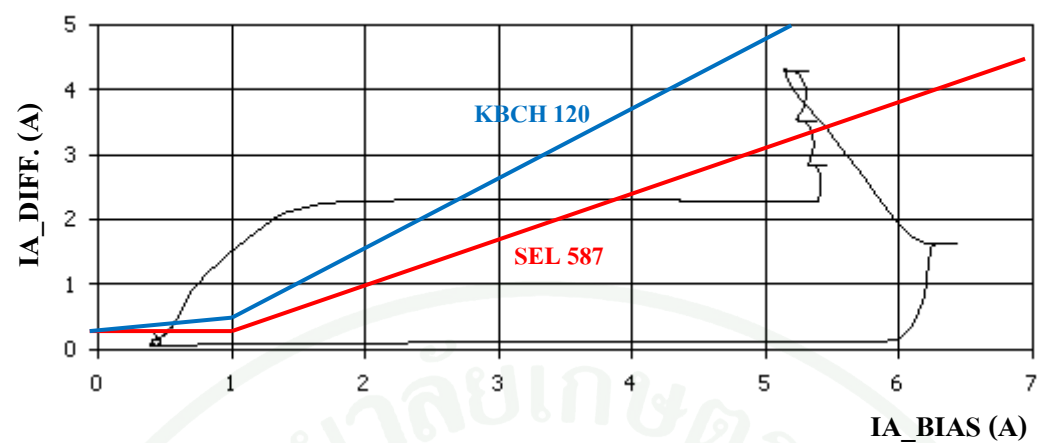
ภาพผนวกที่ 19 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา C1R80B120F1



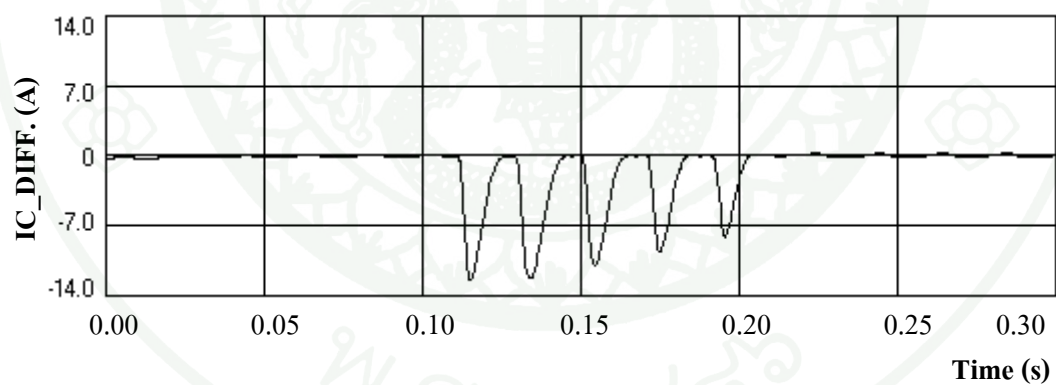
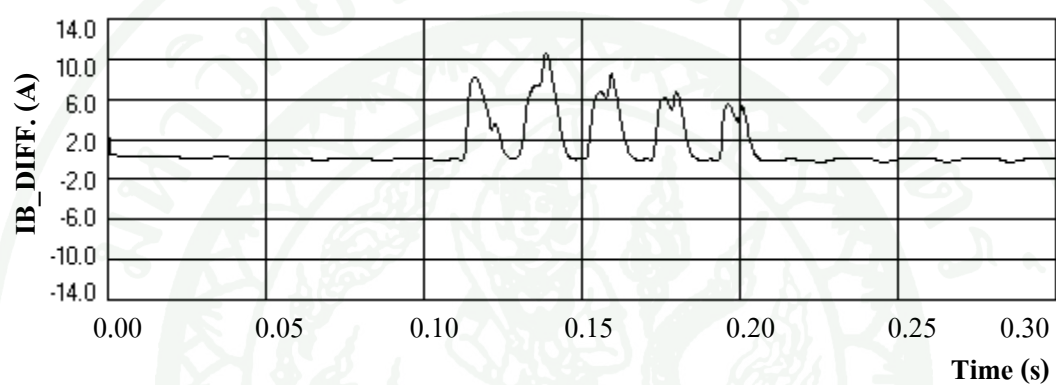
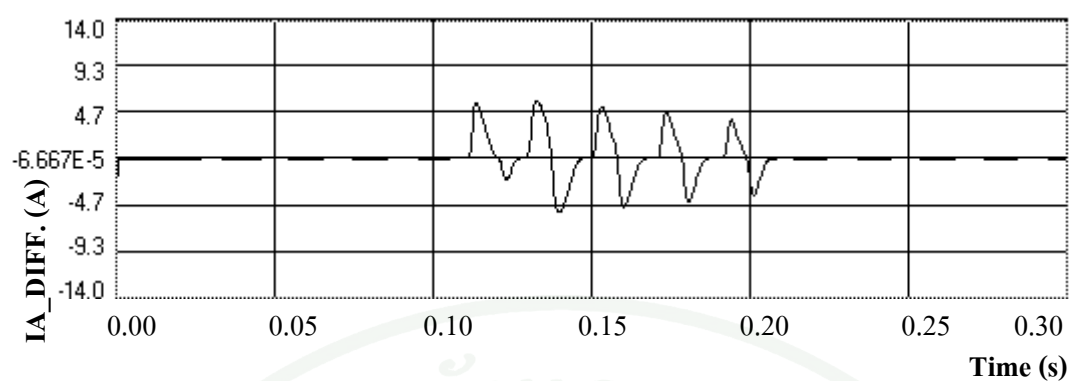
ภาพผนวกที่ 20 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา C1R80B120F1



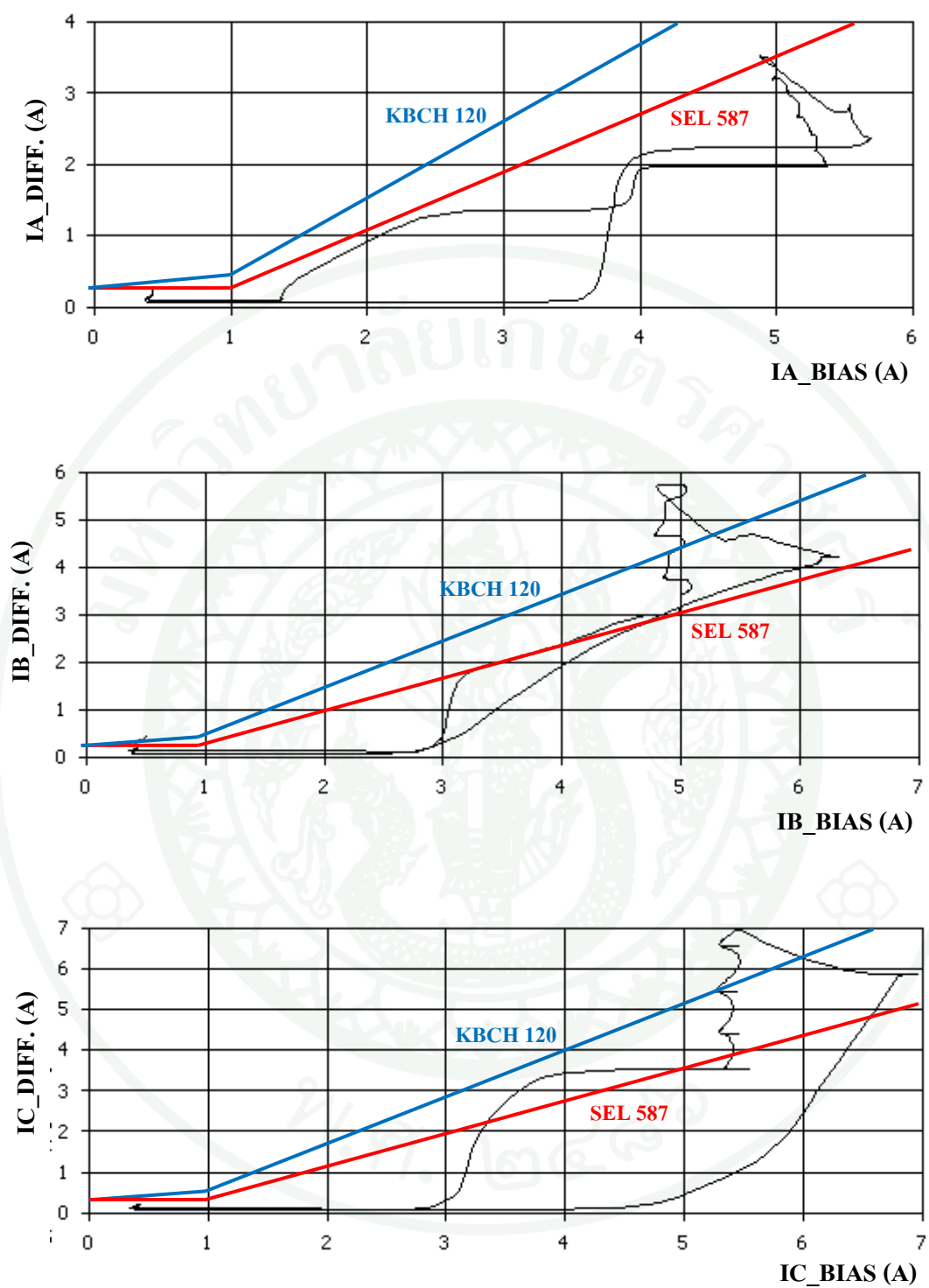
ภาพผนวกที่ ง21 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา C1R80B120F2



ภาพผนวกที่ ง22 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา C1R80B120F2

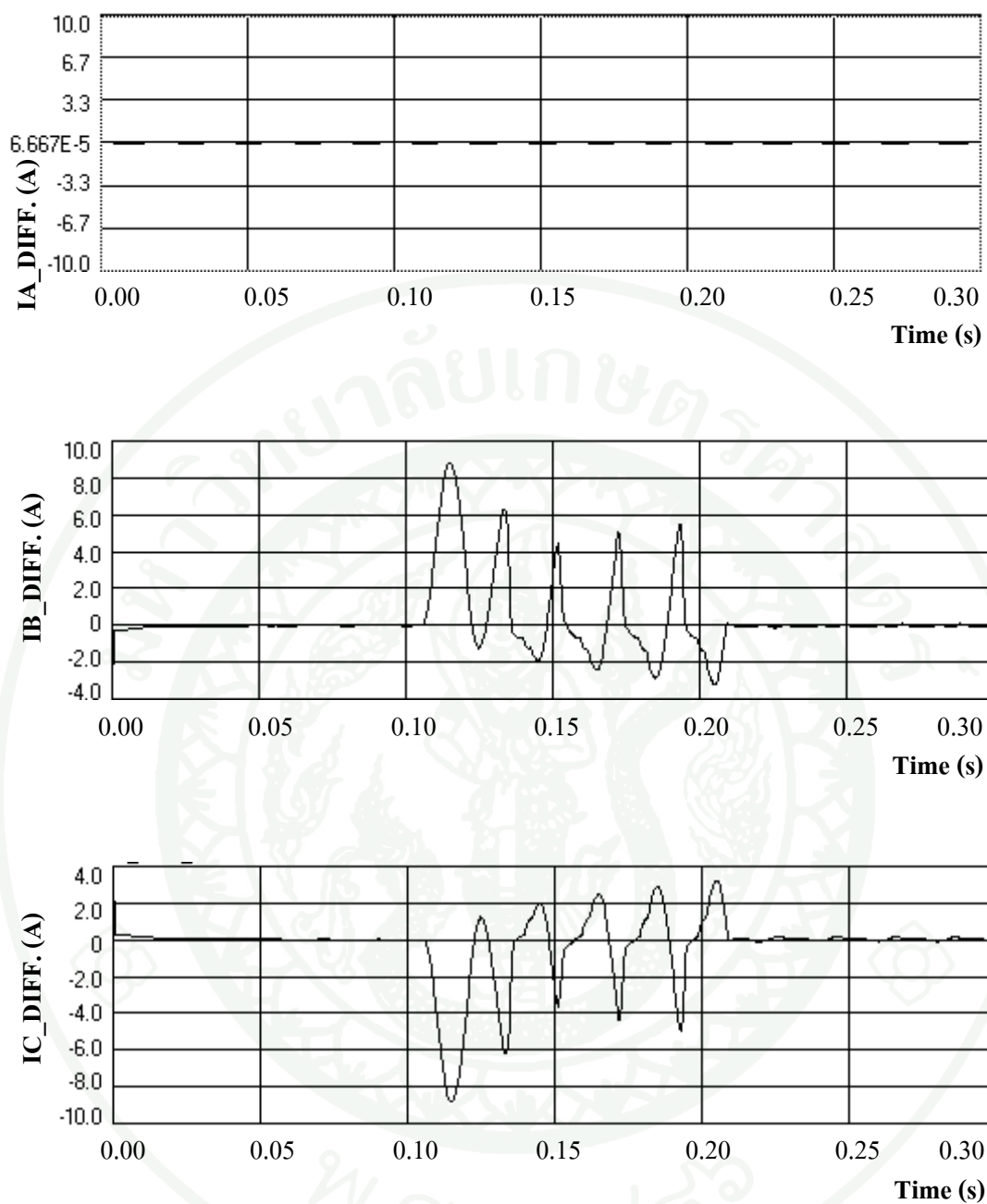


ภาพผนวกที่ ง23 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา C1R80B120F3

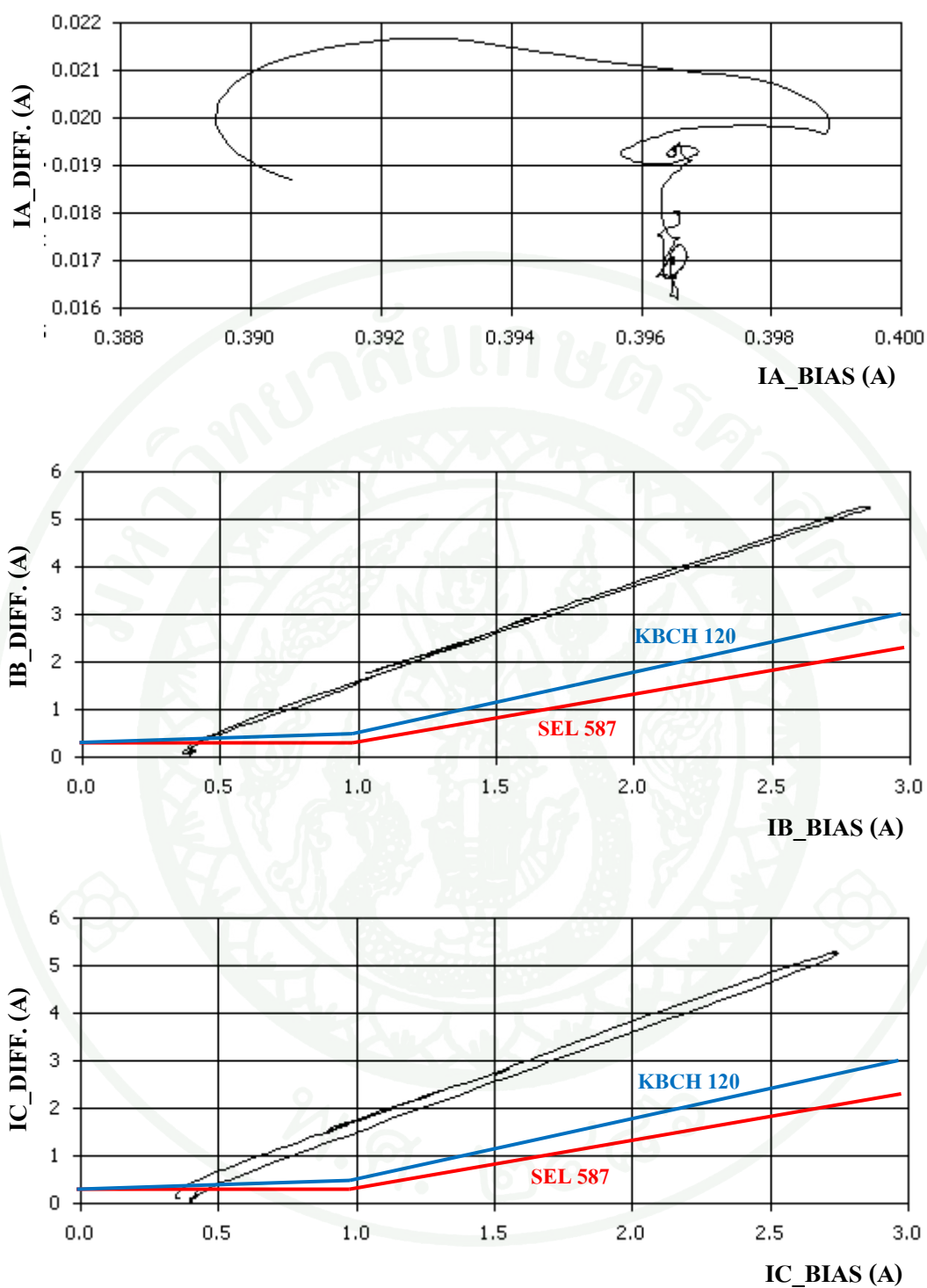


ภาพผนวกที่ ง24 Locus กระแสผลต่าง / กระแสด้านการทำงาน กรณีศึกษา C1R80B120F3

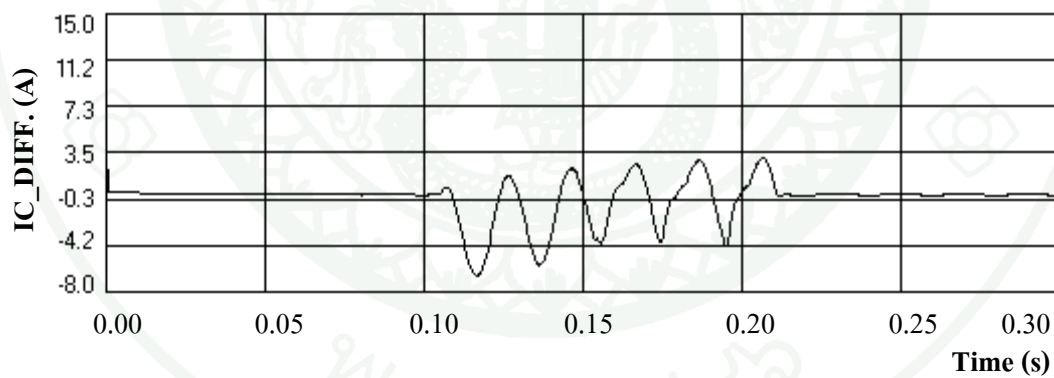
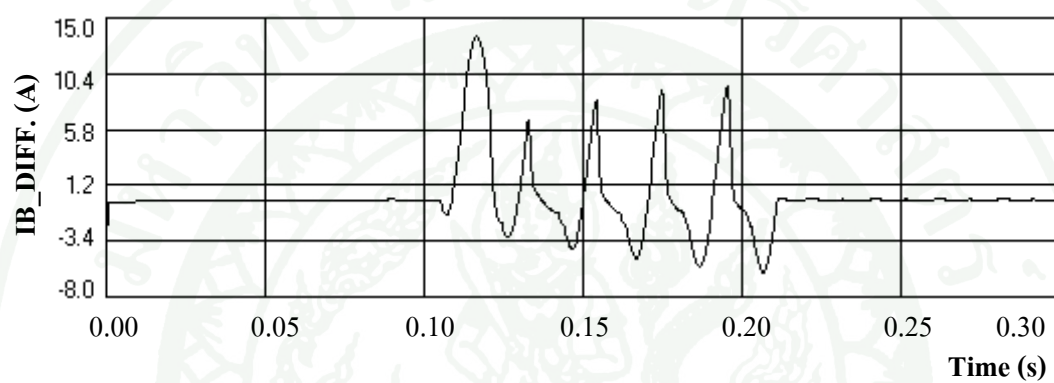
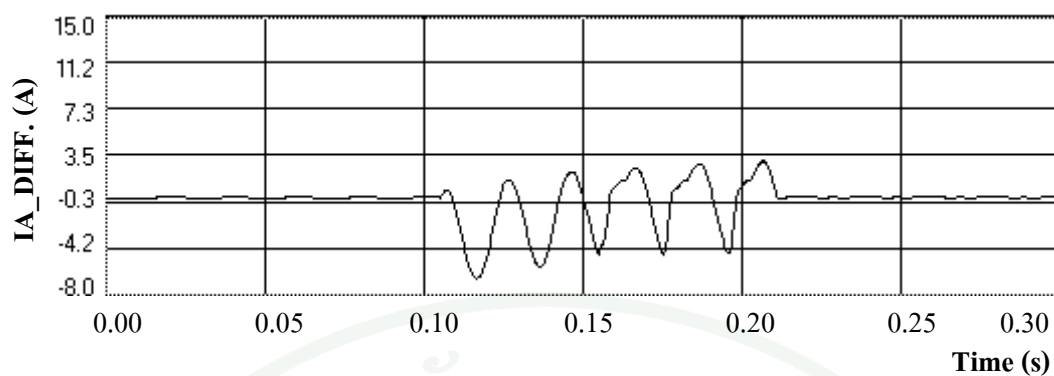
รูปคลื่นกระแผลต่าง, Locus กระแผลต่าง / กระแสด้านการทำงานของรีเลย์
(กรณีศึกษากลุ่ม D)



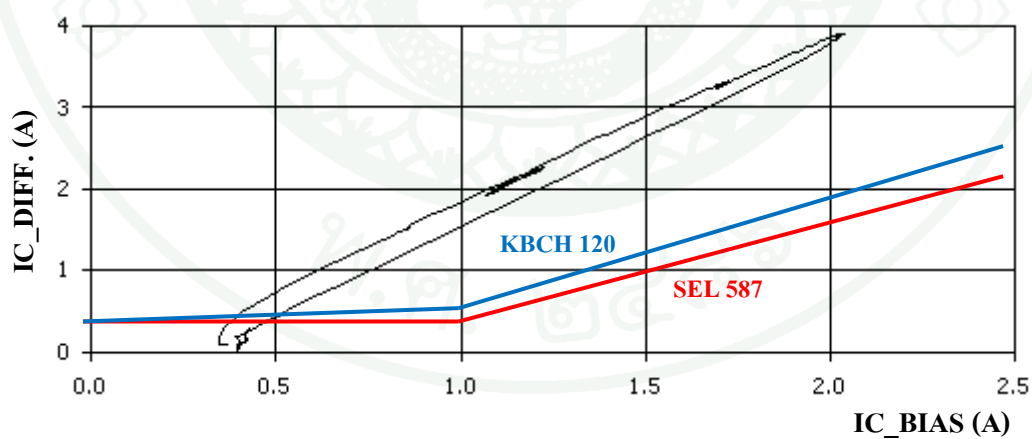
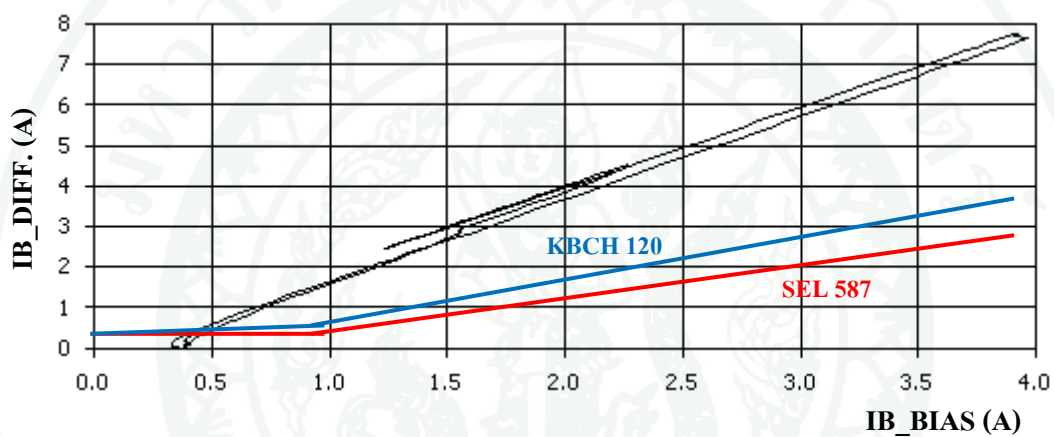
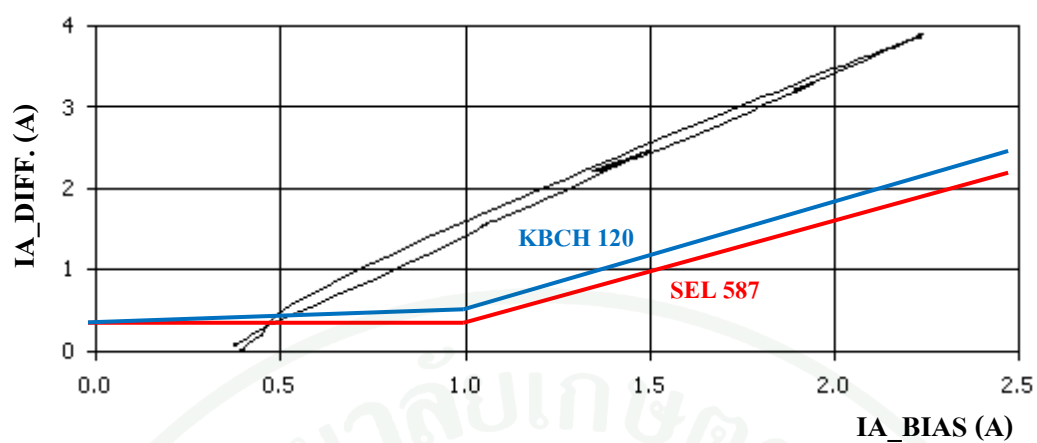
ภาพผนวกที่ 25 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา DB3F1



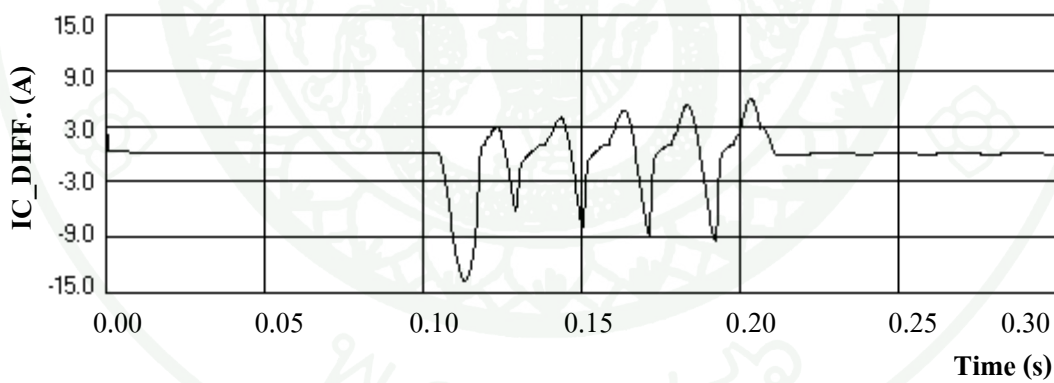
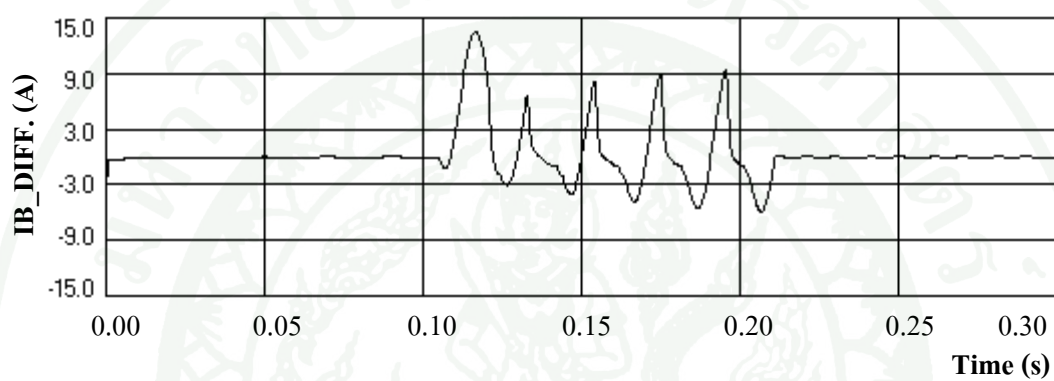
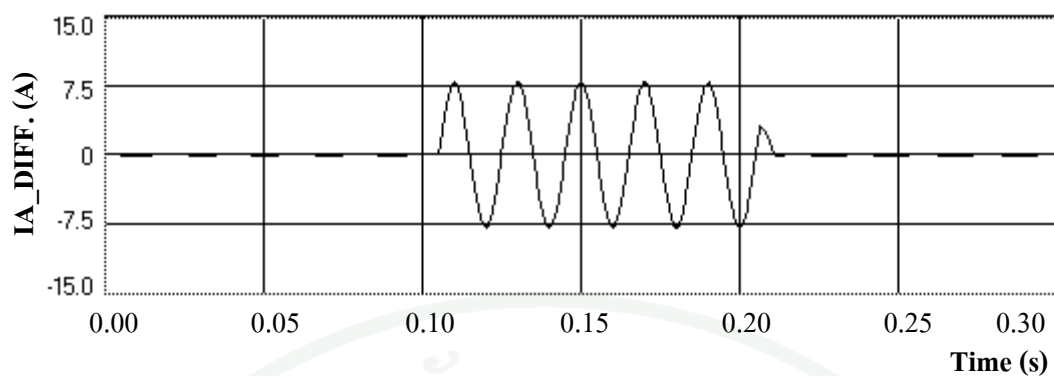
ภาพผนวกที่ 26 Locus กระแสผลต่าง / กระแสต้านการทำงาน กรณีศึกษา DB3F1



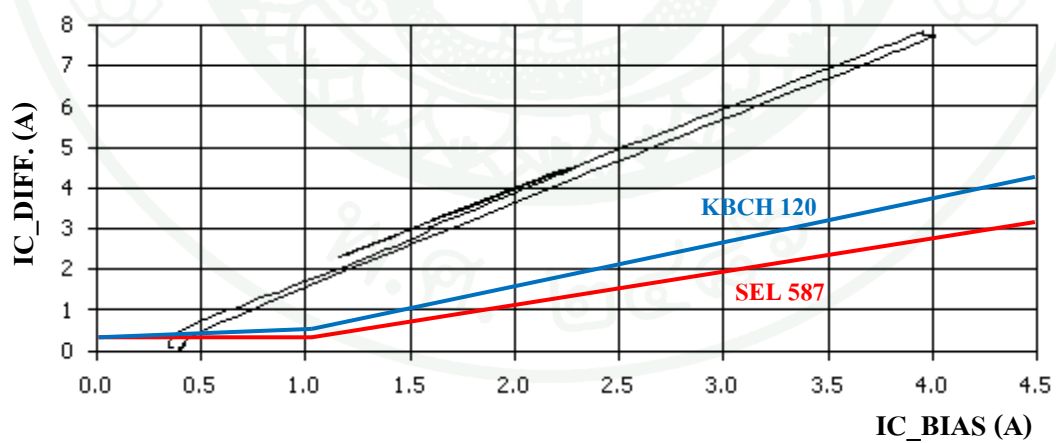
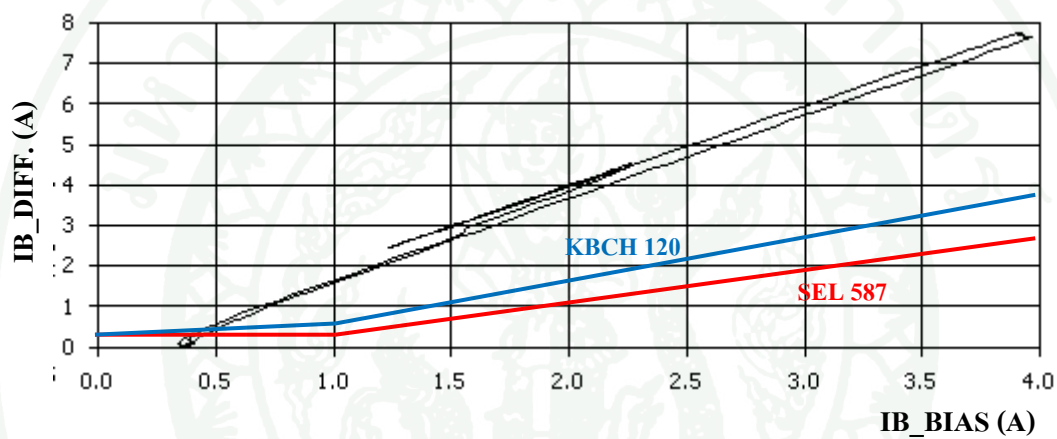
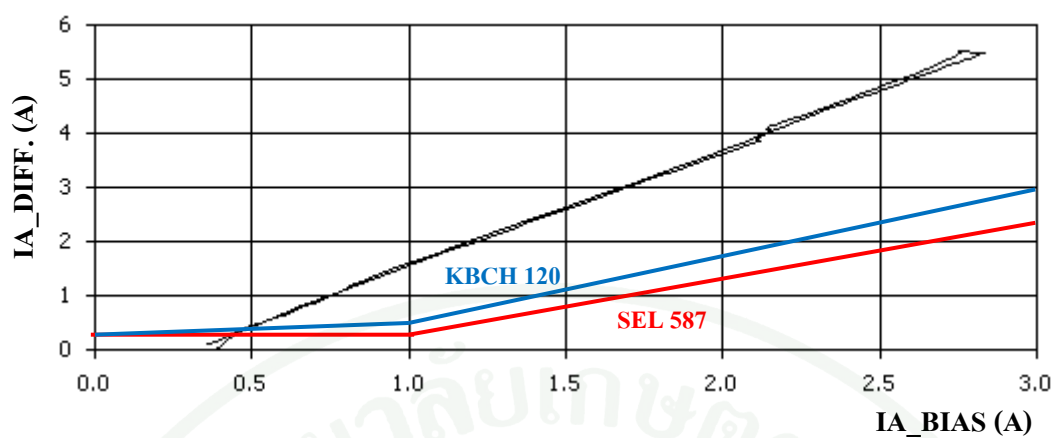
ภาพผนวกที่ ง27 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา DB3F2



ภาพผนวกที่ ง28 Locus กระแสผลต่าง / กระแสต้านการทำงาน กรณีศึกษา DB3F2



ภาพผนวกที่ ง29 รูปคลื่นกระแสผลต่าง กรณีศึกษา DB3F3



ภาพผนวกที่ 30 Locus กระแสผลต่าง / กระแสต้านการทำงาน กรณีศึกษา DB3F3

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายโสฬส อวยพร
เกิดวันที่	21 มีนาคม 2517
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (ไฟฟ้ากำลัง) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	หัวหน้าแผนกวิศวกรรมระบบป้องกัน
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	กองอุปกรณ์ป้องกันและรีเลย์ ฝ่ายก่อสร้างและบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	ได้รับรางวัลผลงานวิจัยระดับดี ประเภทบรรยาย ในการ ประชุมนำเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษาประจำปี การศึกษา 2555 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนโครงการความร่วมมือทางวิชาการและพัฒนาผู้เชี่ยวชาญ ระหว่าง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ระดับ ปริญญาโท (พ.ศ. 2553)