

การวิเคราะห์กระแสซิมพาทติกอินrush ระหว่างหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรม

ATP/EMTP

ANALYSIS OF SYMPATHETIC INRUSH CURRENT BETWEEN
TRANSFORMERS USING ATP/EMTP



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษากาหนดลัษฏสรปริญญาดิศวกรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาศาสตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-020-044

การวิเคราะห์กระแสซิมพาเทติกอินรัชระหว่างหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรม

ATP/EMTP

ANALYSIS OF SYMPATHETIC INRUSH CURRENT BETWEEN
TRANSFORMERS USING ATP/EMTP



เลขที่.....
เลขทะเบียน.....**79841**
น,เดือน,ปี....**18**...**พ.ย.**...**2551**

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

พ.ศ. 2551

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและข้อมูลเชิงวิจัยของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2008-EN-M-020-044

**ANALYSIS OF SYMPATHETIC INRUSH CURRENT BETWEEN
TRANSFORMERS USING ATP/EMTP**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 2008 มาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารฉบับนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบัน
KMITL-2008-EN-M-020-044



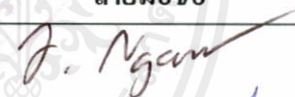


COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์กระแสซิมพาเทติกอินรัชระหว่างหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP
Analysis of Sympathetic Inrush Current Between Transformers Using ATP/EMTP

นักศึกษา นายเสกสรรค์ งามศรีตระกูล
รหัสประจำตัว 48060220
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อิสระชัย	งามหรรุ	
รศ.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
ดร.ชาย	ชมภูอินไหว	
รศ.ดร.พิชัย	อารีย์	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 7 มีนาคม 2551 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 2 ชั้น 3 อาคาร A

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.รวีวรรณ ชินะตระกูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๕๕.....เดือน.....๕/๓/๕๕.....พ.ศ.....๕๕๕/

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์กระแสซิมพาเทติกอินรัระหว่างหม้อแปลง โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP
นักศึกษา	นายเสกสรรค์ งามศรีตระกูล
รหัสประจำตัว	48060220
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ ฤณการ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอปรากฏการณ์กระแสซิมพาเทติกอินรัระหว่างหม้อแปลง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้จ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังในขณะที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าตัวอื่นทำงานอยู่ก่อนในระบบไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถทำให้รีเลย์แบบผลต่างทำงานผิดพลาดได้ กรณีศึกษาจะถูกจำลองขึ้นบนโปรแกรม ATP/EMTP เพื่อหาผลตอบสนองชั่วคราวของระบบ และได้อธิบายผลกระทบจากเส้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก แบบจำลองบนโปรแกรม ATP/EMTP สามารถให้ผลลัพธ์ของกระแสซิมพาเทติกอินรัอย่างแม่นยำ ซึ่งสามารถนำไปเป็นประโยชน์ในการพัฒนาระบบป้องกันสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Analysis of Sympathetic Inrush Current between Transformers using ATP/EMTP
Student	Mr.Seksun Ngamsritrakul
Student ID.	48060220
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Anantawat Kunakorn

ABSTRACT

This thesis presents the sympathetic inrush current between transformers. Such an inrush current occurs when a transformer is energized to a system which other transformers in the system have been already switched on. The sympathetic inrush current can lead to the misoperation of a differential relay. Case studies are performed and simulated using ATP/EMTP in order to determine the transient responses of the system. In addition, effects of B-H curve characteristics on the sympathetic inrush current are detailed. It is found that the ATP/EMTP model can give accurate results of the sympathetic inrush current. This will be very useful in the design of high efficient protection systems for power transformers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยความกรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่มีคุณค่าจาก รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ และ รศ.ดร. อิศระชัย งามหรุ รวมถึงอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้ความอนุเคราะห์แนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ จนผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตาความมีน้ำใจ

ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาเอก รวมถึงรุ่นพี่ปริญญาโทในห้องวิจัยทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือให้คำปรึกษาต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายต้องขอกราบเท้า คุณพ่อ จันทูย์ งามศรีตระกูล และคุณแม่ พรทิพย์ งามศรีตระกูล ผู้ให้กำเนิดลูก มอบ อดีต ปัจจุบัน และอนาคตให้กับผู้วิจัย ตลอดชีวิตที่ผ่านมาท่านทั้งสอง อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจในการต่อสู้กับชีวิต รวมถึงทุกคนในครอบครัวสำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจที่มีให้กับผู้วิจัยตลอดมา

สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

เสกสรรต์ งามศรีตระกูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 กระแสอินรัช.....	4
2.1 กระแสอินรัช.....	4
2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสอินรัช.....	7
2.1.2 กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟ.....	8
2.1.3 องค์ประกอบฮาร์มอนิกในรูปคลื่นกระแสอินรัช.....	12
2.2 เสถียรภาพของระบบรีเลย์ป้องกันชนิดผลต่างกระแสระหว่างกาเกิดกระแสอินรัช.....	13
2.2.1 การหน่วงเวลา.....	13
2.2.2 การตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิก.....	14
2.2.2.1 องค์ประกอบกระแสตรง.....	15
2.2.2.2 องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สอง.....	15
2.2.2.3 องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สาม.....	16
2.2.2.4 องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สูงกว่า.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 กระแสซิมพาเทติกอินรัช.....	18
3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของกระแสซิมพาเทติกอินรัช.....	18
3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสซิมพาเทติกอินรัช.....	21
3.2.1 ค่าความต้านทานของระบบ.....	21
3.2.2 ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	21
3.2.3 มุมของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายขณะจ่ายไฟ.....	21
3.2.4 ภาวะโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	21
บทที่ 4 ทฤษฎีและหลักการ ใช้โปรแกรม ATP/EMTP สำหรับจำลองสภาวะการเกิด กระแสซิมพาเทติกอินรัช.....	23
4.1 แบบจำลองของหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรมย่อย BCTRAN.....	28
4.2 การป้อนข้อมูลให้กับโปรแกรม BCTRAN.....	32
บทที่ 5 ผลการจำลองกระแสซิมพาเทติกอินรัช.....	34
5.1 เงื่อนไขการจำลอง.....	34
5.1.1 ผลกระทบจากมุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์.....	34
5.1.2 ผลกระทบจากภาวะโหลด.....	34
5.1.3 ผลกระทบจากค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	34
5.2 แบบจำลองกระแสซิมพาเทติกอินรัช.....	35
5.3 ผลการจำลอง.....	38
5.3.1 ผลกระทบจากมุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์.....	38
5.3.2 ผลกระทบจากภาวะโหลด.....	38
5.3.3 ผลกระทบจากค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	38
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	78
6.1 ลักษณะการเกิดกระแสซิมพาเทติกอินรัช.....	78
6.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัช.....	78
6.2.1 ผลกระทบจากมุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์.....	78

เอกสารนี้เป็นความลับ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.2 ผลกระทบจากภาวะโหด.....	78
6.2.3 ผลกระทบจากค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมิตัวของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	79
6.3 สิ่ง ที่ควรได้รับการพิจารณาต่อไป.....	79
เอกสารอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก ก.....	82
ภาคผนวก ข.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	93



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

4.1 แสดงผลการทดสอบของหม้อแปลง.....32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นแม่เหล็กกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ.....	4
2.2 ค่าฟลักซ์แม่เหล็กในสภาวะคงตัว.....	5
2.3 รูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น.....	6
2.4 กระแสอินรัชไม่ถูกยกขึ้นเนื่องจากผลของแกนเหล็กอิ่มตัว.....	7
2.5 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงจ่ายไฟฟ้า ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก.....	8
2.6 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงจ่ายไฟฟ้า ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอยู่ที่ค่าสูงสุด.....	9
2.7 แสดงรูปคลื่นกระแสอินรัชกระตุ้นแม่เหล็กทั่วไป.....	10
2.8 แสดงรูปคลื่นกระแสอินรัชทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในขดหนึ่งของการต่อแบบเคลด้าหรือด้านทุติยภูมิของการต่อแบบเคลด้าในหม้อแปลงกระแส.....	11
2.9 แสดงการชดเชยของรีเลย์ผลต่างสำหรับขดลวดทั้งสองในหม้อแปลงชนิดสตาร์/สตาร์.....	14
3.1 ลักษณะการเกิดกระแสชิมพาทิคอินรัชระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าสองตัวที่ต่อขนานจากบัสเดียวกัน.....	18
3.2 ตัวอย่างกระแสทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในปรากฏการณ์ชิมพาทิคอินรัช.....	20
4.1 วงจรที่ใช้อธิบายหลักการเทวินิน.....	24
4.2 วงจรเทียบเคียงของวงจรในรูป 4.1.....	25
4.3 วงจรเทวินินในรูปของ Sequence Quantities.....	25
4.4 วงจรเทวินินแบบ 3 เฟส ในรูปของ Phase Quantities.....	26
4.5 วงจร T แสดงถึงหม้อแปลง 2 ขดลวด.....	27
5.1 แสดงการต่อแบบจำลองการเกิดกระแสชิมพาทิคอินรัชในวงจรทดสอบกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาวะไหล.....	35
5.2 แสดงการต่อแบบจำลองการเกิดกระแสชิมพาทิคอินรัชในวงจรทดสอบกรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาวะไหล.....	36
5.3 แสดงการต่อแบบจำลองการเกิดกระแสชิมพาทิคอินรัชในโปรแกรม ATP/EMTP กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาวะไหล.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยพลังงานจันทบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.60 กระแสอินรีฟเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิมตัวปกติ.....	57
5.61 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิมตัวปกติ.....	57
5.62 กระแสซิมพาทะติคอินรีฟเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิมตัวปกติ.....	58
5.63 กระแสอินรีฟเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิมตัวปกติ.....	58
5.64 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิมตัวปกติ.....	58
5.65 กระแสซิมพาทะติคอินรีฟเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิมตัวปกติ.....	59
5.66 กระแสอินรีฟเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิมตัวปกติ.....	59
5.67 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิมตัวปกติ.....	59
5.68 กระแสซิมพาทะติคอินรีฟเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิมตัวปกติ.....	60
5.69 กระแสอินรีฟเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิมตัวปกติ.....	60
5.70 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิมตัวปกติ.....	60
5.71 กระแสซิมพาทะติคอินรีฟเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิมตัวปกติ.....	61
5.72 กระแสอินรีฟเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิมตัวปกติ.....	61
5.73 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิมตัวปกติ.....	61

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจันทบุรี และต้องอ้างอิงถึงเว็บไซต์เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.88 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว มีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ.....	66
5.89 กระแสซิมพาเทติกอินรีเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว มีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ.....	67
5.90 กระแสอินรีเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ.....	67
5.91 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว มีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ.....	67
5.92 กระแสซิมพาเทติกอินรีเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว มีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ.....	68
5.93 กระแสอินรีเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ.....	68
5.94 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว มีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ.....	68
5.95 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสอินรีเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด.....	69
5.96 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสอินรีเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด.....	69
5.97 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสซิมพาเทติกอินรีเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด.....	70
5.98 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสซิมพาเทติกอินรีเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด.....	70
5.99 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด.....	71
5.100 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด.....	71
5.101 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสอินรีเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด.....	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.102 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสอินรีเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด.....	72
5.103 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสซิมพาทาคติอินรีเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด.....	73
5.104 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสซิมพาทาคติอินรีเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด.....	73
5.105 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด.....	74
5.106 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด.....	74
5.107 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสอินรีเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด.....	75
5.108 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสอินรีเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด.....	75
5.109 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสซิมพาทาคติอินรีเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด.....	76
5.110 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสซิมพาทาคติอินรีเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด.....	76
5.111 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด.....	77
5.112 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด.....	77
6.1 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์แม่เหล็กกับกระแสหม้อแปลง.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นจึงมีการเชื่อมโยงโครงข่าย (Network) ของระบบไฟฟ้าเข้าด้วยกัน โดยที่สายส่งเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่ในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า (Power Plant) ไปยังผู้ใช้โดยผ่านส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น สถานีไฟฟ้า (Substation) เขตชุมชน เป็นต้น ในขณะเดียวกัน หม้อแปลงไฟฟ้า (Power Transformer) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญและมีราคาสูง ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากต่ำไปสูง เพื่อให้สามารถส่งจ่ายพลังงานไปได้ระยะทางไกลๆ และแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากสูงมาต่ำ เพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าปลายทาง ดังนั้นระบบป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีความสำคัญในการตัดแยกหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจากฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งตัวอย่างความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรภายใน คือ ขดลวดภายในเสียหายและอาจทำให้โครงสร้างภายนอกเสียหายจากแรงดันของน้ำมันหม้อแปลงที่ขยายตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรภายใน และเมื่อโครงสร้างภายนอกเสียหายจะให้น้ำมันซึ่งมีอุณหภูมิสูงรั่วออกมาสู่ภายนอกและอาจเกิดการลุกไหม้สร้างความเสียหายต่อไปได้อีก

ข้อจำกัดอย่างหนึ่งที่มีผลกับความเร็วในการทำงานของรีเลย์ป้องกันในปัจจุบันคือ กรณีการเกิดกระแสอินรัชซึ่งเกิดขึ้นขณะระบบทำการจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการเกิดกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นขณะเริ่มจ่ายไฟ (Energizing) ไม่ถือเป็นความผิดปกติในหม้อแปลง ซึ่งจะมีกระแสกระตุ้นแม่เหล็ก (Magnetizing Current) ขนาดสูงไหลเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเพียงด้านเดียว จนอาจทำให้ระบบป้องกันไฟฟ้าทำงานผิดพลาดเนื่องจากมองเห็นผลต่างของกระแสระหว่างขดลวดทั้งสองชุดของหม้อแปลงมีลักษณะคล้ายกรณีการเกิดฟอลต์ ดังนั้นจึงต้องมีการหน่วงเวลาให้รีเลย์เริ่มทำงานในช่วงเวลาหลังจากการเกิดกระแสอินรัช และศึกษาคุณลักษณะต่างๆของกระแสอินรัช ซึ่งในงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาได้มีการวิจัยแยกแยะความแตกต่างระหว่างฟอลต์ภายในกับกระแสอินรัชในกรณีที่ไม่นึกถึงผลกระทบระหว่างหม้อแปลง ซึ่งในทางปฏิบัติได้มีการต่อหม้อแปลงมากกว่าหนึ่งตัว ไม่ว่าจะหม้อแปลงจะต่อแบบ

ขนานหรือ ไม่ก็อนุกรมกับหม้อแปลงลูกอื่นที่ได้จ่ายไฟอยู่ก่อนจะแสดงผลของกระแสซิมพาเทติกอินรัช (Sympathetic Inrush Current) ซึ่งเป็นหนึ่งในเหตุผลที่ทำให้รีเลย์ป้องกันทำงานผิดพลาด ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งพิจารณาศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์การเกิดกระแสซิมพาเทติกอินรัช โดย

จะพิจารณาจากระบบที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าสองตัวต่อขนานจากบัสเดียวกันและใช้โปรแกรม ATP/EMTP ในการพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อขนาดของกระแสซิมพาทคอินรัช เพื่อช่วยในการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงให้มีความเหมาะสมต่อระบบมากยิ่งขึ้น และลดความผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงอันเกิดจากการแยกแยะความแตกต่างระหว่างฟอลต์ที่เกิดขึ้นจริงกับกระแสอินรัช

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์การเกิดกระแสซิมพาทคอินรัชที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีระบบที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าสองตัวต่อขนานจากบัสเดียวกัน และศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อขนาดของกระแสซิมพาทคอินรัช โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP มาช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวเป็นที่ยอมรับและใช้กันในงานวิจัยอย่างแพร่หลายสำหรับจำลองหาผลตอบสนองของหม้อแปลงในสภาวะทรานเซียนต์ รวมถึงการจำลองระบบไฟฟ้าและระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ตั้งสมมุติฐานของการศึกษา โดยอ้างอิงจากข้อมูลของระบบของการไฟฟ้าที่ใช้อยู่จริง เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การเกิดกระแสซิมพาทคอินรัช และวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของกระแสซิมพาทคอินรัช ที่อาจทำให้อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงทำงานผิดพลาดได้ ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการพัฒนาและเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงให้สามารถทำงานในกรณีที่มีการเกิดฟอลต์ แต่จะไม่ทำงานในสภาวะที่เกิดกระแสซิมพาทคอินรัช

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีแนวความคิดมาจากระบบไฟฟ้าที่มีหม้อแปลงมากกว่าหนึ่งตัวต่อเข้าด้วยกัน ไม่ว่าจะต่อกันแบบขนานหรือแบบอนุกรม ก็อาจทำให้เกิดกระแสซิมพาทคอินรัชขึ้น และส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงทำงานผิดพลาดได้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ทำการศึกษาลักษณะการเกิดกระแสซิมพาทคอินรัช โดยการใช้อุปกรณ์โปรแกรม ATP/EMTP มาช่วยในการจำลองระบบ ซึ่งอาศัยข้อมูลการจำลองโดยการอ้างอิงจากระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) รวมไปถึงข้อมูลทดสอบจริงของบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลง เพื่ออ้างอิงระบบที่ใช้ในการจำลองว่าอยู่บนพื้นฐานของระบบที่มีอยู่จริง จากนั้นทำการทดสอบหาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อขนาดของกระแสซิมพาทคอินรัช เพื่อนำมาวิเคราะห์และสรุปลักษณะการเกิดกระแสซิมพาทคอินรัช

พาเทคนิคอินรัช และวิเคราะห์หาเหตุผลที่ทำให้ปัจจัยต่างๆมีผลต่อขนาดของกระแสซึมพาเทคนิคอินรัช เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาระบบป้องกันสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1 ศึกษาลักษณะการเกิดกระแสซึมพาเทคนิคอินรัช เพื่อคุณลักษณะรูปคลื่นของกระแสอย่างไร
- 2 ศึกษาเว็บไซต์ไออะแกรมของ EGAT รวมไปถึงข้อมูลทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้ามหาสารคาม (MK) [1]
- 3 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม ATP/EMTP ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับจำลองหาผลตอบสนองของหม้อแปลงในสภาวะทรานเซียนต์ รวมถึงการจำลองระบบไฟฟ้าและระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เพื่อนำมาช่วยในการจำลองหากระแสซึมพาเทคนิคอินรัช
- 4 ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อขนาดของกระแสซึมพาเทคนิคอินรัช
- 5 วิเคราะห์และสรุปผลการจำลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

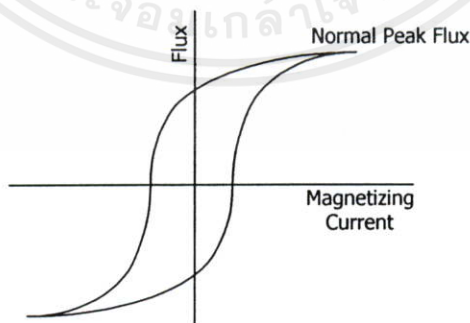
บทที่ 2

กระแสอินรัช

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาปรากฏการณ์กระแสชิมพาเทติกอินรัชระหว่างหม้อแปลง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้จ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังในขณะที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าตัวอื่นจ่ายไฟฟ้าอยู่ก่อนหน้า ดังนั้นก่อนที่จะกล่าวถึงปรากฏการณ์กระแสชิมพาเทติกอินรัชระหว่างหม้อแปลง จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับปรากฏการณ์การเกิดกระแสกระตุ้นแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายไฟ ที่เรียกกันทั่วไปว่า กระแสอินรัช ซึ่งในบทนี้จะอธิบายถึงความสำคัญในการศึกษาลักษณะของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า

2.1 กระแสอินรัช (Magnetizing Inrush Current) [2, 6]

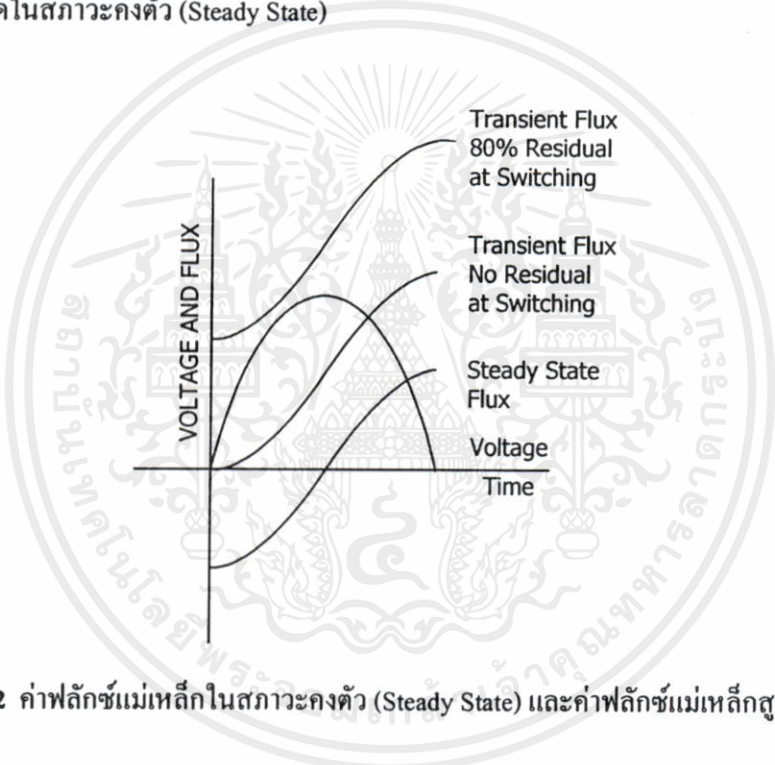
ปรากฏการณ์ที่มีกระแสรานเซียนต์พุ่งเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิในช่วงแรก ขณะที่หม้อแปลงเริ่มมีการจ่ายไฟ (Energizing) และยังคงสภาพของขนาดกระแสที่พุ่งเข้าดังกล่าวในช่วงเวลาตั้งแต่ 100ms ไปจนถึงหลายๆ นาที นั้นเรียกว่า กระแสอินรัช ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ไม่ใช่ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง แต่เนื่องจากมีลักษณะการเกิดกระแสผลต่างระหว่างขดลวดทั้งสองของหม้อแปลงคล้ายการเกิดฟลัดต์ จึงอาจทำให้ระบบป้องกันไฟฟ้าทำงานผิดพลาดได้ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดดังกล่าว ในการออกแบบระบบป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้า จำเป็นจะต้องศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของกระแสอินรัช เพื่อนำไปพัฒนาระบบป้องกันให้ทำงานขณะเกิดฟลัดต์ขึ้นภายในโซนป้องกัน แต่จะต้องไม่ทำงานตลอดช่วงเวลาที่เกิดสภาวะทรานเซียนต์ของกระแสอินรัช



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นแม่เหล็กกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

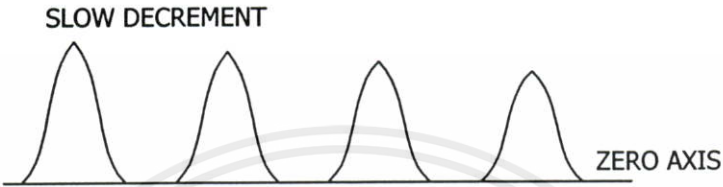
เมื่อพิจารณาตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ที่ถูกจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับคงที่ สังเกตได้ว่าขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับคลื่นในวงจรแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจะเริ่มต้นจากค่ายอด (Peak) สูงสุดทางด้านลบและเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่ายอดที่เท่ากันของด้านบวกภายในช่วงเวลาครึ่งไซเคิลของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ซึ่งถือเป็นการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยมีขนาดเป็นสองเท่าของค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในช่วงเวลาครึ่งไซเคิลของแรงดันไฟฟ้า จากกราฟฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะสภาวะคงตัวในรูปที่ 2.2 สังเกตได้ว่าที่ตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นในช่วงครึ่งไซเคิลแรกจะมีค่าแกว่งไปมาทั้งในซีกลบและซีกบวก แต่ถ้าฟลักซ์แม่เหล็กเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์ขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ตรงตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าประมาณ 2 เท่าของค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในสภาวะคงตัว (Steady State)



รูปที่ 2.2 ค่าฟลักซ์แม่เหล็กในสภาวะคงตัว (Steady State) และค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด

จากคำอธิบายข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ในตัวเหนี่ยวนำที่มีลักษณะเชิงเส้น ยกตัวอย่างเช่น ตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนอากาศ กระแสจะไหลเพิ่มสูงขึ้นจนมีขนาดประมาณสองเท่าของค่ากระแสในสภาวะคงตัว อย่างไรก็ตามขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนเหล็ก ซึ่งโดยปกติจะมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดอยู่ใกล้กับจุดอิ่มตัว (Saturation) ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กถึงสองเท่าย่อมทำให้เกิดการอิ่มตัวอย่างมากในแกนเหล็ก และจะทำให้กระแสกระตุ้นแม่เหล็กมีขนาดสูงขึ้นอย่างมาก จนอาจมีค่ามากกว่ากระแสเต็มพิกัด โดยเรียกกระแสกระตุ้นแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระแสอินรัช เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างยังสามารถทำให้ขนาดของกระแสอินรัชมีค่าสูงมากขึ้น โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.2 แทนที่ค่าฟลักซ์แม่เหล็กขณะเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ให้สมมติว่ามีค่าของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างเริ่มต้นค่าหนึ่งและอยู่ในทิศเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก โดยกำหนดให้อัตราการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กเท่าเดิม จะพบว่าในช่วงครึ่งไซเคิลแรกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ได้ใหม่จะมีค่าสูงถึง 2.8 เท่าของค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในสภาวะคงตัว เมื่อกำหนดให้ค่าฟลักซ์ตกค้างมีค่าประมาณ 80% ของค่าสูงสุดในสภาวะคงตัว



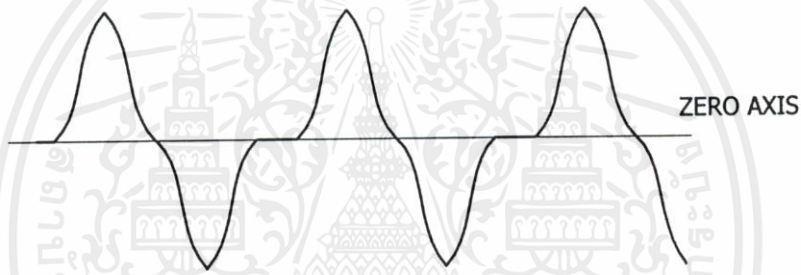
รูปที่ 2.3 รูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น

ค่าความหนาแน่นสูงของฟลักซ์แม่เหล็กที่อยู่ในแกนเหล็กดังแสดงข้างต้นนั้นมีค่าสูงเกินกว่าย่านทำงานปกติ ที่กำหนดให้อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความซึมซาบแม่เหล็กในแกนเหล็กมีค่าคงที่ และค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ของขดลวดมีค่าต่ำลงจนใกล้เคียงค่าของตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนอากาศ ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นพบว่ากระแสจะเริ่มต้นจากศูนย์และค่อยเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงแรก ค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงกว่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างเล็กน้อย และค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเหล็กมีค่าสูงขึ้นพอประมาณ ต่อมาเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กมีค่ามากเกินไปจนการทำงานปกติและเข้าสู่ช่วงสนามแม่เหล็กอิ่มตัวสูงตามคุณลักษณะการกระตุ้นแม่เหล็ก (The Magnetizing Characteristic) ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จะลดลงและกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าสูงสุดในช่วงครึ่งไซเคิลแรกของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอาจจะมีค่าสูงถึง 500 เท่าของกระแสในสภาวะคงตัว ต่อมาเมื่อผ่านช่วงฟลักซ์สูงสุด ณ ตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ในช่วงครึ่งไซเคิลหลังนี้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านลบจะทำให้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กลดลงไปยังตำแหน่งเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง โดยกระแสอินรัชจะลดลงจนเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.3 รูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะซ้ำๆ กัน โดยรูปคลื่นนี้จะค่อยๆ เข้าสู่สภาวะคงตัวโดยอาศัยค่าความสูญเสียในวงจรไฟฟ้าที่เกิดจากความต้านทานระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าเท่านั้น สำหรับค่าคงที่เวลา (Time Constant) ของกระแสทรานเซียนต์นี้ อาจเริ่มต้นจาก 0.1 วินาทีสำหรับหม้อแปลงขนาดประมาณ 100 kVA ไปจนกระทั่งถึง 1 วินาทีสำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามจากคุณลักษณะการกระตุ้นแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) และไม่เป็นฟังก์ชัน Exponential ที่ชัดเจน จึงทำให้สามารถเห็นผลของกระแสอินรัชนานถึง 30 นาทีหลังการสับเซอร์กิตเบรกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่สามารถแจกจ่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการสวิตช์ซึ่งที่ตำแหน่งอื่นๆ บนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ได้ค่ากระแสทรานเซียนต์ที่ต่ำลงไป และถ้าตำแหน่งการสวิตช์ซึ่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้านั้นทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในสภาวะคงตัวก่อนการสวิตช์ซึ่ง ก็จะทำให้ไม่เกิดผลของกระแสอินรัชเกิดขึ้น โดยกระแสที่ได้จะมีลักษณะเหมือนกับกระแสขณะไม่มีโหลดทันที

ในกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ตำแหน่งการสวิตช์ซึ่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีความแตกต่างกัน ดังนั้นรูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นก็จะมีลักษณะแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้รูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นจะยังได้รับผลกระทบจากฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับคล่องระหว่างเฟส อันเนื่องมาจากการรวมกันของฟลักซ์แม่เหล็กทุกเฟสในแกนเหล็ก ซึ่งในกรณีนี้หากเฟสใดเฟสหนึ่งทำการสวิตช์ซึ่งตรงตำแหน่งที่ไม่ทำให้เกิดผลของกระแสอินรัชขณะจ่ายไฟนั้น ก็ยังจะได้รับผลของกระแสอินรัชจากเฟสอื่น ดังนั้นในกรณีนี้ถึงแม้ว่ารูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นจะไม่ถูกยกจากแกนนอน แต่จะมีความบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระแสอินรัชไม่ถูกยกขึ้น (Offset) เนื่องจากผลของแกนเหล็กอิ่มตัว

จากลักษณะการเกิดของกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเริ่มจ่ายไฟ ซึ่งเกิดขึ้นจากผลของฟลักซ์แม่เหล็กที่อิ่มตัวในแกนเหล็ก ส่งผลให้เกิดกระแสกระตุ้นแม่เหล็กสูงมากไหลเข้าหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งอาจมีค่าสูง 8 ถึง 30 เท่าของกระแสปกติหม้อแปลง โดยลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับฟอลต์ภายในโซนป้องกันของหม้อแปลงที่มีผลต่างระหว่างกระแสไหลเข้ากับกระแสไหลออก ซึ่งสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและคาบ (Duration) ของกระแสอินรัช ได้ดังนี้

2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสอินรัช [4]

1. ขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ขนาดพิกัดของระบบไฟฟ้า
3. ค่าความต้านทานในระบบไฟฟ้าระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า

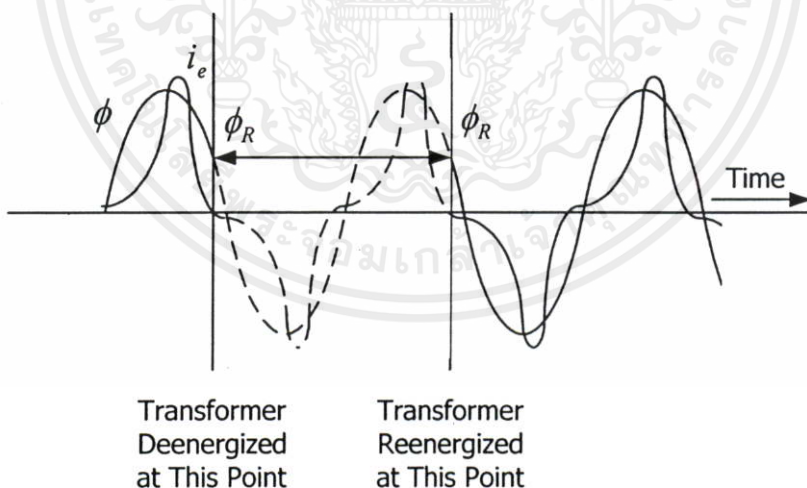
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า การทำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ชนิดของแกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าความเข้มในการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็ก (Saturation Density)
5. ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงไฟฟ้า (Residual Flux)
6. วิธีการจ่ายไฟ

นอกเหนือจากกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจ่ายไฟแล้ว กระแสอินรัชยังสามารถเกิดขึ้นขณะจ่ายไฟของหม้อแปลงตัวอื่นๆ ที่อยู่ในระบบไฟฟ้า หรือการปลดโหลดออกจากหม้อแปลงอย่างทันทีทันใด ซึ่งสามารถแบ่งกระแสอินรัชตามลักษณะการเกิดได้ดังนี้

2.1.2 กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟ (Initial Inrush)

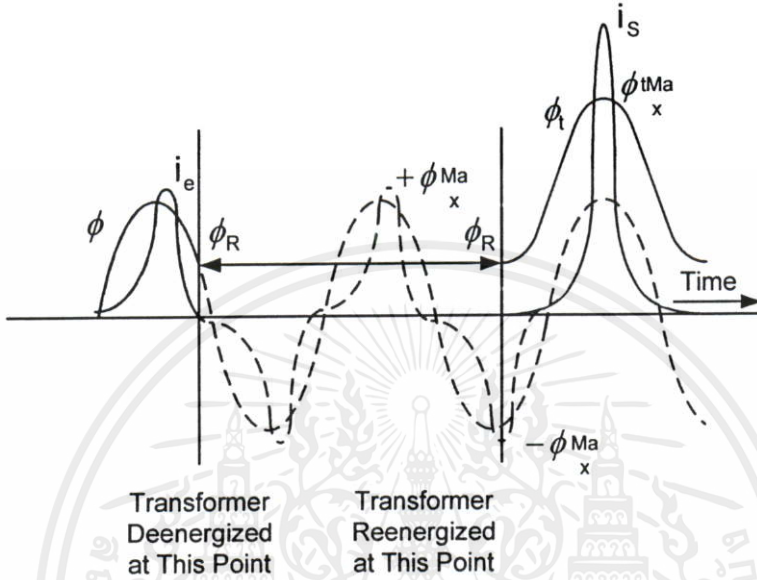
เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าถูกปลดออกจากระบบไฟฟ้า กระแสกระตุ้นแม่เหล็กจะลดลงเป็นศูนย์ ส่วนฟลักซ์แม่เหล็กจะค่อยๆ ลดลงตาม Hysteresis Loop จนเหลือค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ϕ_R (ดังแสดงในรูป 2.5) ต่อมาเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟอีกครั้ง ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ค่าฟลักซ์แม่เหล็กมีความต่อเนื่องจากตำแหน่งที่ปลดหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบนั้น ก็จะไม่ปรากฏของกระแสกระตุ้นแม่เหล็กทรานเซียนต์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.5) อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ แทบเป็นไปไม่ได้ที่อุปกรณ์ตัดต่อจะควบคุมตำแหน่งการสวิตช์ซึ่งได้ ดังนั้นกระแสทรานเซียนต์อินรัชที่เกิดขึ้นจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้



รูปที่ 2.5 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงจ่ายไฟซ้ำ ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ที่มีค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ในรูปที่ 2.6 สมมุติให้หม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟอีกครั้ง ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่ำสุด ($-\phi_{max}$) ซึ่ง ณ ตำแหน่งดังกล่าว ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง

(Residual Flux) ก่อนการปลดวงจรมีค่าเป็นบวกประมาณ 50% แต่เนื่องจากคุณสมบัติของฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทันทีทันใด ดังนั้นรูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นแทนที่จะเริ่มต้นจากจุด $-\phi_{\max}$ และค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปตามเส้นประ ก็จะเริ่มต้นจากค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างและค่อยๆ เพิ่มขึ้นไปตามเส้นกราฟ ϕ ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงจ่ายไฟฟ้า ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอยู่ที่ค่าสูงสุด

สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน, ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสกระตุ้นแม่เหล็กสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1 [5]

$$V_p \sin(\omega t + \theta) = i_0 R_1 + N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.1)$$

โดยที่

V_p = ค่าสูงสุดของแรงดัน

θ = มุมของแรงดันขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์

i_0 = ค่ากระแสกระตุ้นชั่วขณะ

ϕ_m = ค่าฟลักซ์แม่เหล็กชั่วขณะ ณ เวลา t

R_1 = ค่าความต้านทานทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

N_1 = จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งให้ทราบถึงเหตุผลและวัตถุประสงค์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

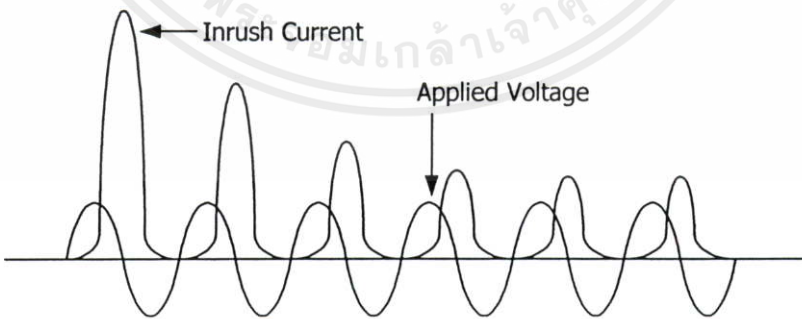
เส้นกราฟ ϕ ที่เกิดขึ้นมีความบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นซายน์ปกติ เป็นผลเนื่องมาจากคุณลักษณะของสภาพการอิ่มตัวในวงจรแม่เหล็ก (The Magnetic Circuit's Saturation Characteristic) โดยทางทฤษฎีกล่าวได้ว่า [4]

$$\phi_{\max} = \pm(|\phi_R| + 2|\phi_{\max}|) \quad (2.2)$$

ส่วนในการออกแบบหม้อแปลงตามหลักเศรษฐศาสตร์ ค่าความเข้มการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็กที่ประหยัดที่สุด (Economical Saturation Density) ϕ_s จะไม่ได้ออกแบบเพื่อไว้มากนัก ดังนั้นค่ายอดของฟลักซ์แม่เหล็ก ϕ จะทำให้เกิดการอิ่มตัวด้วยความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (Supersaturation) ในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งผลที่ได้ทำให้เกิดกระแสกระตุ้นแม่เหล็กสูงมาก ดังรูปที่ 2.6

ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ϕ_R คือฟลักซ์แม่เหล็กที่ยังคงตกค้างอยู่ในแกนเหล็กหลังจากปลดไฟออกจากหม้อแปลงไฟฟ้า โดยกระแสจะไหลต่อไปอีกชั่วขณะหลังจากแรงดันไฟฟ้าถูกปลดออก ค่าฟลักซ์จะค่อยๆ ลดลงตาม Hysteresis Loop จนเหลือค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ϕ_R เมื่อกระแสมีค่าเป็นศูนย์ และในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ค่าฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสจะมีมุมต่างกัน 120° จึงทำให้ถ้าเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับ $+\phi_R$ อีก 2 เฟสที่เหลือจะมีค่าเท่ากับ $-\phi_R$ โดยผลลัพธ์ของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นจะเป็นผลมาจากค่าของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ณ ตำแหน่งแรงดันที่ทำการสวิตซ์ซึ่งรวมกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้

รูปคลื่นของกระแสอินรัชทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.7 ในช่วง 2-3 ไซเคิลแรก ขนาดของกระแสอินรัชจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากนั้นกระแสจะลดลงช้าๆ อาจกินเวลาหลายวินาทีในกรณีที่ค่าความต้านทานระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าต่ำ



รูปที่ 2.7 แสดงรูปคลื่นกระแสอินรัชกระตุ้นแม่เหล็กทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับความรู้ในงานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ค่าคงที่เวลา (Time Constant) ซึ่งโดยปกติมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าเหนี่ยวนำกับค่าความ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลเหล่านี้ และต้องอ้างถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้
 ด้านทาน (L/R) แต่สำหรับในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำ (L)

สามารถเปลี่ยนแปลงตามค่าความอิ่มตัวแม่เหล็กในแกนเหล็กหม้อแปลง (Transformer Saturation) โดยในระหว่าง 2-3 ไซเคิลแรก ค่าความอิ่มตัวแม่เหล็กจะมีค่าสูง ซึ่งเป็นผลให้ค่าความเหนี่ยวนำ (L) มีค่าต่ำ ต่อมาเมื่อในวงจรมีความต้านทาน (Losses Damp) เกิดขึ้น ทำให้ค่าความอิ่มตัวแม่เหล็กลดลง เป็นผลให้ค่าความเหนี่ยวนำ (L) มีค่าเพิ่มขึ้น

จากรายงาน AIEE (American Institute of Electrical Engineers) ปี ค.ศ. 1951 ระบุว่าค่าคงที่เวลาสำหรับกระแสอินรัชมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10 ไซเคิล สำหรับหม้อแปลงขนาดเล็ก ไปจนถึง 1 นาทีสำหรับหม้อแปลงขนาดใหญ่

ค่าความต้านทานระหว่างแหล่งกำเนิดกับตัวหม้อแปลงเป็นอีกปัจจัยหลักในการกำหนดอัตราการลดลง (Damping) ของรูปคลื่นกระแส โดยหม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีช่วงการเกิดกระแสอินรัชยาวนานกว่าเนื่องจากค่าความต้านทานต่ำ ซึ่งคล้ายกันกับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ก็จะมีช่วงของกระแสอินรัชที่ยาวนาน เนื่องจากมีค่าความเหนี่ยวนำที่สูงกว่า ในทางตรงกันข้ามสถานีไฟฟ้าที่อยู่ไกลออกไป กระแสอินรัชจะเกิดขึ้นไม่นานเนื่องจากค่าความต้านทานของสายส่งจะช่วยให้กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นลดลงอย่างรวดเร็ว

นอกเหนือจากเงื่อนไขดังกล่าวซึ่งมีผลกระทบต่อกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวแล้ว รูปคลื่นกระแสอินรัชในขดลวดที่ต่อแบบเดลต้าของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ยังได้รับผลกระทบจากจำนวนของแกนเหล็กและผลรวมเวกเตอร์ของกระแสในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเริ่มต้นจากกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีแกนเหล็กมากกว่าหนึ่ง กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสจะมีมุมแตกต่างกัน 120° จะทำให้รูปคลื่นของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นปกติ และรูปคลื่นกระแสรวมมีลักษณะคล้ายการแกว่ง (Oscillatory) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ต่อมาถ้ารูปคลื่นของกระแสอินรัชแบบหลายเฟส หรือ เฟสเดียวในขดลวดแบบเดลต้า ซึ่งได้รับผลกระทบจากธรรมชาติของกระแสในสายส่ง ที่เกิดจากการรวมกันของเวกเตอร์กระแสระหว่างเฟส (L-L) หากสมมติว่ามีแกนเหล็กเพียงแกนเดียวที่อิ่มตัว ธรรมชาติของกระแสในสายส่งจะทำให้รูปคลื่นที่เกิดขึ้นแกว่งไปมาและบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นปกติ



รูปที่ 2.8 แสดงรูปคลื่นกระแสอินรัชทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในขดหนึ่งของการต่อแบบเดลต้า หรือ ด้านทุติยภูมิของการต่อแบบเดลต้าในหม้อแปลงกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 องค์ประกอบฮาร์มอนิกในรูปคลื่นกระแสอินรัช (Harmonic content of inrush waveform)

หลังจากที่ได้ทราบเกี่ยวกับลักษณะการเกิดกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้า แล้วนอกจากจะพบว่ากระแสอินรัชเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าหรือตัวเหนี่ยวนำซึ่งแทบไม่มีโอกาสหลีกเลี่ยงได้ กระแสอินรัชที่มีขนาดสูงที่สุดเกิดขึ้นในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟครั้งแรก ดังนั้นเพื่อพัฒนาระบบรีเลย์ป้องกันของหม้อแปลงให้สามารถที่จะเรียนรู้และวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชกับกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของรูปคลื่นกระแสอินรัชที่แตกต่างจากกระแสฟอลต์ การวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์มอนิกเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างรูปคลื่นกระแสทั้งสองได้อย่างชัดเจน

รูปคลื่นของกระแสกระตุ้นแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วยสัดส่วนของฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ซึ่งมีจำนวนมากขึ้นตามปริมาณความหนาแน่นของค่าสูงสุดของฟลักซ์แม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดอิ่มตัวของแกนเหล็ก เมื่อรูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นมีลักษณะสมมาตรกับแกนนอน องค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะมีเพียงองค์ประกอบฮาร์มอนิกเฉพาะลำดับที่เป็นเลขคี่เท่านั้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นคุณสมบัติทั่วไปที่เกิดขึ้นเมื่อรูปคลื่นกระแสสลับไหลผ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่มีคุณสมบัติขั้วไฟฟ้า (Directional Polarizing) โดยขณะที่หม้อแปลงอยู่ในสภาวะอิ่มตัว กระแสไฟฟ้าที่ไหลในหม้อแปลงจะประกอบจากองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เป็นเลขคี่ลำดับอื่นๆ ที่สูงขึ้นไปอีกเล็กน้อย ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่มากขึ้นจะสัมพันธ์กับสภาพความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กโดยตรง เช่น ถ้าระดับความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น จะทำให้จำนวนองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ เพิ่มมากขึ้น นอกเหนือจากจำนวนองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เพิ่มมากขึ้นแล้ว ขนาดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 จะมีค่าสูงขึ้นไปจนมีค่ามากกว่าขนาดขององค์ประกอบลำดับที่ 3 ด้วย และถ้าระดับความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นไปอีก ก็อาจจะทำให้ขนาดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 สูงกว่าขนาดขององค์ประกอบลำดับที่ 5 ได้ แต่อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวระหว่างระดับความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กยังไม่ได้ถูกทดสอบกับหม้อแปลงในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในขณะที่หม้อแปลงถูกจ่ายไฟ รูปคลื่นของกระแสกระตุ้นแม่เหล็กหรือกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีลักษณะไม่สมมาตรกับแกนนอน แต่เมื่อตัดการพิจารณาเกี่ยวกับขนาดของกระแสที่ลดลง จะพบว่ารูปคลื่นที่เกิดขึ้นมีลักษณะสมมาตรกันระหว่างช่วงขาขึ้นกับขาลง โดยรูปคลื่นดังกล่าวจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบฮาร์มอนิกทั้งที่เป็นลำดับคู่และคี่ ซึ่งเมื่อทำการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสอินรัชพบว่า ในช่วงแรกจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 และ 3 เป็นหลัก ในส่วนองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆ ที่สูงขึ้นไปจะลด

น้อยลง และเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวอัตราส่วนขององค์ประกอบฮาร์มอนิกจะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กที่ลดลง ดังนั้นสัญญาณทรานเซียนต์ในกระแสอินรัชก็จะลดลงด้วย ซึ่งถ้ากระแสอินรัชมีขนาดลดลงจนไม่แสดงผลของรูปคลื่นที่ถูกลก (Offset) ดังรูปที่ 2.8 อย่างไรก็ตามรูปคลื่นดังกล่าวยังมีลักษณะไม่สมมาตรกับแกนอนเนื่องจากผลรวมของ ฟลักซ์แม่เหล็กในหม้อแปลง แต่เมื่อพิจารณาเลือกตำแหน่ง (Ordinate) บนรูปคลื่นใดๆ ก็จะสามารถเห็นรูปคลื่นที่สมมาตรกับตัวเองได้ โดยรูปคลื่นที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วยฮาร์มอนิกทั้งลำดับเลขคู่และคี่รวมกัน

2.2 เสถียรภาพของระบบปรีเลย์ป้องกันชนิดผลต่างกระแสระหว่างการเกิดกระแสอินรัช

ปรากฏการณ์การเกิดกระแสอินรัชแม่เหล็กคั้งที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งเป็นผลให้กระแสที่ไหลเข้าขลวดคั้งที่ถูกจ่ายไฟไม่เท่ากับกระแสในขลวดอีกคั้งหนึ่งของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นผลต่างอันเกิดขึ้นจากกระแสอินรัชนั้น ส่งผลให้กระแสมีลักษณะไม่สมดุล (Unbalance) และทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ความแตกต่างกับกระแสที่เกิดจากการลัดวงจรภายในได้ ซึ่งการคั้งค่ากระแสชดเชยทั่วไปใช้ไม่ได้ผลและการเลื่อนค่าเซตคั้งของระบบป้องกันเพื่อหนีไม่ให้ระบบป้องกันทำงานนั้นทำได้ยาก ดังนั้นเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของรีเลย์ในการตรวจจับการเกิดกระแสอินรัชในลักษณะต่างๆ ดังต่อไปนี้

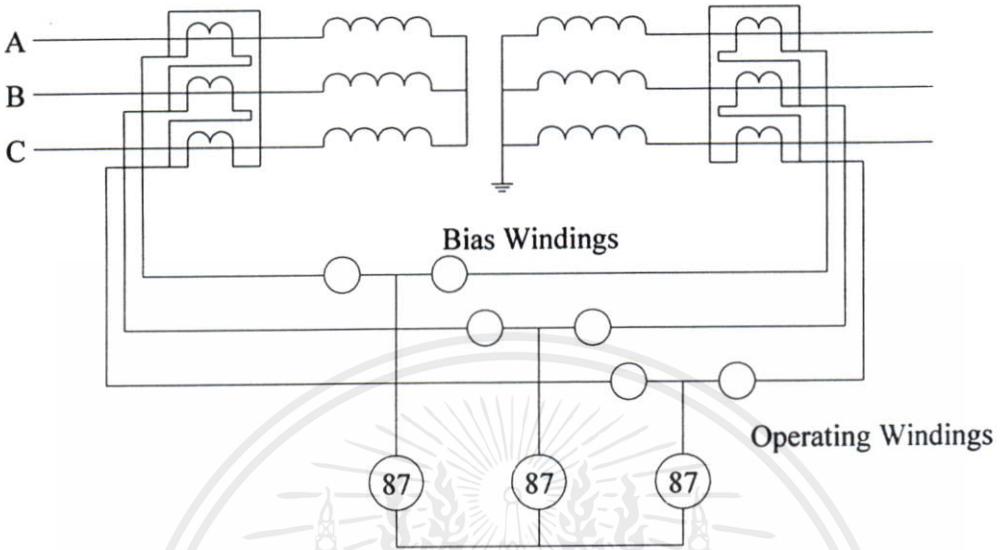
2.2.1 การหน่วงเวลา [2, 4]

เมื่อปรากฏการณ์การเกิดกระแสอินรัชนั้นเป็นลักษณะสัญญาณทรานเซียนต์ซึ่งเกิดขึ้นชั่วคราว การหน่วงเวลาจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ได้ผลและมีใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบป้องกัน

สำหรับการประยุกต์เทคนิคการหน่วงเวลาในรีเลย์กระแสเกินชนิดฉับพลัน (Instantaneous Overcurrent Relay) ทำได้โดยการต่อรีเลย์คั้งกล่าวขนานกับฟิวส์ที่เรียกว่า Kick-Fuse ซึ่งทำหน้าที่เป็นทางผ่านของกระแสส่วนใหญ่ในวงจร โดยการเลือกขนาดฟิวส์จะต้องเลือกให้สามารถทนต่อขนาดของกระแสอินรัชทรานเซียนต์ได้ และจะขาดออกก็ต่อเมื่อเกิดการลัดวงจรภายใน ซึ่งเมื่อขาดออกจะทำให้รีเลย์ที่ต่อขนานอยู่รับกระแสทั้งหมดคั้งส่งสัญญาณคั้งวงจรต่อไป

ส่วนรีเลย์ DDT แบบใช้ตัวเหนี่ยวนำมีความเหมาะสมทั้งคุณลักษณะทางด้านเวลาและการชดเชยกระแส โดยแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 2 ตัวที่ติดตั้งอยู่คั้งเดียวกันของแผ่นจานหมุนจะสร้างแรง (Torque) มาหักล้างกัน อุปกรณ์อื่นๆ ถูกคั้งอยู่แบบ Merz-Price ดังรูปที่ 2.9 โดยค่าเซตคั้งสามารถปรับได้คั้งแต่ 40-100% ค่าความชันสำหรับการชดเชยกระแสสามารถเลือกได้จากแท็ป ซึ่งมีค่า 20%, 30% หรือ 40% ซึ่งช่วงเวลาสั้นๆ ที่ใช้ในการหน่วงเวลาทำงานของรีเลย์จะกำหนดมาจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของแผ่นจานหมุนที่สามารถเอาชนะแรงคั้งคั้งของแม่เหล็กถาวรได้

ยกตัวอย่างการตั้งค่าเวลา เมื่อมีกระแสขนาด 5 เท่าของค่ากระแสที่ตั้งไว้ จะสามารถปรับค่าการหน่วงเวลาได้ตั้งแต่ 100 มิลลิวินาที จนถึง 250 มิลลิวินาที โดยค่าที่นิยมใช้งานคือ 120 มิลลิวินาทีซึ่งอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางพอดี



รูปที่ 2.9 แสดงการชดเชยของรีเลย์ผลต่างสำหรับขดลวดทั้งสองในหม้อแปลงชนิดสตาร์/สตาร์

เป็นไปได้ที่ค่าเวลาการหน่วงซึ่งถูกกำหนดข้างต้นอาจจะไม่เพียงพอสำหรับการป้องกันการลัดวงจรของรีเลย์ในทุกกรณีสำหรับการเกิดกระแสอินรัช ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมีการปรับปรุงจากรีเลย์ชนิดตัวเหนี่ยวนำที่มีผลการตอบสนองต่ำไปเป็นรีเลย์แบบกระแสไหลทางเดียว

2.2.2 การตรวจจับองค์ประกอบฮาร์โมนิก (Harmonic Restraint) [2, 6]

สำหรับระบบป้องกันหม้อแปลงที่ดีที่สุดคือ หากมีฟอลต์เกิดขึ้นจะต้องทำการเคลียร์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นโดยไม่มีกรหน่วงเวลาเพื่อให้หม้อแปลงมีความเสียหายน้อยที่สุดและระบบไฟฟ้าได้รับผลกระทบน้อยที่สุด ซึ่งวิธีการดังกล่าวอาจส่งผลให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างไรก็ตาม กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นแม้ว่าจะมีความคล้ายกับกระแสที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรภายในนั้น แต่เมื่อสังเกตโดยละเอียดจะพบความแตกต่างอย่างมากเมื่อนำรูปคลื่นกระแสทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งลักษณะเฉพาะของความแตกต่างที่พบสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับแบ่งแยกประเภทของกระแสทั้งสอง

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น กระแสอินรัชประกอบด้วยองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ แต่ขนาดขององค์ประกอบเหล่านี้ก็มีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นในการศึกษาวิเคราะห์เกี่ยวกับเรื่องนี้จึงมีความซับซ้อนสูง เนื่องจากรูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงตามระดับความอิ่มตัวของแกนแม่เหล็กและคุณภาพของเหล็กที่นำมาใช้ทำแกนเหล็ก ซึ่งหลักการต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

2.2.2.1 องค์ประกอบกระแสตรง (DC or Offset Component)

องค์ประกอบกระแสตรงเชิงบวกมักจะถูกพบว่าเป็นองค์ประกอบในกระแสอินรัชของหม้อแปลงชนิดเฟสเดียวอยู่เสมอตามหลักการการเกิดกระแสอินรัชของระบบ 3 เฟส อย่างไรก็ตาม ถ้ามีการสวิตช์ซึ่ง ณ ตำแหน่งที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างเฟสใดเฟสหนึ่งเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กก่อนการปลดวงจร ก็จะไม่มีการรบกวนจากกระแสทรานเซียนต์เกิดขึ้นในเฟสนั้น ส่วนอีก 2 เฟสที่เหลือจะเกิดกระแสอินรัชขนาดสูง เนื่องมาจากการที่ฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็กของเฟสนั้นมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กสูงๆ ที่เกิดขึ้นไหลวนในแกนเหล็กของหม้อแปลง 3 เฟสจะส่งผลกระทบต่อรูปคลื่นกระแสของเฟสแรกที่ไม่แสดงผลกระทบของการเกิดกระแสอินรัช โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจะทำให้รูปคลื่นกระแสในเฟสแรกมีลักษณะบิดเบี้ยวดังรูปที่ 2.4 แต่จะไม่ถูกยกขึ้นเหนือแกนนอน โดยสรุปถ้าจะนำองค์ประกอบของกระแสตรงเชิงบวกมาใช้เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในระบบป้องกันชนิดผลต่างกระแส อาจจำเป็นต้องชดเชยกระแสจากผลกระทบดังกล่าวด้วยการไขว้เฟส (Cross-Phase Biasing)

2.2.2.2 องค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่สอง (Second Harmonic)

องค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่สองนี้จะปรากฏอยู่ในรูปคลื่นกระแสอินรัชทุกแบบ นอกจากนี้ยังมีรูปแบบของรูปคลื่นกระแสที่เป็นมาตรฐาน โดยที่ทุกๆ ครั้งไขเคล็ดัดไปจะไม่พบลักษณะกลับขั้วกันแบบกระแสสลับ แต่เมื่อเลือกตำแหน่งพิคต์ที่เหมาะสม ก็จะทำให้รูปคลื่นกระแสอินรัชนั้นมีลักษณะสมมาตรกันได้ สัดส่วนขององค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่สองจะเปลี่ยนไปตามระดับความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก แต่กระแสที่เกิดจะมีทิศทางเดียวกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นและคงอยู่ให้นานที่สุดเสมอ โดยขนาดของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่ากระแสขณะสภาวะคงตัวอยู่อย่างน้อย 20% รูปคลื่นที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.2.2.1 ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ประกอบไปด้วยอัตราส่วนขององค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่สองถึงแม้รูปคลื่นจะไม่ถูกยกขึ้น แต่ก็มีจุดเริ่มต้นในทิศทางเดียวกับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง [2, 6]

โดยปกติกระแสลัดวงจรจะไม่มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่สองและฮาร์โมนิกลำดับที่เป็นเลขคู่ ซึ่งจะไม่ทำให้กระแสที่ไหลในแกนเหล็กที่อิ่มตัวในสภาวะคงตัวมีความบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นซายน์

กระแสขาออกของหม้อแปลงกระแสที่เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจะมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิกลำดับที่เป็นเลขคี่เท่านั้น ไม่มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่เป็นเลขคู่ อย่างไรก็ตาม หม้อแปลงกระแสที่อิ่มตัวจากกระแสลัดวงจรจะมีรูปคลื่นของกระแสทางด้านขาออกของหม้อแปลงกระแสมีลักษณะไม่สมมาตรและมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิกลำดับที่เป็นเลขคู่ ซึ่งลักษณะเฉพาะดังกล่าวนี้สามารถนำมาใช้สำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่างกระแสภายใต้สภาวะลัดวงจร แต่ก็มีข้อเสียเล็กน้อยเนื่องจากเวลาการทำงานในกรณีที่เกิดการลัดวงจรภายในจะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นการใช้องค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่สองนี้จึงเป็นหลักการ

ที่น่าจะนำมาใช้สำหรับเพิ่มเสถียรภาพของระบบป้องกันกรณีเกิดกระแสอินรัช อย่างไรก็ตามจะต้องมั่นใจว่าหม้อแปลงกระแสที่นำมาใช้งานมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะไม่อึดตัวจนทำให้องค์ประกอบฮาร์มอนิกขณะเกิดกระแสลัดวงจรไปรบกวนและหน่วงเวลาการทำงานของรีเลย์ได้

กระแสผลต่างที่ไหลผ่านฟิวเตอร์เพื่อแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สอง องค์ประกอบที่ได้นี้จะนำมาเปรียบเทียบกับสัดส่วนกับกระแสทั้งหมดที่ไหลในวงจร กรณีเกิดกระแสอินรัช เพื่อยับยั้งการทำงานของรีเลย์ ซึ่งหมายความว่าระบบจะมีทั้งความไวและความเร็วสูง ยกตัวอย่างเช่น ในรีเลย์ DTH (Static Design) มีค่าเซตตั้งอยู่ที่ 15% และเวลาในการทำงานเท่ากับ 45 มิลลิวินาที สำหรับฟอลต์ทุกกรณีที่มีขนาดกระแสมากกว่าสองเท่าของกระแสปกติของหม้อแปลง โดยรีเลย์จะยับยั้งการทำงานก็ต่อเมื่อมีค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สองมากกว่า 20% ของกระแส

2.2.2.3 องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สาม (Third Harmonic) [6]

การใช้องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สามที่อยู่ในกระแสอินรัชจะคล้ายกับการเปรียบเทียบกับสัดส่วนขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สอง

กระแสอินรัชในแต่ละเฟสจะมีความสัมพันธ์ชนิดเฟสตรงกัน (In Phase) กับแรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้า (Electromotive Forces) ทางด้านปฐมภูมิและองค์ประกอบฮาร์มอนิกจะมีลักษณะคล้ายช่วงเวลาที่รวมฮาร์มอนิกลำดับที่สามในขดลวดทั้งสามไปสู่เฟสเดียว ถ้าขดลวดต่อในลักษณะ Delta ค่ากระแสในสาย (Line Current) จะเท่ากับผลต่างกระแสระหว่างสองเฟส จากองค์ประกอบของกระแสอินรัชที่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะทรานเซียนต์ จึงเป็นไปได้ที่กระแสผลต่างดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สามของกระแสในสายก็จะหายไปด้วย ซึ่งอาจทำให้เสถียรภาพของระบบไม่น่าไว้วางใจ นอกจากนี้องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สามยังสามารถเกิดขึ้นได้ในขณะที่หม้อแปลงกระแสอึดตัวจากกระแสฟอลต์ที่รุนแรงอีกด้วย

ด้วยเหตุผลทั้งหมดที่ได้แสดงนี้ ทำให้การใช้องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สามสำหรับระบบป้องกัน จึงไม่ควรนำมาใช้เพื่อป้องกันผลกระทบของกระแสอินรัช

2.2.2.4 องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สูงกว่า (Higher Harmonic)

องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆ ที่ปรากฏอยู่ในกระแสอินรัชตามทฤษฎี อย่างไรก็ตามด้วยขนาดของแต่ละองค์ประกอบที่มีขนาดเล็ก และเกิดขึ้นรวดเร็วมาก เช่น มีเพียง 5% ขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 4 อยู่ในกระแสอินรัช โดยองค์ประกอบลำดับที่ 4 นี้มีลักษณะการตอบสนองคล้ายกับองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 แต่ด้วยขนาดที่เล็กกว่าจึงทำให้ยากสำหรับการประยุกต์ใช้งาน

ในส่วนองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ก็มีสัดส่วนที่น้อยมาก นอกจากนี้ยังสามารถเกิดขึ้นในขณะที่หม้อแปลงกระแสอึดตัวด้วยกระแสฟอลต์เช่นเดียวกับองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ดังนั้นจึงไม่ควรนำมาประยุกต์ใช้งาน สำหรับองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สูงขึ้นไป

อีกก็จะมีขนาดที่เล็กมากจนไม่คุ้มที่จะนำมาวิเคราะห์ สัดส่วนขององค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 เทียบกับกระแสอินรัชจะมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อหม้อแปลงอยู่ในสภาพแรงดันไฟฟ้าเกิน บางผู้ผลิตพยายามประยุกต์การตรวจจับค่าองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 เพื่อให้รีเลย์ยับยั้งการทำงานขณะเกิดสภาวะดังกล่าว โดยทั่วไปในกรณีเกิดกระแสอินรัชจะมีสัดส่วนขององค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 เทียบกับกระแสอินรัชประมาณ 30%



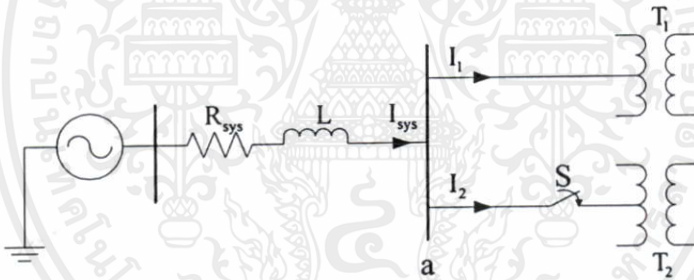
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระแสซิมพาเทติกอินรัช

3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของกระแสซิมพาเทติกอินรัช

ในกรณีที่หม้อแปลงต่อขนานกัน โดยที่หม้อแปลงตัวแรกได้จ่ายไฟอยู่ก่อนแล้ว และตัวที่ 2 อยู่ในช่วงเริ่มจ่ายไฟ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ซิมพาเทติกอินรัช (Sympathetic Interaction) ขึ้น เนื่องจากในสภาวะที่หม้อแปลงตัวที่ 2 เริ่มจ่ายไฟนั้น เมื่อเกิดกระแสอินรัชไหลเข้าสู่หม้อแปลงดังกล่าว จะส่งผลทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานของระบบที่เกิดจากจากองค์ประกอบกระแสตรง (DC Component) ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานของระบบนั้นมีความมากกว่าแรงดันที่บัส a เนื่องจากกระแสในหม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรกที่อยู่ก่อนอยู่ในสภาวะกระแสคงที่ ดังนั้นจะทำให้เกิดกระแสไหลในหม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรกในทิศทางตรงข้ามกับกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงตัวที่ 2 เรียกกระแสที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงตัวแรกนี้ว่า กระแสซิมพาเทติกอินรัช (Sympathetic Inrush Current) [5, 7, 8, 9] ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของกระแส (Magnitude) และช่วงระยะเวลาลดลง (Decaying Time) ของกระแสซิมพาเทติกอินรัชจะอธิบายในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.1 ลักษณะการเกิดกระแสซิมพาเทติกอินรัชระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าสองตัวที่ต่อขนานกัน จากบัสเดียวกัน

เมื่อพิจารณาถึงค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากการอินทิเกรตพื้นที่ของรูปคลื่นแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 สามารถหาได้จากสมการ [8, 10]

$$\Delta\phi_{p1} = \int_0^{t+2\pi} [(R_{sys} + r_{p1})I_1 + R_{sys}I_2] dt \quad (3.1)$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เอกสารนี้คือค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงต่อรอบของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 r_{p1} คือ ค่าความต้านทานทางคานขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1

ซึ่งค่าฟลักซ์แม่เหล็กเริ่มต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น ค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงต่อรอบ $\Delta\phi_{p1}$ จะทำให้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ค่อยๆเพิ่มขึ้นจนทำให้หม้อแปลงไฟฟ้า T_1 เข้าสู่ภาวะอิ่มตัว ซึ่งเป็นเหตุผลทำให้เกิดกระแสชิมพาเทติกอินรัชขึ้นทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 โดยค่อยๆเพิ่มขึ้นจากสภาวะคงที่จนมีค่าสูงสุดเมื่อหม้อแปลงอิ่มตัวเต็มที่ ในขณะที่เดียวกัน ค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงต่อรอบของหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 สามารถหาได้จากสมการ [8, 10]

$$\Delta\phi_{p2} = \int_t^{t+2\pi} [R_{sys}I_1 + (R_{sys} + r_{p2})I_2] dt \quad (3.2)$$

โดยที่

$\Delta\phi_{p2}$ คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงต่อรอบของหม้อแปลงไฟฟ้า T_2

r_{p2} คือ ค่าความต้านทานทางคานขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า T_2

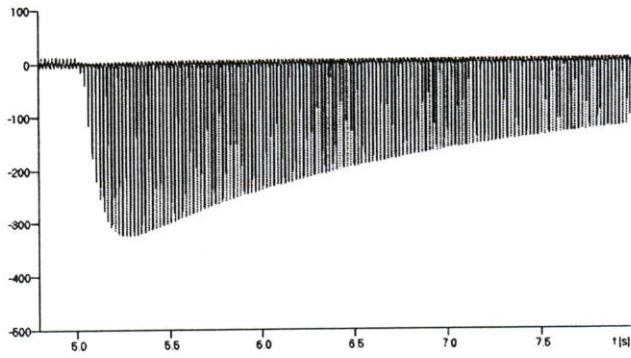
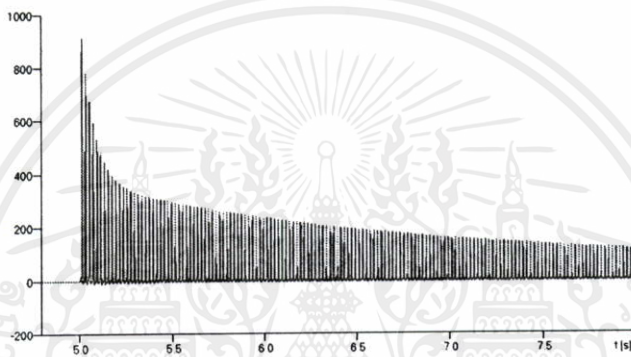
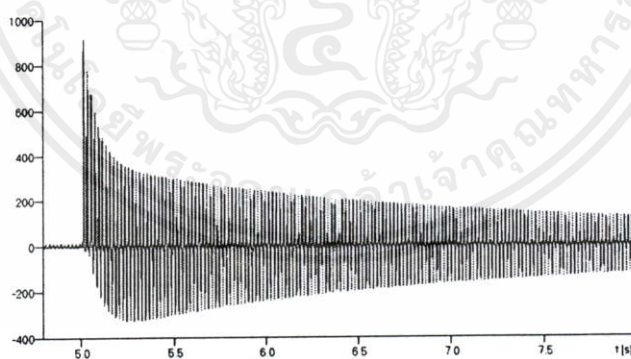
เนื่องจาก $\Delta\phi_{p2}$ มีข้อตรงข้ามกับค่าฟลักซ์แม่เหล็กเริ่มต้นที่เข้ามาภายในหม้อแปลงขณะที่ทำการจ่ายไฟให้หม้อแปลง ผลของ $\Delta\phi_{p2}$ ทำให้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กเริ่มต้นมีค่าลดลงตามปรากฏการณ์กระแสอินรัช

จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 ณ ตำแหน่งที่จุดเริ่มต้นของกระแสอินรัชทรานเซียนต์ จะเห็นได้ว่าค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงต่อรอบทั้ง $\Delta\phi_{p1}$ และ $\Delta\phi_{p2}$ ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงดันตกคร่อมที่เกิดจากกระแสอินรัช I_2 โดยพื้นฐาน หม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ที่ไม่อิ่มตัว กระแสกระตุ้นแม่เหล็กจะต่ำ (ในสภาวะกระแสกระตุ้นแม่เหล็กคงที่) ดังนั้นจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กต่อรอบเปลี่ยนแปลงมากเกินไป

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 เกิดการอิ่มตัว โดยที่การอิ่มตัวนี้เกิดขึ้นในข้อตรงข้ามกับหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 ซึ่งค่ายอดสูงสุดของกระแสชิมพาเทติกอินรัชจะเกิดที่ข้อตรงข้ามกับข้อของกระแสอินรัช I_2 ดังนั้นแรงดันไม่สมมาตรบนขั้วสายที่ที่เกิดจากกระแสอินรัช I_2 จะค่อยๆลดลงเนื่องจากแรงดันตกคร่อมที่เกิดจากกระแสชิมพาเทติกอินรัช I_1 เหตุการณ์นี้ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงต่อรอบของหม้อแปลง $\Delta\phi_{p1}$ และ $\Delta\phi_{p2}$ ลดลง อีกทั้งยังลดระดับอัตราการเปลี่ยนแปลงการเพิ่มขึ้นของกระแส I_1 และการลดลงของกระแส I_2 จนทำให้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงต่อรอบทั้ง $\Delta\phi_{p1}$ มีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก (ทำซ้ำ) หรือดัดแปลง (แก้ไข) ใช้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1 = -\frac{R_{sys}}{(R_{sys} + r_{p1})} I_2 \quad (3.3)$$

(a) กระแสซิมพาเทติกอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 (b) กระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 (c) กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างกระแสทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในปรากฏการณ์ซิมพาเทติกอินรัช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสซิมพาเทติกอินรัช [11]

3.2.1 ค่าความต้านทานของระบบ

ค่าความต้านทานของระบบ คือค่าความต้านทานรวมในสายส่งระหว่างแหล่งจ่ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อความต้านทานของระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้องค์ประกอบกระแสตรงที่เกิดจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัชมีค่าเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อความต้านทานของแหล่งจ่ายมีค่าสูงขึ้น ขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัชจะมีค่าสูง และหากความต้านทานของแหล่งจ่ายมีค่าต่ำ ขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัชจะมีค่าต่ำ

3.2.2 ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงไฟฟ้า

ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงไฟฟ้า เกิดจากกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าถูกปลดออกจากระบบไฟฟ้า กระแสกระตุ้นแม่เหล็กจะลดลงเป็นศูนย์ ส่วนฟลักซ์แม่เหล็กจะค่อยลดลงตาม Hysteresis Loop จนเหลือค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง เนื่องจากคุณสมบัติของฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างฉับพลัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามรูปที่แสดงในรูปที่ 2.6 หากหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างเป็นบวก ค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ได้ใหม่จะมีค่าสูงขึ้น ทำให้ขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัชมีค่าสูงขึ้น

3.2.3 มุมของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายขณะจ่ายไฟ

มุมของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายเป็นมุมของแรงดันไฟฟ้าขณะที่แหล่งจ่ายทำการจ่ายไฟให้หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 2.1 หากมุมของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายมีค่าเปลี่ยนแปลง ทำให้แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้กระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ทำให้ขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัชมีค่าเปลี่ยนแปลง ซึ่งขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัชมีค่าสูงสุด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายมีค่าเป็น 0° และขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัชมีค่าต่ำสุด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายมีค่าเป็น 90°

3.2.4 ภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า

ภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า คือกรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟให้หม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 2 ในสภาวะที่หม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรกที่จ่ายไฟอยู่ก่อนแล้วมีภาระโหลดอยู่ ซึ่งส่งผลกระทบต่อขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัชที่เกิดขึ้น โดยมีขนาดของกระแสสูงกว่าในกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีภาระโหลด

จากปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัชที่กล่าวมานี้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ในส่วนของปัจจัยที่เกิดจาก ค่าฟลักซ์แม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า มุมของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายขณะจ่ายไฟและภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า รวมถึงทำการพิจารณาค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวจะกล่าวไว้ในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ทฤษฎีและหลักการใช้โปรแกรม ATP/EMTP สำหรับจำลอง สถานะการเกิดกระแสซิมพาทะติคอินรัช

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม ATP/EMTP (Alternative Transient Program/Electromagnetic Transient Program) สำหรับการจำลองปรากฏการณ์การเกิดกระแสซิมพาทะติคอินรัชระหว่างหม้อแปลง ความสามารถของโปรแกรมหี้กล่าวคือ สามารถหาผลตอบสนองของระบบในสถานะทรานเซียนต์ได้ โปรแกรมดังกล่าวเป็นที่ยอมรับและใช้กันในงานวิจัยอย่างแพร่หลายสำหรับจำลองหาผลตอบสนองของหม้อแปลงในสถานะทรานเซียนต์ รวมถึงการจำลองระบบไฟฟ้าและระบบส่งจ่ายไฟฟ้า [12-23] โปรแกรม ATP/EMTP จะมีโปรแกรมห้อย (Sub-Routine Program) สำหรับช่วยในการจำลองอุปกรณ์ต่างๆทางไฟฟ้า ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักในการคำนวณหาจกรเทียบเคียงต่างๆของหม้อแปลง ซึ่งจะมีโปรแกรมห้อยสำหรับการจำลองหม้อแปลงอยู่หลายโปรแกรมได้แก่ BCTRAN, Saturable Transformer, X transformer และ Ideal Transformer ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้โปรแกรมห้อยสำหรับจำลองหม้อแปลงแบบ BCTRAN มาช่วยในการจำลองการเกิดกระแสซิมพาทะติคอินรัช

ในการจำลองหม้อแปลงในช่วงเริ่มแรกนั้น ได้มีการนำเสนอมวงจรสตาร์ (Star Circuit) ซึ่งแสดงถึงหม้อแปลงจำนวน N ขด ซึ่งต่อมาได้ถูกเรียกว่า “Saturable Transformer Component” ซึ่งเป็นการหาค่าเมตริกซ์ $[R]$ และ $[L]^{-1}$ สำหรับช่วงสถานะทรานเซียนต์ (Transient State)

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

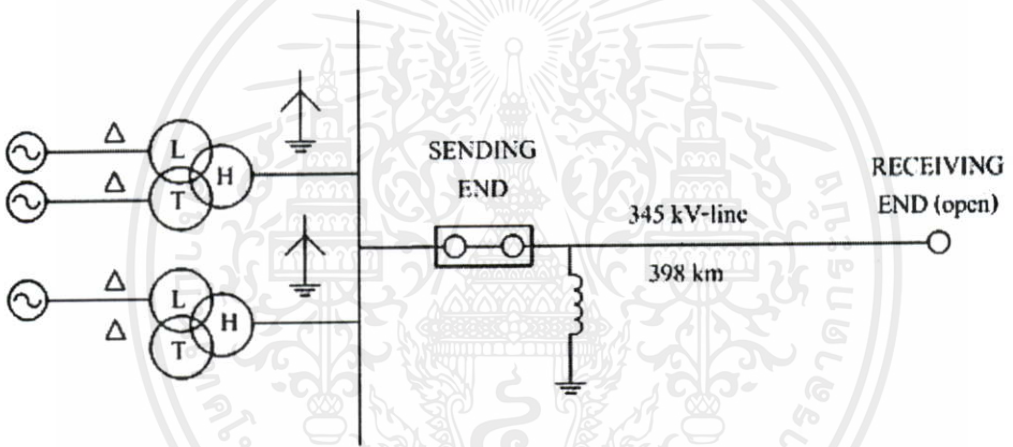
ต่อมาได้มีการพัฒนาโปรแกรมห้อย BCTRAN สำหรับการนำเสนอมพีแดนซ์เมตริกซ์ (Impedance Matrix) และอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ผกผัน (Inverse Impedance Matrix) ของหม้อแปลงชนิด 3 เฟส ที่อยู่ในรูปของ Coupled R-L มีการนำค่ารีลักแตนซ์ลำดับศูนย์ของอากาศ (Zero-Sequence Air-Return Path Reluctance) มาคิดด้วย หากต้องการคำนึงถึงผลของการอิมตัวของแกนเหล็กก็สามารถทำได้โดยการต่อตัวรีแอคเตอร์ชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Reactance) ที่เทอร์มินอลของเมตริกซ์ที่ได้จากโปรแกรม BCTRAN และหากต้องการให้คำนึงถึงผลของฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis) ในแกนเหล็กก็สามารถทำได้โดยการต่อรีแอคเตอร์ที่มีผลของฮิสเตอร์รีซิส หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “Pseudo-Nonlinear Hysteris Reactor” [12, 13] อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการที่จะอธิบายที่มาของวงจรเทวินินนั้น ให้ลองดูที่ตัวอย่างในรูป 4.1 เมื่อวงจรประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิด 3 ชุด และหม้อแปลงชนิดขดลวดจำนวน 2 ตัว ค่ารีแอกแตนซ์ลัดวงจร (Short Circuit Reactance) ของหม้อแปลง ระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ X_{HL} มีค่า 0.117 p.u. และระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดเทอร์เชียรี (Tertiary Winding) X_{HT} มีค่า 0.115 p.u. และระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดเทอร์เชียรี X_{LT} มีค่า 0.241 p.u. ส่วนค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิด X_d' มีค่า 0.1385 p.u. ที่เบส 100 MVA, 60 Hz ดังนั้น

$$X_H = \frac{1}{2}(X_{HL} + X_{HT} - X_{LT}) = \frac{1}{2}(0.117 + 0.115 - 0.241) = -0.0045 \text{ pu.}$$

$$X_L = \frac{1}{2}(X_{HL} + X_{LT} - X_{HT}) = \frac{1}{2}(0.117 + 0.241 - 0.115) = 0.1215 \text{ pu.}$$

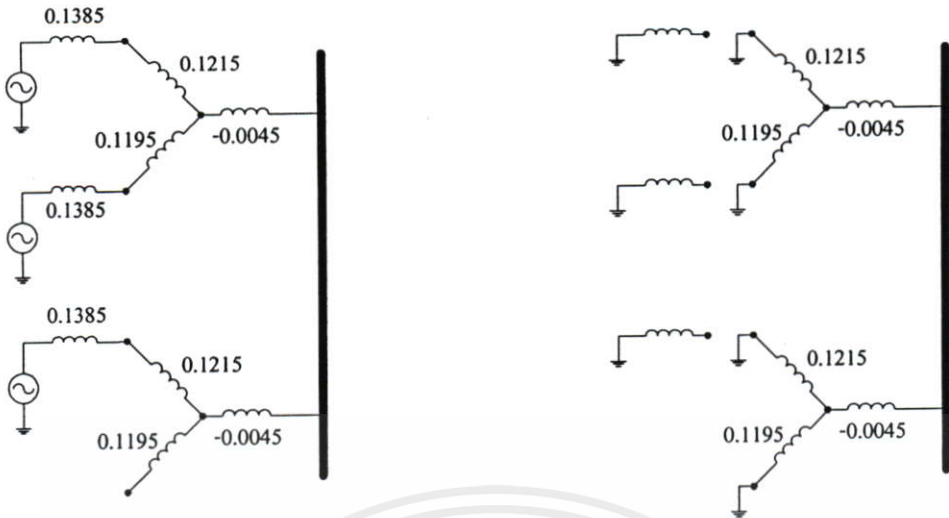
$$X_T = \frac{1}{2}(X_{HT} + X_{LT} - X_{HL}) = \frac{1}{2}(0.115 + 0.241 - 0.117) = 0.1195 \text{ pu.}$$



รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้อธิบายหลักการของเทวินิน [14]

จากวงจรสตาร์ (Equivalent Star Circuit) สำหรับหม้อแปลง 3 ชุด ในรูป 4.1 สามารถแสดงในรูปของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (Zero Sequence Impedance) และอิมพีแดนซ์ลำดับบวก (Positive Sequence Impedance) ดังในรูป 4.2 และเพื่อให้ง่ายในการคำนวณค่าความต้านทานจึงไม่นำมาคิดจากในรูปที่ 4.2 ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์ (Zero Sequence Reactance) ได้ถูกประมาณให้มีค่าเท่ากับค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวก (Positive Sequence Reactance) ซึ่งจะให้ผลถูกต้องในกรณีของหม้อแปลงชนิดเฟสเดียว 3 ตัวมาต่อกันเป็นหม้อแปลง 3 เฟส แต่จะให้ค่าที่ไม่ถูกต้องนักสำหรับหม้อแปลงชนิด 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



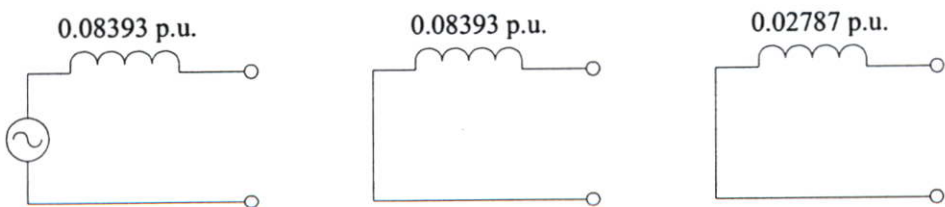
(a) Positive sequence (negative sequence เท่ากัน)

(b) Zero sequence

ยกเว้นแรงดันของแหล่งจ่ายถูกลัดวงจร)

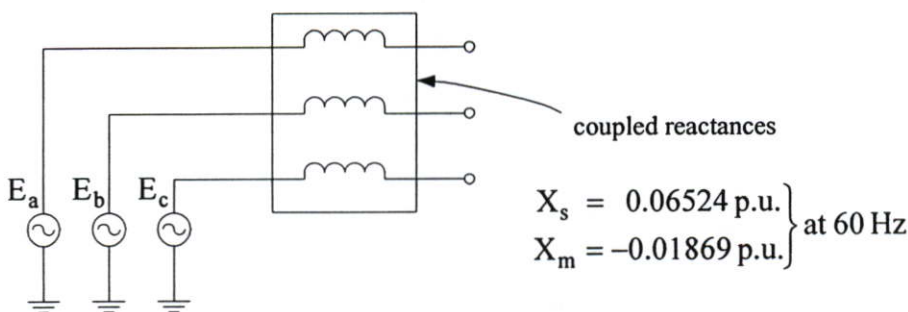
รูปที่ 4.2 วงจรเทียบเคียงวงจร ในรูป 4.1 (Reactance Value in p.u. Base On 100 MVA, 60 Hz) [14]

สังเกตได้ว่าขดลวดที่ต่อแบบเคลด้าจะทำตัวเหมือนสภาวะลัดวงจร สำหรับกระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current) โครงข่ายในรูป 4.2 สามารถลดให้อยู่ในรูปของวงจรเทวินินชนิด Sequence Quantity ได้ 3 วงจร ดังในรูปที่ 4.3 และแปลงให้เป็นวงจรเทวินินชนิด 3 เฟสในรูปของ Phase Quantity ได้ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งวงจร 3 เฟสชนิด Phase Quantity ดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในโปรแกรม ATP/EMTP สำหรับแสดงถึง Power Plant ซึ่งค่าที่ได้จะถูกแปลงจากค่าเปอร์ยูนิทให้เป็นค่าจริง โดยค่าแรงดันจริงอยู่ที่ 345 kV ดังนั้นค่า X_{pos} และ X_{neg} มีค่าเท่ากับ $0.08393 \times (345 \text{ kV})^2 / 100$ หรือเท่ากับ 99.90 Ω ส่วนค่า X_{zero} มีค่าเท่ากับ 33.17 Ω หรือหากเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ Self Inductance และ Mutual Inductance จะได้ X_s มีค่าเท่ากับ 77.65 Ω และ X_m มีค่าเท่ากับ 22.25 Ω ที่ 60 Hz วงจรในช่วงของการจำลองขณะทรานเซียนต์ ค่าเมตริกซ์จะถูกแทนที่โดยค่า Inductance Matrix [L]



รูปที่ 4.3 วงจรเทวินิน ในรูปของ Sequence Quantities [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อนการนำมาใช้โดยไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 วงจรเทวินินแบบ 3 เฟส ในรูปของ Phase Quantities [14]

สำหรับหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด (Two Winding Transformer) สมมุติว่าค่ารีแอกแตนซ์ลัดวงจร (Short Circuit Reactance) มีค่า 10%, ค่าความต้านทานลัดวงจร (Short Circuit Resistance) มีค่า 0.5% และค่ากระแสกระตุ้น (Exciting Current) มีค่า 1% สอดคล้องกับ V_{rating} และ S_{rating} ของหม้อแปลง ในที่นี้เราไม่นำค่า Excitation Loss มาคิด ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร คือ $Z_{p.u.}$ ค่าสูญเสียในขดลวดคือ P_{loss} และกำลังไฟฟ้าคือ S_{rating} ดังนั้นค่าความต้านทานลัดวงจร และค่ารีแอกแตนซ์ลัดวงจรคือ

$$R_{p.u.} = P_{loss} / S_{rating} \quad (4.2)$$

$$X_{p.u.} = \sqrt{Z_{p.u.}^2 - R_{p.u.}^2} \quad (4.3)$$

เนื่องจากค่าสูญเสียในขดลวดที่บอกไม่ได้ระบุการกระจายค่าสูญเสียระหว่างขดลวด 1 หรือขดลวด 2 ดังนั้นเราจึงประมาณว่า

$$R_{1p.u.} = R_{2p.u.} = \frac{1}{2} \times R_{p.u.} \quad (4.4)$$

ดังนั้นเราสามารถหาความต้านทานของขดลวดได้จากสมการข้างต้น ในรูปที่ 4.5 แสดงถึงวงจร T ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรจึงมีค่า $0.005 + j0.10 \text{ p.u.}$ (Short Circuit Resistance = 0.5%, Short Circuit Reactance = 10%) ซึ่งจะถูกแบ่งให้มีค่าเท่ากัน 2 ค่า และค่า Magnetizing Reactance คือ $j99.95 \text{ p.u.}$ เป็นค่าที่ไม่ได้นำค่าสูญเสียในแกนเหล็ก (Excitation Loss) มาคิด ดังนั้นค่า Input Impedance จึงมีค่าเท่ากับ 100 p.u. (ไม่นำผลของ Excitation loss มาคิด) ดังนั้นจะได้

อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} V_{1p.u.} \\ V_{2p.u.} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0025 & 0 \\ 0 & 0.0025 \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} 100 & 99.95 \\ 99.95 & 100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1p.u.} \\ I_{2p.u.} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

สำหรับ Steady State Solution หรือ

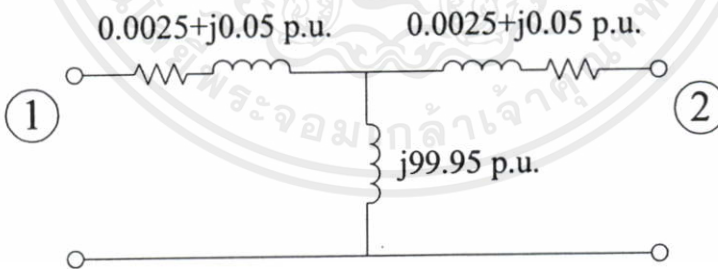
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + [L] \begin{bmatrix} di_1 / dt \\ di_2 / dt \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

สำหรับ Transient Solution

ค่า $[R]$ จะเป็นค่าเดียวกันกับสมการที่ 4.2 และค่า $[L] = 1/\omega[X]$ โดยส่วนมากแล้วโปรแกรม ATP/EMTP จะประมาณผลโดยใช้ค่าจริงมากกว่าค่าเปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสมการที่ (4.5) จึงถูกแปลงเป็นค่าจริง

$$[Z] = \frac{1}{S_{rating}} \begin{bmatrix} 0.0025V_1^2 & 0 \\ 0 & 0.0025V_2^2 \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} 100V_1^2 & 99.95V_1V_2 \\ 99.95V_1V_2 & 100V_2^2 \end{bmatrix} \Omega \quad (4.7)$$

โดยที่ S_{rating} คือกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power Rating) ของหม้อแปลง ส่วน V_1, V_2 คือค่าแรงดันพิกัดของหม้อแปลง



รูปที่ 4.5 วงจร T แสดงถึงหม้อแปลง 2 ขดลวด

หลักการพื้นฐานที่ได้กล่าวมาเป็นหลักการที่ใช้ในโปรแกรมย่อย BCTRAN และ โปรแกรมย่อย Saturable Transformer ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้โปรแกรมย่อย BCTRAN สำหรับคำนวณค่าเมตริกซ์ของค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำที่อยู่ในรูปของ Self Inductance และ Mutual Inductance [13, 14] ซึ่งเมตริกซ์ดังกล่าวจะออกมาในรูปของวงจรเทียบเคียงที่มีความต้านทาน และ

ค่าความเหนี่ยวนำต่ออยู่ (Coupled Linear Resistance-Inductance Branch Equivalent Circuit) ขนาด 6×6 สำหรับหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด และขนาด 9×9 สำหรับหม้อแปลงชนิด 3 ขดลวด ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวจะอาศัยผลการทดสอบหม้อแปลงมาคำนวณหาค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำในรูปของ Self Inductance และ Mutual Inductance ซึ่งผลการทดสอบหม้อแปลงที่จำเป็น ได้แก่ ผลการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลง (Short Circuit Test or Load Test) ผลการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นของหม้อแปลง หรือการทดสอบแบบเปิดวงจร ซึ่งจะต้องทำการทดสอบทั้งในส่วนลำดับบวกและลำดับศูนย์ (Positive and Zero Excitation Test or No Load Test or Open Circuit Test)

4.1 แบบจำลองของหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรมน้อย BCTRAN

ในที่นี้จะกล่าวถึงหลักการหาวงจรเทียบเคียงของหม้อแปลง (Terminal Equivalent Circuit) โดยโปรแกรมย่อย BCTRAN [14] ซึ่งโปรแกรมย่อย BCTRAN สามารถใช้สำหรับหาวงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงทั้งแบบที่มีแกนเหล็กเป็นชนิด Core หรือ Shell และทั้งชนิด 2 ขดลวด และ 3 ขดลวด โดยใช้ผลการทดสอบของหม้อแปลงมาเป็นข้อมูลอินพุต ซึ่งในโปรแกรมนี้นำผลของการสูญเสียในแกนเหล็ก (Excitation Loss) มาคิดด้วย แม้ว่าค่าสูญเสียในแกนเหล็กสามารถจะได้สำหรับกรณีของหม้อแปลงชนิดเฟสเดียว หรือหม้อแปลงสามเฟสที่มีค่ารีลักแตนซ์ต่ำ (Low Reluctance) ซึ่งสังเกตได้จากค่าของกระแสกระตุ้นต่ำ เป็นผลให้ค่าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าต่ำ แต่สำหรับหม้อแปลงสามเฟสที่มีค่ารีลักแตนซ์สูงค่าความสูญเสียของแกนเหล็กจะมีผลเป็นอย่างมาก และยังคงนำผลการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์แบบเปิดวงจร (Zero Sequence Excitation Test) มาคิดด้วย

สำหรับผลการทดสอบของหม้อแปลงสามเฟสที่มีขดลวดที่ต่อแบบเดลต้าอย่างน้อย 1 ขดลวด ชนิดของแกนเหล็กจะไม่มีผลต่อความถูกต้องของวงจรเทียบเคียงมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากในกรณีที่ทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์แบบเปิดวงจร ขดลวดดังกล่าวจะเปรียบเสมือนการลัดวงจร ดังนั้นจะให้ผลการทดสอบออกมาเหมือนกับการทดสอบแบบลัดวงจรลำดับศูนย์ (Zero Sequence Short Circuit Test) ดังนั้นในการทดสอบหม้อแปลงแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ ควรจะเปิดวงจรของขดลวดทุกขดที่ต่อแบบเดลต้า ซึ่งจะมีผลในกรณีที่เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก (Saturation) จะทำให้ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นสามารถลัดวงจรไปยังตัวถังของหม้อแปลง แต่อย่างไรก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากในการทดสอบจะทำการทดสอบแค่ 1 จุดการทำงานเพื่อนำไปหาค่าสูญเสียของแกนเหล็กแทนการหาแบบครบจุดการทำงานตามเส้นโค้งการอิ่มตัว (Saturation Curve) ดังนั้นในการทดสอบแม้ว่าจะไม่เปิดวงจรขดลวดเดลต้า ค่าของกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ (Zero Sequence Exciting Current) หรือค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ (Zero Sequence Exciting Loss) จะไม่มีผลต่อความถูกต้องของวงจรเทียบเคียงมากนัก

สำหรับหม้อแปลงที่มีขดลวดต่อแบบสตาร์อย่างเดียว ชนิดของแกนเหล็กจะมีผลอย่างมากในการหาจรรยาเทียบเคียงสำหรับในกรณีหม้อแปลงชนิดที่มีค่ารีลัคแตนซ์ต่ำ อันได้แก่หม้อแปลงสามเฟสที่มีแกนเหล็กเป็นแบบ Shell หรือหม้อแปลงที่มีแกนเหล็กชนิด 4 หรือ 5 ขา หรือหม้อแปลงชนิดเฟสเดียวที่นำมาต่อเป็น 3 เฟส ซึ่งในกรณีดังกล่าว โฮโมโพลาร์ฟลักซ์ (Homopolar Flux) จะคล่องผ่านแกนเหล็ก ดังนั้นจึงทำให้ค่ารีลัคแตนซ์ต่ำ ดังนั้นค่ากระแสกระตุ้นลำดับศูนย์จึงมีค่าต่ำ ดังนั้นค่าสูญเสียในแกนเหล็กจึงสามารถละได้ แต่สำหรับหม้อแปลงที่มีค่ารีลัคแตนซ์สูง (High Reluctance) อันได้แก่หม้อแปลงชนิด 3 ขาที่มีแกนเหล็กเป็นแบบ Core ในการทดสอบแบบกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ ค่าโฮโมโพลาร์ฟลักซ์ (Homopolar Flux) จะคล่องผ่านอากาศและตัวถังของหม้อแปลง ดังนั้นค่ากระแสกระตุ้นลำดับศูนย์จึงมีความสำคัญ ดังนั้นค่าสูญเสียในแกนเหล็กจึงไม่สามารถละได้ แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดสอบก็จะมีแค่ในจุดทำงานแทนที่จะครบทุกจุดการทำงานตามเส้นโค้งการอิ่มตัวของแกนเหล็ก (Saturation Curve)

ในการหาจรรยาเทียบเคียงของโปรแกรมย่อย BCTRAN จะไม่คำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็ก (Nonlinearities of Core) หากต้องการผลของความไม่เป็นเชิงเส้นก็สามารถทำได้ โดยการต่อค่าอินดักแตนซ์ชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้น 96 หรือ 98 (Nonlinear Inductance Type 96, 98) ที่เทอร์มินอลของหม้อแปลงที่มีขดลวดใกล้กับแกนเหล็กมากที่สุด [13,14] ซึ่งจะให้ผลของอินทิเกรตของแรงดันมีค่าใกล้เคียงกับแกนเหล็ก แต่จะต้องระบุค่ากระแสกระตุ้นลำดับบวกเป็นศูนย์ $I_{ex,dir} = 0$ เพื่อไม่ให้มี Magnetizing Inductance ซ้อนกัน ดังนั้นเอาต์พุตที่ได้จากโปรแกรม BCTRAN จะอยู่ในรูปของการต่อร่วมกันของค่าความต้านทาน (Resistance) และค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ชนิดเชิงเส้น (Coupled Linear RL) มาแสดงเป็นจรรยาเทียบเคียงของหม้อแปลงในรูปของเวลา (Time Domain) โดยในสภาวะทรานเซียนจะมีสมการเฟสเซอร์ดังต่อไปนี้

$$[v] = [R][i] + [L] \frac{d}{dt} [i] \quad (4.8)$$

ถ้า $[A] = [L]^{-1}$ ดังนั้น

$$\frac{d}{dt} [i] = [A][v] - [A][R][i] \quad (4.9)$$

ในหม้อแปลงเฟสเดียว จำนวนขดลวด N ขด ในช่วงสภาวะ Steady State สมการเฟสเซอร์ คือ

$$[V] = [Z][I] \quad (4.10)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$Z_{ii} = f(I_{exci}, P_{Fei}) \quad (4.11)$$

โดยที่ I_{exci} คือ ค่ากระแสกระตุ้นที่วัดได้จากการที่จ่ายกระแสให้กับหม้อแปลง ณ ขดลวดที่ i ขณะทำการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น

P_{Fei} คือ ค่าสูญเสียในแกนเหล็กที่วัดได้จากการที่จ่ายกระแสให้กับหม้อแปลง ณ ขดลวดที่ i ขณะทำการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น ส่วนค่าของ $[Z]$ ในแนวที่ไม่ใช่แนวทแยงมุม (Off Diagonal Element) จะสามารถหาได้จากผลการทดสอบแบบลัดวงจร

$$Z_{ik} = f(P_{Cui}, V_{ik}^{short}) \quad (4.12)$$

โดยที่ (i, k) คือ คู่ของขดลวดที่ทำการทดสอบแบบลัดวงจร

P_{Cui} คือ ค่าความสูญเสียในขดลวดที่วัดได้ (Copper Loss)

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

ซึ่งค่าความสูญเสียในขดลวดจะนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานของขดลวด (Winding Resistance) แต่อย่างไรก็ตามถ้าทราบค่าความต้านทานจากกรวดโดยตรง ก็สามารถนำมาป้อนให้กับโปรแกรมแทนการคำนวณหาค่าความสูญเสียในขดลวด ส่วนค่าแรงดันลัดวงจรจะนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานของขดลวดต่อไฟฟ้าสลับ (Reactance) ดังนั้นถ้าให้ค่าอิมพีแดนซ์ขณะลัดวงจรเป็น Z_{ik}^{short} ค่า Mutual Inductance สามารถหาได้จาก

$$Z_{ik} = Z_{ki} = \sqrt{(Z_{ii} - Z_{ik}^{short})Z_{kk}} \quad (4.13)$$

ซึ่งค่าเมตริกซ์ $[R]$ และ $[L]$ ในสมการที่ (4.8) สามารถหาได้จากค่าจริง (Real Part) และค่าจินตภาพ (Imaginary Part) ของเมตริกซ์ $[Z]$ ในสมการที่ (4.13)

ในส่วน of ค่า $[Z]$ ของหม้อแปลงสามเฟส ซึ่งมีจำนวนขดลวด N ขด ในช่วงสภาวะ Steady State นั้น ยังคงใช้สมการที่ใช้กับหม้อแปลงเฟสเดียวที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นได้ แต่จะต้องมีการเปลี่ยนค่ากระแส แรงดันและอิมพีแดนซ์ จากค่าที่เป็น Scalar มาเป็น Matrices ดังต่อไปนี้

$$i_k \rightarrow [i_{kA} i_{kB} i_{kC}]^T \quad (4.14)$$

$$v_k \rightarrow [v_{kA} v_{kB} v_{kC}]^T \quad (4.15)$$

$$Z_{ki} \rightarrow \begin{bmatrix} Z_{kis} & Z_{kim} & Z_{kim} \\ Z_{kim} & Z_{kis} & Z_{kim} \\ Z_{kim} & Z_{kim} & Z_{kis} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

โดยที่ A, B, C คือ การบ่งบอกถึงเฟส

Z_{kis} คือ ค่า Self Impedance ระหว่างขดลวด k และขดลวด i ซึ่งก็คือค่า Mutual Impedance ระหว่างขดลวด 2 ขดในเฟสเดียวกัน

Z_{kim} คือ ค่า Mutual Impedance ระหว่างขดลวด k และขดลวด i ซึ่งก็คือค่า Mutual Impedance ระหว่างขดลวด 2 ขดที่ต่างเฟสกัน

ในสมการที่ 4.16 จะใช้สำหรับหาค่าอิมพีแดนซ์ โดยใช้ผลการทดสอบทั้งแบบลำดับศูนย์และลำดับบวก จากนั้นทำการแปลงให้เป็นค่า Self Impedance และ Mutual Impedance โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$Z_s = \frac{1}{3}(Z_0 + 2Z_1), \quad Z_m = \frac{1}{3}(Z_0 - Z_1) \quad (4.17)$$

ดังนั้นเอาท์พุทที่ได้จากโปรแกรมย่อย BCTRAN จะอยู่ในรูปของเมตริกซ์ของ R และ L ดังสมการที่ 4.18 และ 4.19 ซึ่งสามารถนำเมตริกซ์ที่ได้ดังกล่าวส่งไปให้โปรแกรม ATP/EMTP ในการจำลองระบบไฟฟ้าต่อไป

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & & 0 \\ & \cdots & \\ 0 & & R_6 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & L_{12} & \cdots & L_{16} \\ L_{21} & L_2 & \cdots & L_{26} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ L_{61} & L_{62} & \cdots & L_6 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่ได้กล่าวมาเป็นหลักการหาแบบจำลองของหม้อแปลงในรูปแบบ Self Impedance และ Mutual Impedance โดยอาศัยผลการทดสอบหม้อแปลงทั้งในแบบจ่ายกระแสกระตุ้น และแบบลัดวงจร ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้ทดสอบ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดกระแสชิมพาเทคอินรัช

4.2 การป้อนข้อมูลให้กับโปรแกรม BCTRAN

สำหรับหม้อแปลงที่ถูกนำมาใช้ทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้เป็นหม้อแปลงขนาด 50 MVA และมีใช้อยู่ที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อยู่ในสถานีไฟฟ้าย่อยจังหวัดมหาสารคาม ซึ่งผลิตจากบริษัทเอบีบี จำกัด ซึ่งมีผลการทดสอบดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบ (Test Report) ของหม้อแปลง

Description	Data
Power Rating S/Winding Connection	50.0 MVA/YNyn0
Voltage Rating	115.0 / 23 kV
Current Rating	251.02 / 1255.11 A
Frequency	50 Hz
Positive Sequence Test (Direct Measurements):	
Excitation Losses (Open HV)	22.18 kW
Excitation Current	0.922 A
Excitation Voltage (Energized at Rated Voltage)	23 kV
Short-Circuit Losses (Short LV)	148.10 kW
Short-Circuit Current (Energized at Rated Current)	251.07 A
Short-Circuit Voltage	14.44 kV
Zero Sequence Test (Homopolar Measurements):	
Excitation Losses (Open HV)	221.0 kW
Excitation Current	200 A
Excitation Voltage	1.993 kV
Short-Circuit Losses (Short LV)	345.0 kW
Short-Circuit Current (Energized at Rated Current)	200.2 A
Short-Circuit Voltage	3.224 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มา : รายงานการทดสอบหม้อแปลง (Test Report) จากบริษัท เอบีบี จำกัด Serial no. 56039

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทั้งแบบจ่ายกระแสกระตุ้น และการทดสอบแบบลัดวงจร ทั้งการทดสอบแบบลำดับขวก และลำดับศูนย์ จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สำหรับป้อนให้กับโปรแกรม BCTAN (รายละเอียดการคำนวณ แสดงในภาคผนวก ก.)

และจากแบบจำลองการเกิดกระแสซิมพาทะคอินรัชในรูปที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการจำลองเพื่อป้อนให้กับโปรแกรม ATP/EMTP มีดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการจำลองกระแสซิมพาเทติกอินรัช

ในการศึกษาลักษณะการเกิดและปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัชที่เกิดขึ้นระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าสองตัว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่อาจส่งผลกระทบต่อระบบป้องกันไฟฟ้าทำงานผิดพลาดได้เนื่องจากการแยกแยะความแตกต่างระหว่างฟอลต์ที่เกิดขึ้นจริงกับกระแสซิมพาเทติกอินรัช ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญในการที่จะพัฒนาระบบป้องกันไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

5.1 เงื่อนไขการจำลอง

การจำลองกระแสซิมพาเทติกอินรัชในวิทยานิพนธ์นี้ อ้างอิงตามหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีใช้อยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังจริง พร้อมทั้งทำการพิจารณาศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัช โดยสามารถสรุปเงื่อนไขการจำลองได้ดังนี้

5.1.1 ผลกระทบจากมุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์

ในกรณีที่มีมุมของแรงดันไฟฟ้า (อ้างอิงเฟส A) ณ ตำแหน่งที่สับเซอร์กิตเบรกเกอร์เปลี่ยนแปลง ขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัชที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเช่นกัน ในการจำลองนี้สมมติให้มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เปลี่ยนแปลงทุกๆ 45 องศาไฟฟ้า โดยเริ่มตั้งแต่ 0° 45° 90° 135° และ 180° ตามลำดับ

5.1.2 ผลกระทบจากภาระโหลด

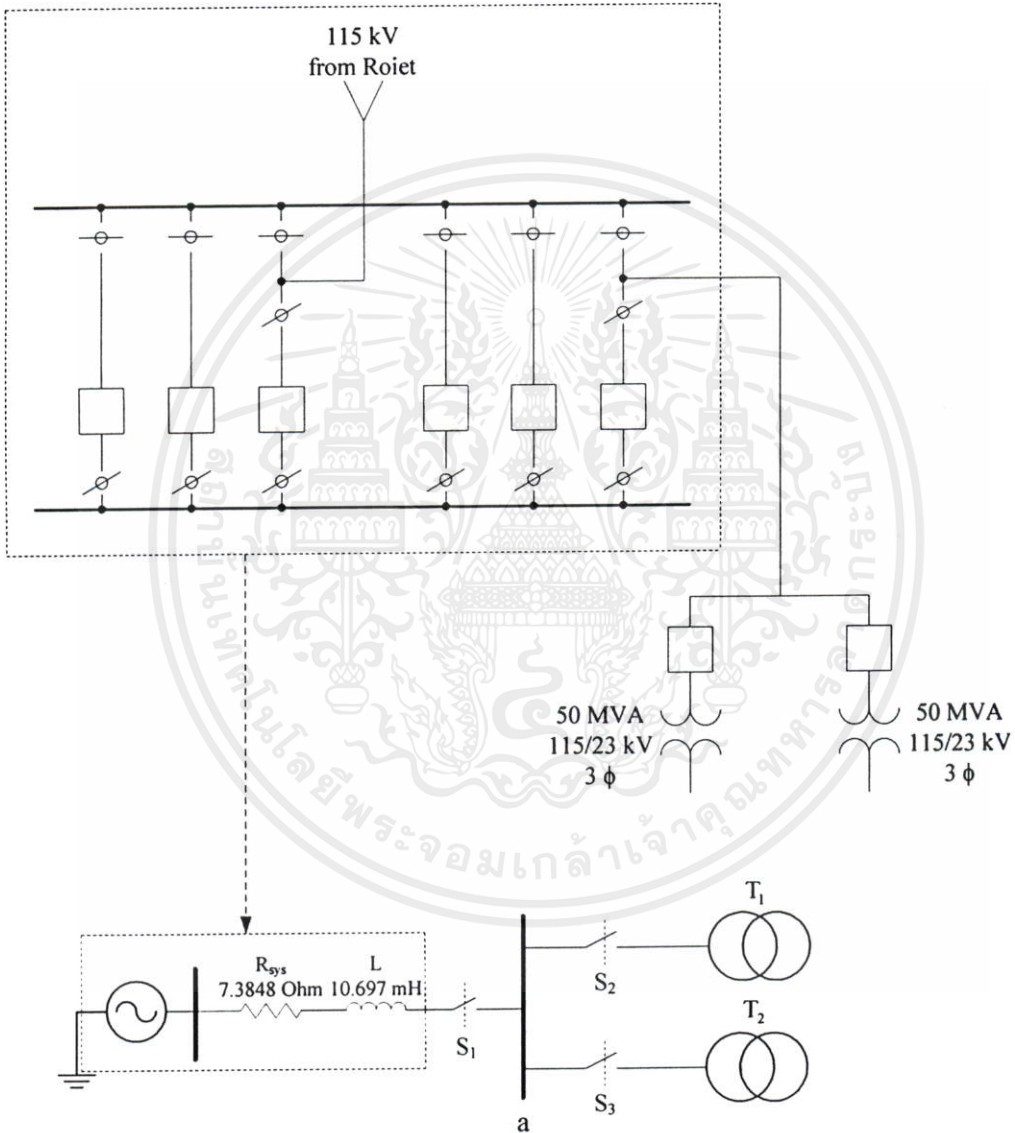
ในการจำลองนี้เป็นการศึกษาผลกระทบกรณีที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรกที่ถูกจ่ายไฟฟ้าอยู่ก่อนนั้นมีภาระโหลดต่ออยู่ทางด้านขดลวดทุติยภูมิ และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดกระแสซิมพาเทติกอินรัชที่เกิดขึ้นระหว่างกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีภาระโหลดกับกรณีที่มีภาระโหลด

5.1.3 ผลกระทบจากค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการจำลองนี้เป็นการศึกษาผลกระทบจากค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองต่อขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัช สมมติให้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองที่เปลี่ยนแปลงมีค่า 90% 95% 100% 105% และ 110% ของค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวปกติตามลำดับ

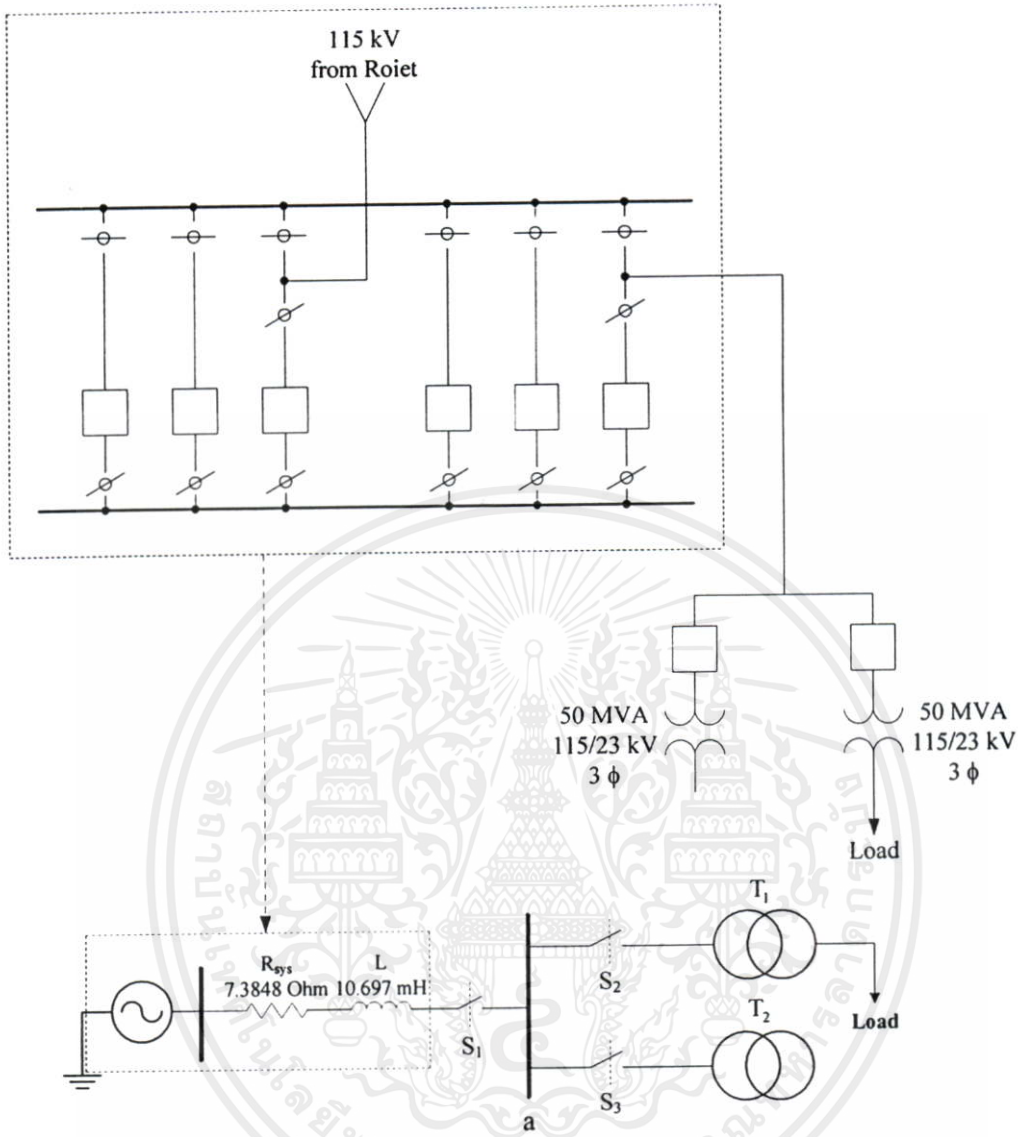
5.2 แบบจำลองกระแสซิมพาเทติกอินรัช

จากเงื่อนไขการจำลองเพื่อศึกษาลักษณะการเกิดกระแสซิมพาเทติกอินรัชที่เกิดขึ้นระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าสองตัวที่ต่อขนานจากบัสเดียวกัน สามารถกำหนดรูปแบบวงจรในการทดลองได้ดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 โดยแบบจำลองทั้งสองรูปนี้อ้างอิงมาจากแบบจำลองของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



รูปที่ 5.1 แสดงการต่อแบบจำลองการเกิดกระแสซิมพาเทติกอินรัชในวงจรทดสอบกรณีหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลดงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงการต่อแบบจำลองการเกิดกระแสซิมพาทะติคอินรัชในวงจรทดสอบกรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T₁ จ่ายภาระโหลด

โดยที่

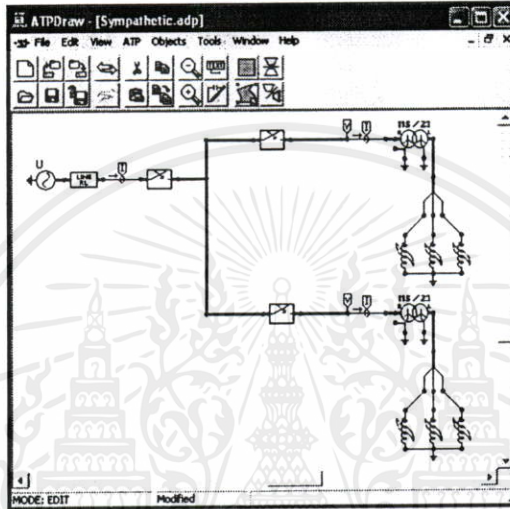
R_{sys} คือ ค่าความต้านทานรวมของระบบระหว่างแหล่งจ่ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำรวมของระบบระหว่างแหล่งจ่ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า

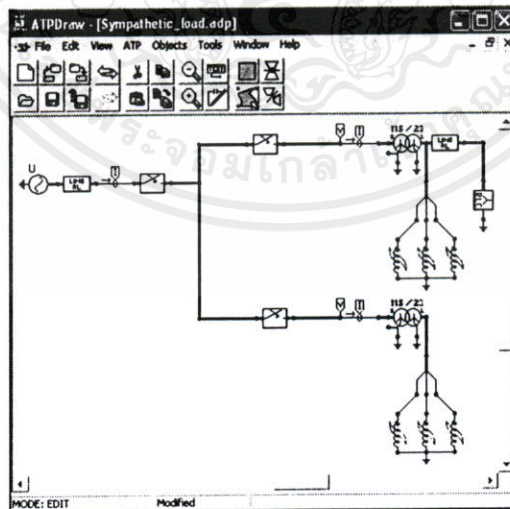
จากแบบจำลองการเกิดกระแสซิมพาทะติคอินรัช หม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองตัวอยู่ในสภาพไม่จ่ายไฟ ทั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์ S₁, S₂ และ S₃ อยู่ในตำแหน่งเปิด ต่อมาในวินาทีที่ 0.1 sec เซอร์กิตเบรกเกอร์ S₁ และ S₂ ถูกปิดลงเพื่อจ่ายไฟให้หม้อแปลงไฟฟ้า T₁ ต่อมาในวินาทีที่ 5 sec เซอร์กิต

เบรกเกอร์ S_3 ถูกปิดลง เพื่อจ่ายไฟให้หม้อแปลงไฟฟ้า T_2 สำหรับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของกระแสจะถูกตรวจจับทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสอง และตรวจจับค่ากระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2

จากวงจรการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 5.1 และ 5.2 เมื่อนำไปสร้างเป็นแบบจำลองการเกิดกระแสซิมพาทิคอินรัชในโปรแกรม ATPDraw ซึ่งเป็นโปรแกรมย่อยของโปรแกรม ATP/EMTP ได้ดังรูปที่ 5.3 และ 5.4



รูปที่ 5.3 แสดงการต่อแบบจำลองการเกิดกระแสซิมพาทิคอินรัชในโปรแกรม ATPDraw กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด



รูปที่ 5.4 แสดงการต่อแบบจำลองการเกิดกระแสซิมพาทิคอินรัชในโปรแกรม ATPDraw กรณี

หม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการจำลอง

5.3.1 ผลกระทบจากมุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์

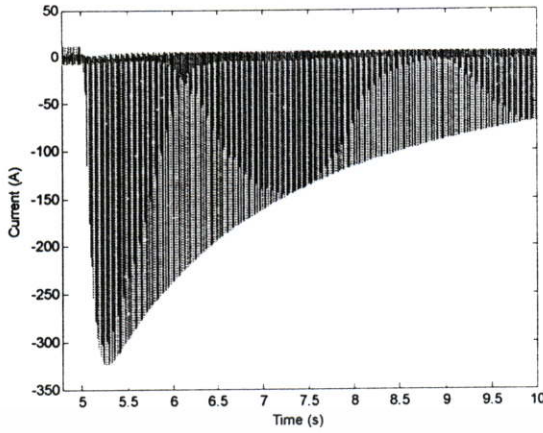
รูปที่ 5.7 ถึง 5.51 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากผลการจำลองเพื่อศึกษาลักษณะการเกิดกระแสชิมพาเทติกอินรัช ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มุมต่างๆ สังเกตได้ว่า ขนาดของกระแสชิมพาเทติกอินรัชที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงสุด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0° และมีค่าลดลงเรื่อยๆตามมุมสับที่เพิ่มขึ้น จนมีค่าต่ำสุดที่มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 90°

5.3.2 ผลกระทบจากภาวะโหลด

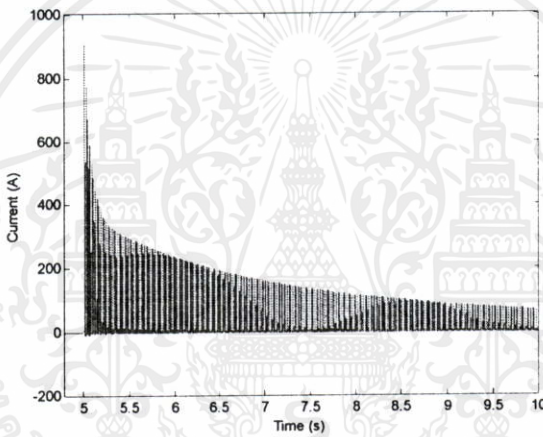
รูปที่ 5.52 ถึง 5.60 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากผลการจำลองเพื่อศึกษาลักษณะการเกิดกระแสชิมพาเทติกอินรัช ที่มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0° ในกรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลดอยู่และทำการจ่ายไฟให้หม้อแปลงไฟฟ้า T_2 สังเกตได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลดจากหัวข้อ 5.3.1 ในรูปที่ 5.5 ถึง 5.13 ตามลำดับ ทั้งขนาดของกระแสชิมพาเทติกอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ขนาดของกระแสรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่า ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เท่ากัน

5.3.3 ผลกระทบจากฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

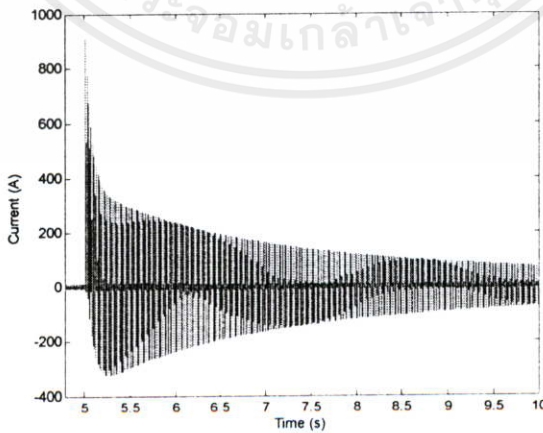
รูปที่ 5.61 ถึง 5.96 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากผลการจำลองเพื่อศึกษาลักษณะการเกิดกระแสชิมพาเทติกอินรัช ที่มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0° ในกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวเปลี่ยนแปลง สังเกตได้ว่า เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวต่ำ ทั้งขนาดของกระแสชิมพาเทติกอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ขนาดของกระแสรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 จะมีค่าสูง แต่หากหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวสูง ขนาดของกระแสชิมพาเทติกอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ขนาดของกระแสรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 ผลการจำลองนี้เป็นการจำลองในกรณีที่หม้อแปลงมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว 90% 95% 100% 105% และ 110% ของค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวจากการจำลองในหัวข้อที่ 5.3.1 ตามลำดับ



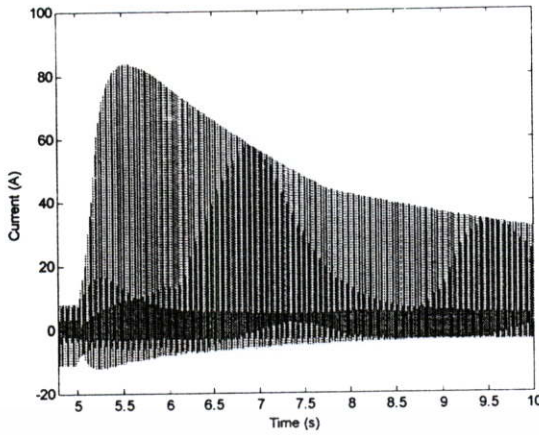
รูปที่ 5.5 กระแสซิมพาทอดอินรัฟเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาวะโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0°



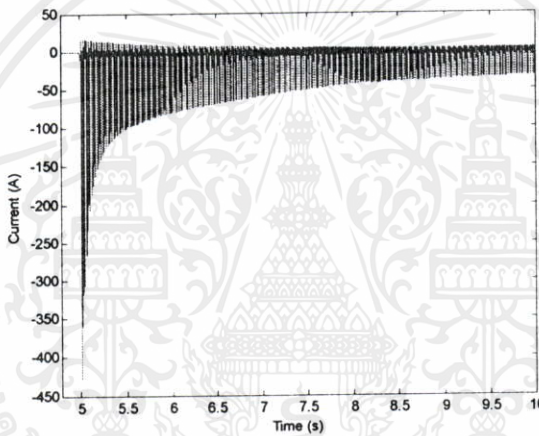
รูปที่ 5.6 กระแสอินรัฟเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาวะโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0°



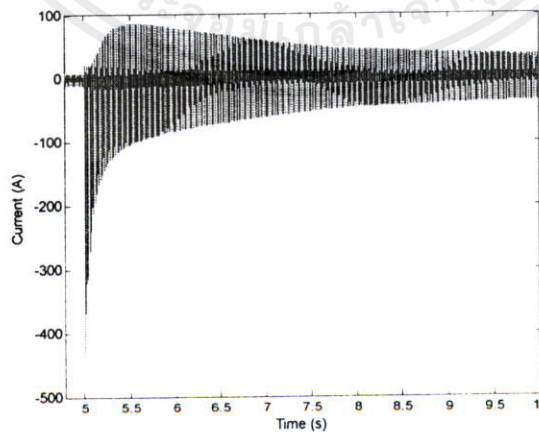
รูปที่ 5.7 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาวะโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0°



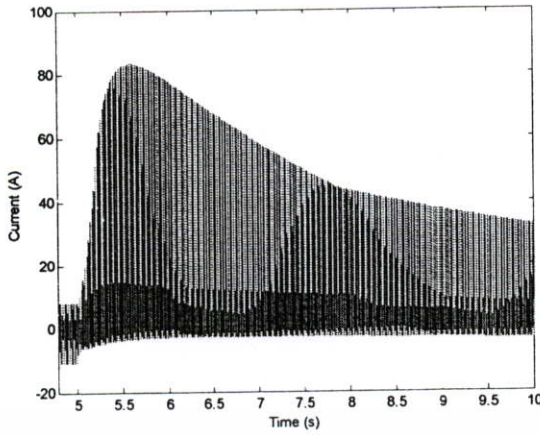
รูปที่ 5.8 กระแสซิมพาเทติกอินรัฟเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T₁ กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาวะโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0°



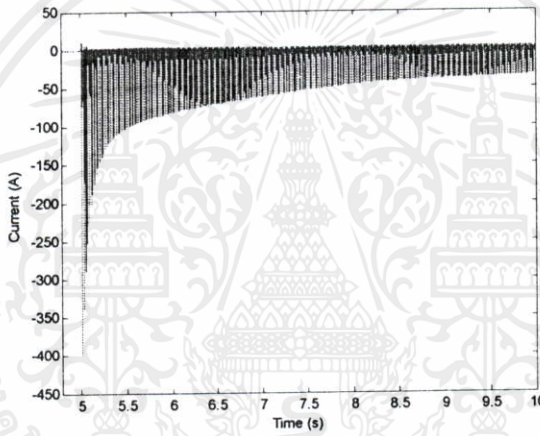
รูปที่ 5.9 กระแสอินรัฟเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T₂ กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาวะโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0°



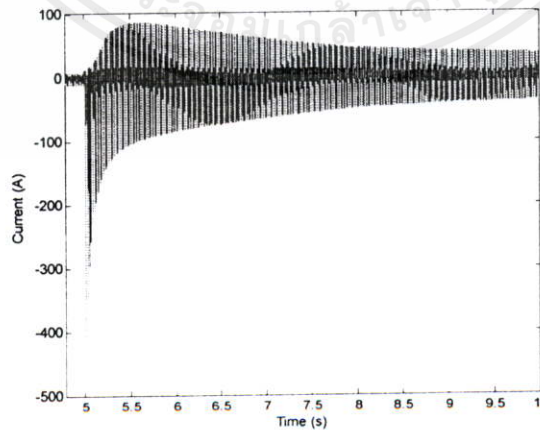
รูปที่ 5.10 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T₁ และ T₂ เฟส B กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาวะโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0°



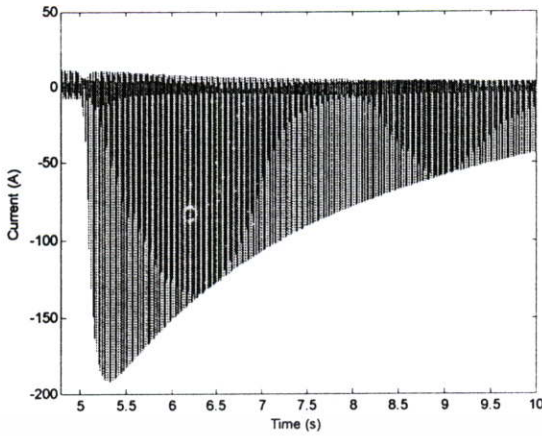
รูปที่ 5.11 กระแสซิมพาทคอินรัลเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0°



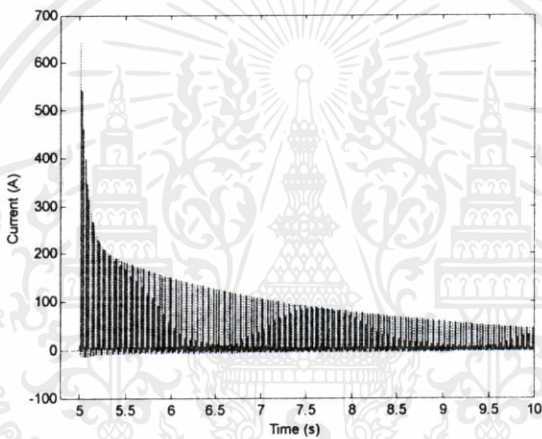
รูปที่ 5.12 กระแสอินรัลเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0°



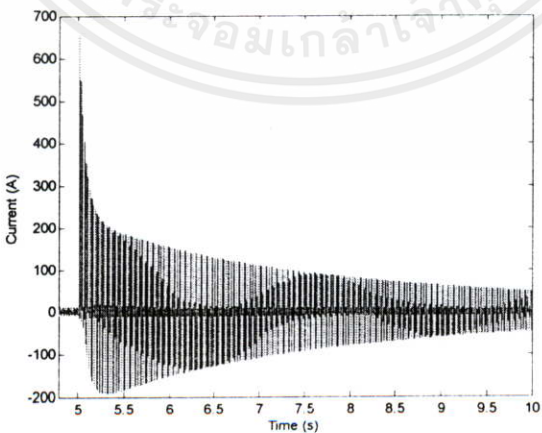
รูปที่ 5.13 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0°



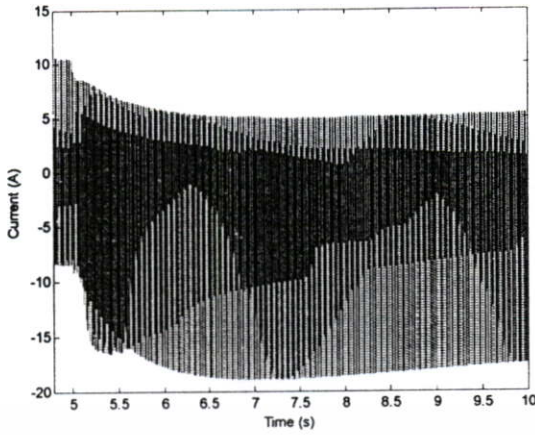
รูปที่ 5.14 กระแสซิมพาเทติกอินรัฟเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 45°



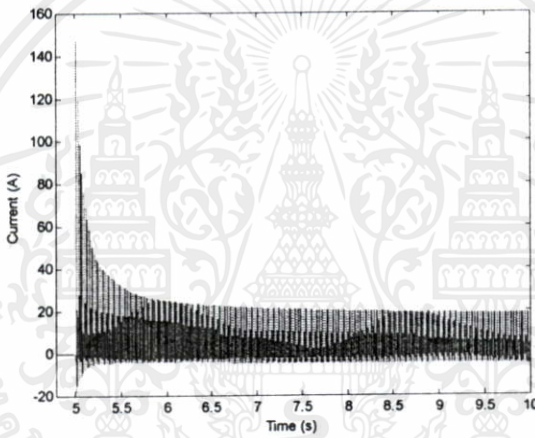
รูปที่ 5.15 กระแสอินรัฟเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 45°



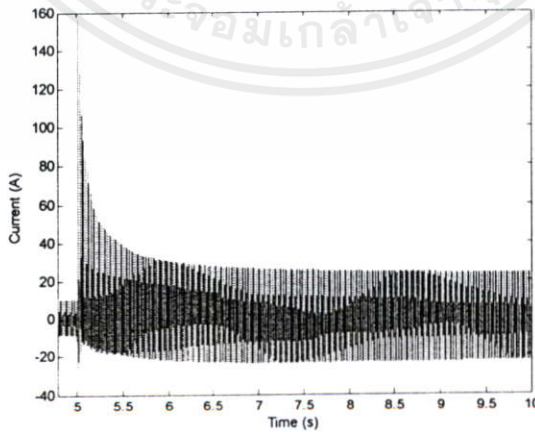
รูปที่ 5.16 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 45°



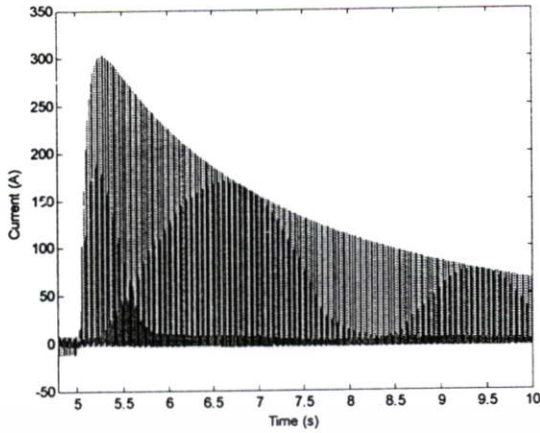
รูปที่ 5.17 กระแสขั้วเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 45°



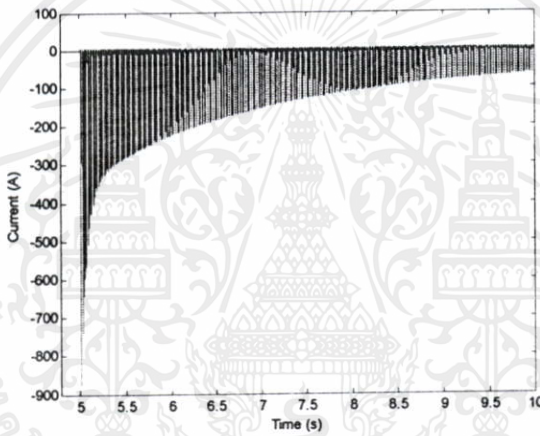
รูปที่ 5.18 กระแสขั้วเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 45°



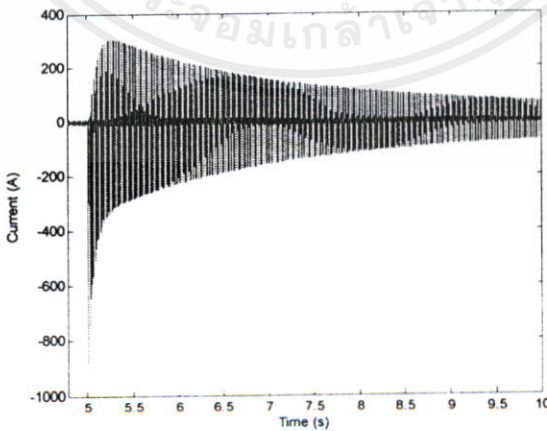
รูปที่ 5.19 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 45°



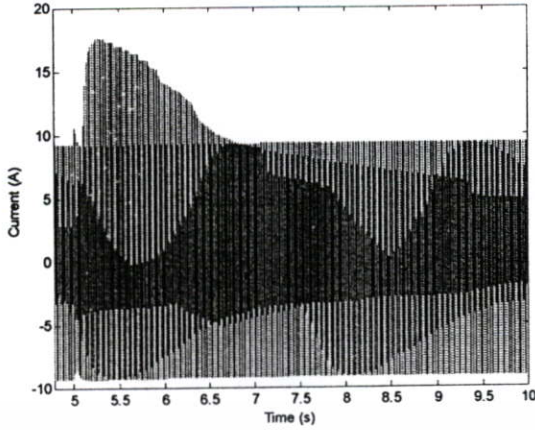
รูปที่ 5.20 กระแสขิมพาทดิกอินรัฟเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 , กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระ โหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 45°



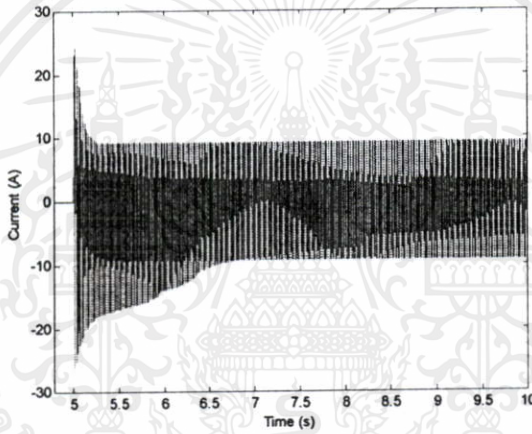
รูปที่ 5.21 กระแสอินรัฟเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 , กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระ โหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 45°



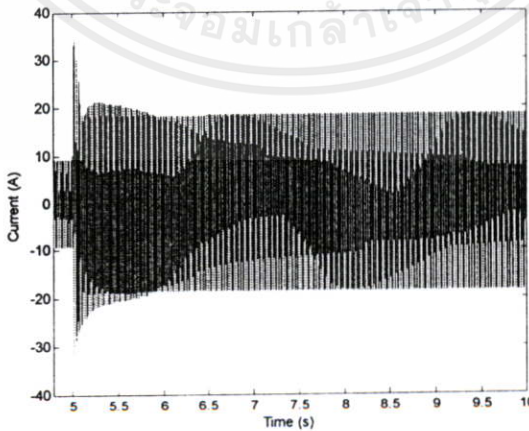
รูปที่ 5.22 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 , เฟส C กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระ โหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 45°



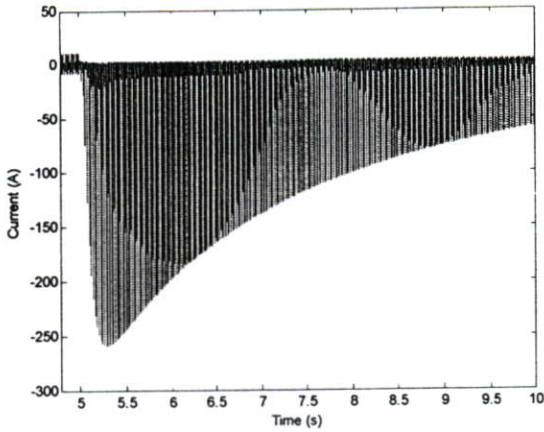
รูปที่ 5.23 กระแสซิมพาทะคอินรัชเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 90°



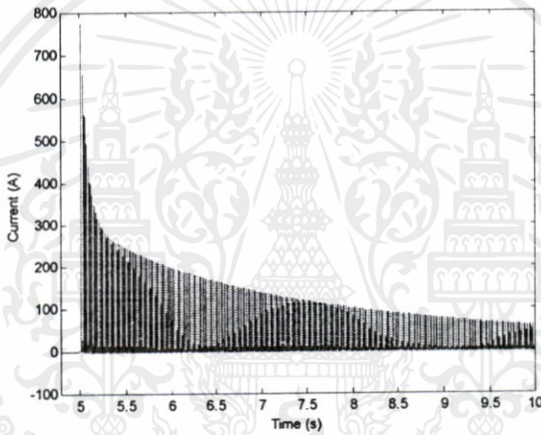
รูปที่ 5.24 กระแสอินรัชเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 90°



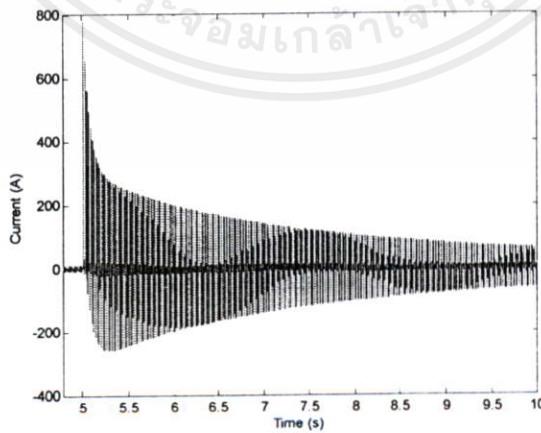
รูปที่ 5.25 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 90°



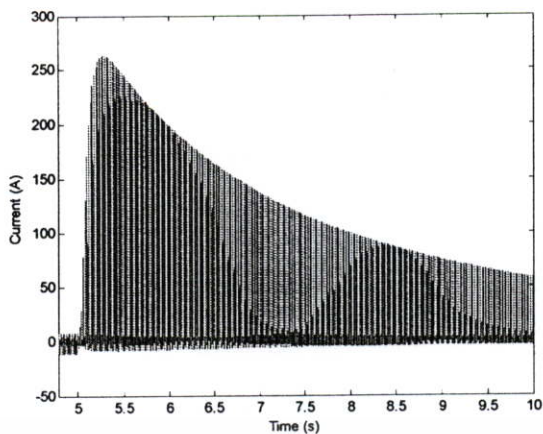
รูปที่ 5.26 กระแสซิมพาเทติกอินรัลเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาวะโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 90°



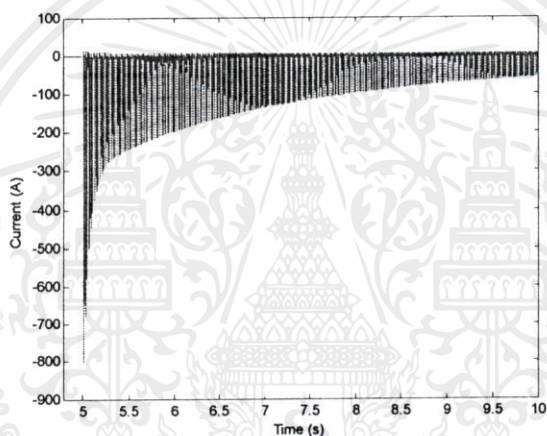
รูปที่ 5.27 กระแสอินรัลเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาวะโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 90°



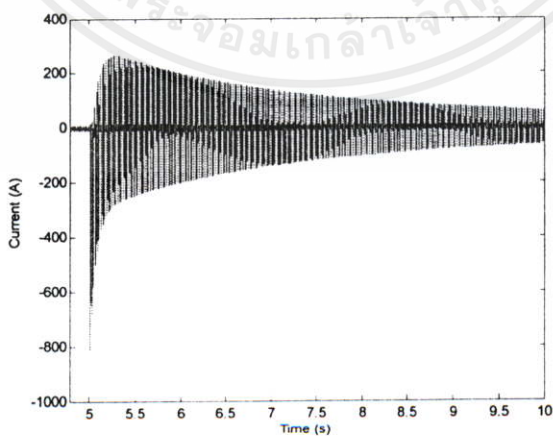
รูปที่ 5.28 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาวะโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 90°



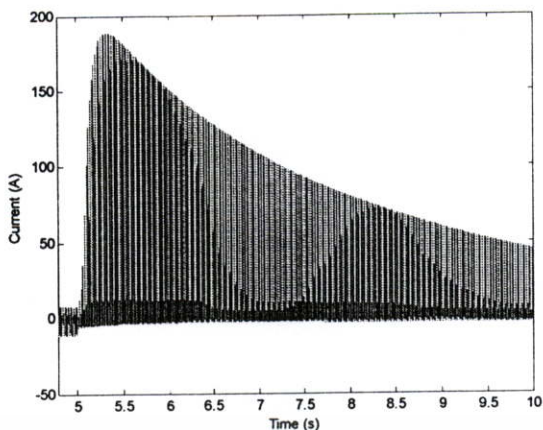
รูปที่ 5.29 กระแสซิมพาทาคอนิรซ์เฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 90°



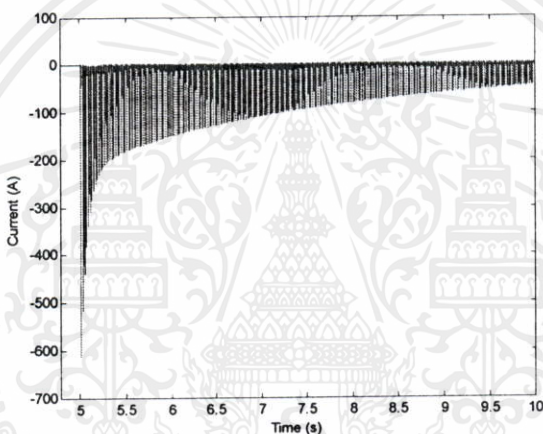
รูปที่ 5.30 กระแสอินรีซเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 90°



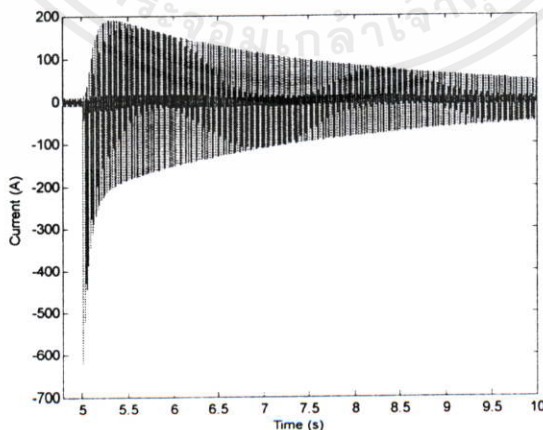
รูปที่ 5.31 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 90° ซึ่งได้มีการนำไปใช้



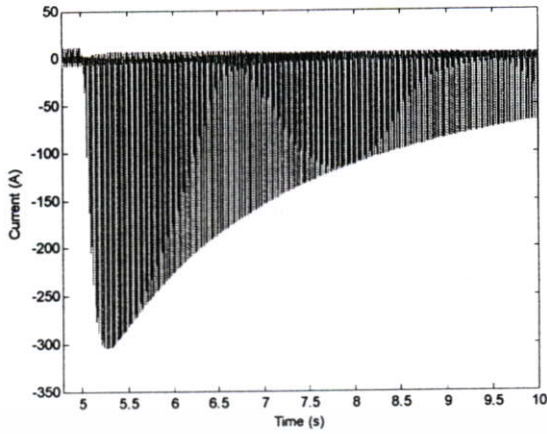
รูปที่ 5.32 กระแสขิมพาทะติคอินรัชเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 135°



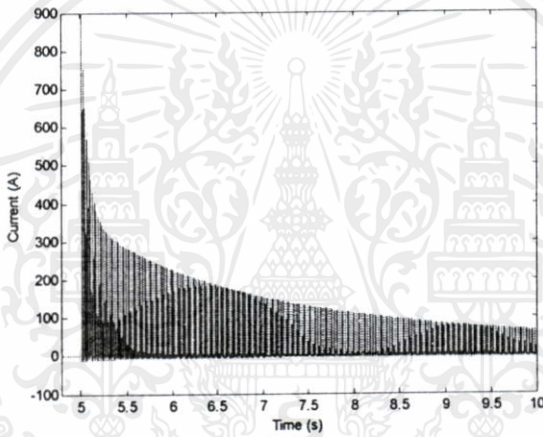
รูปที่ 5.33 กระแสอินรัชเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 135°



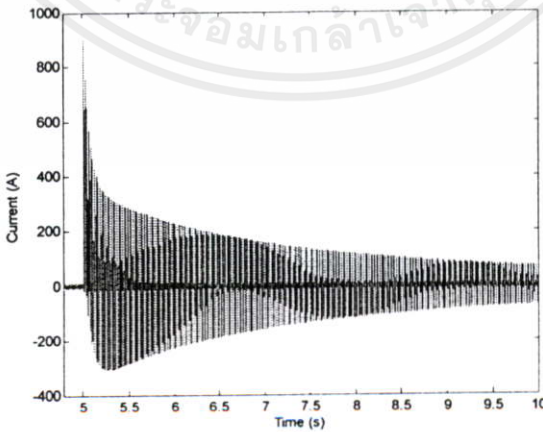
รูปที่ 5.34 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 135° ที่มีการนำไปใช้



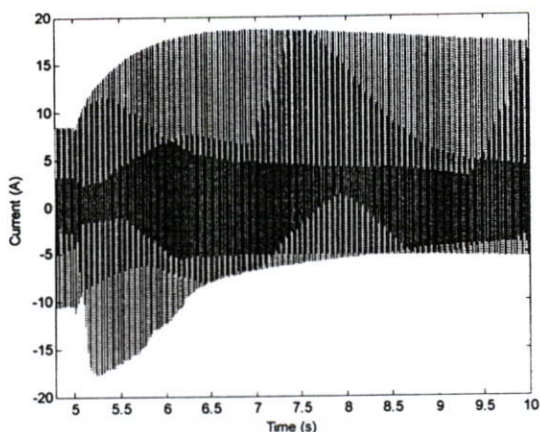
รูปที่ 5.35 กระแสซิมพาเทติกอินรีเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 135°



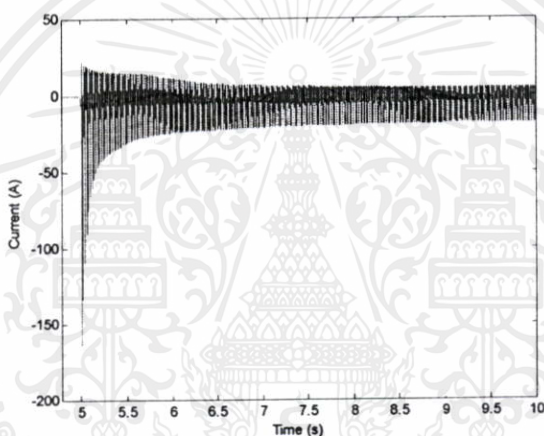
รูปที่ 5.36 กระแสอินรีเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 135°



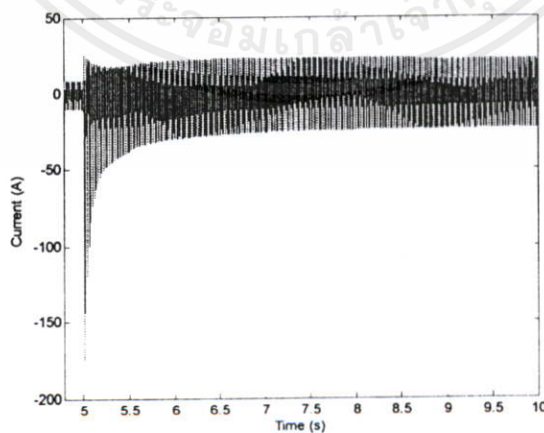
รูปที่ 5.37 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 135°



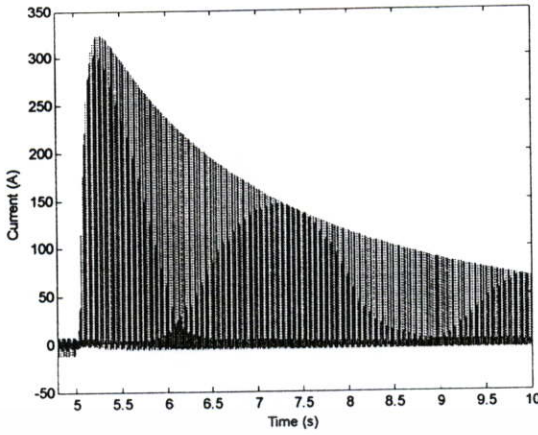
รูปที่ 5.38 กระแสขั้วเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 135°



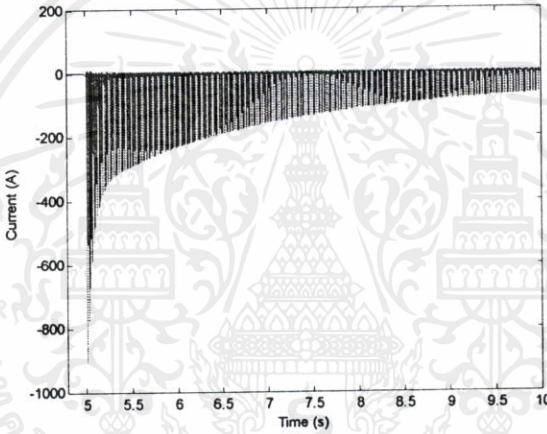
รูปที่ 5.39 กระแสขั้วเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 135°



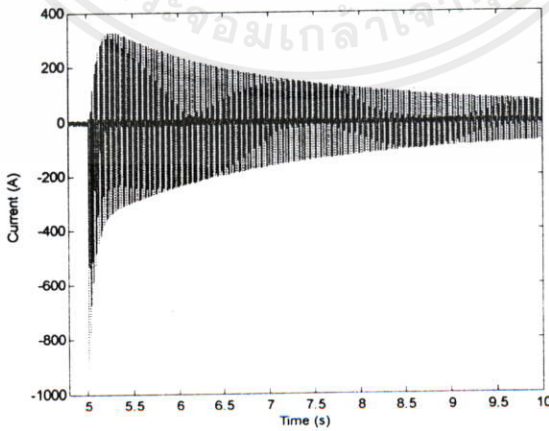
รูปที่ 5.40 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 135° ที่มีการนำไปใช้



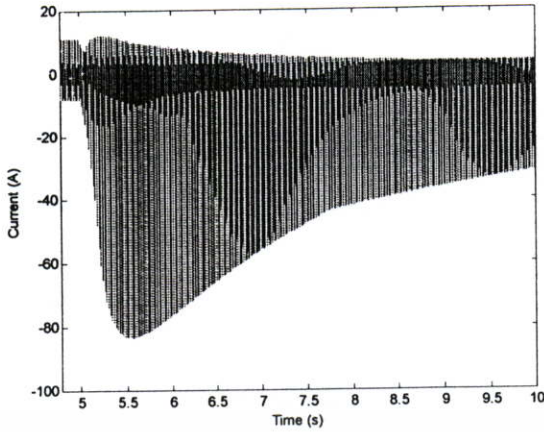
รูปที่ 5.41 กระแสขิมพาทะติคอินรัฟเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 180°



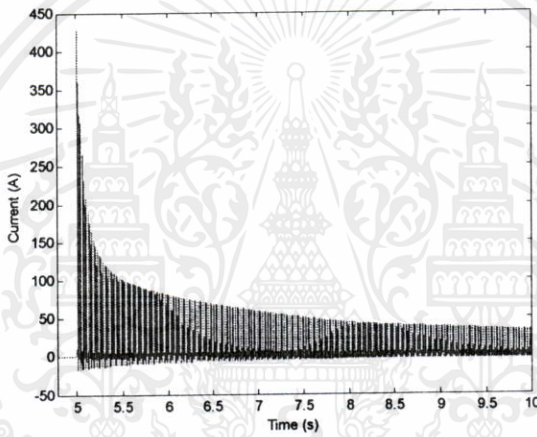
รูปที่ 5.42 กระแสอินรัฟเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 180°



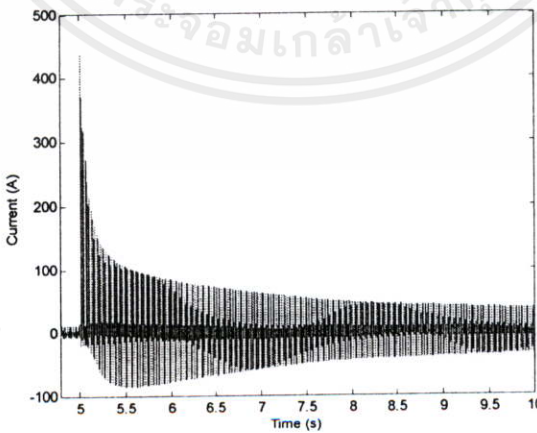
รูปที่ 5.43 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 180° ที่มีการนำไปใช้



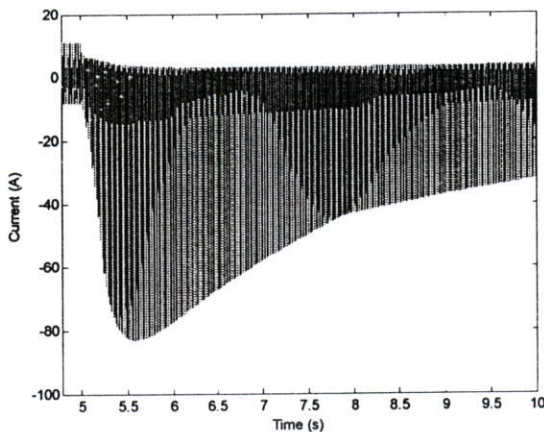
รูปที่ 5.44 กระแสซิมพาทาคอนิรซ์เฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 180°



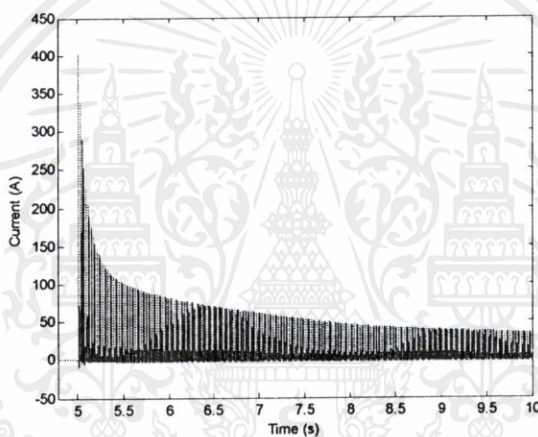
รูปที่ 5.45 กระแสอินรีฟเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 180°



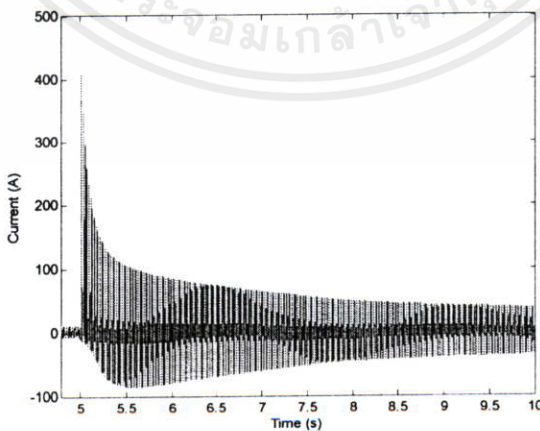
รูปที่ 5.46 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 180° ที่มีการนำไปใช้



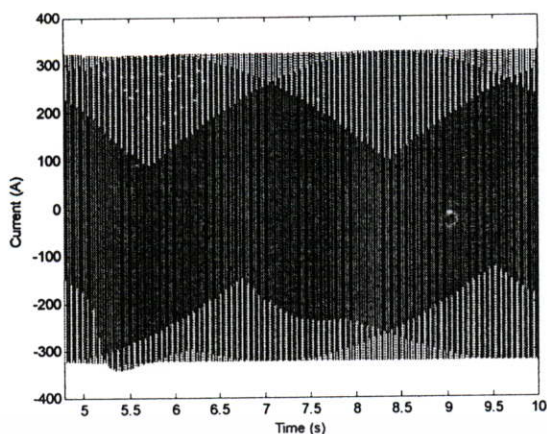
รูปที่ 5.47 กระแสซิมพาเทติกอินรัลเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 180°



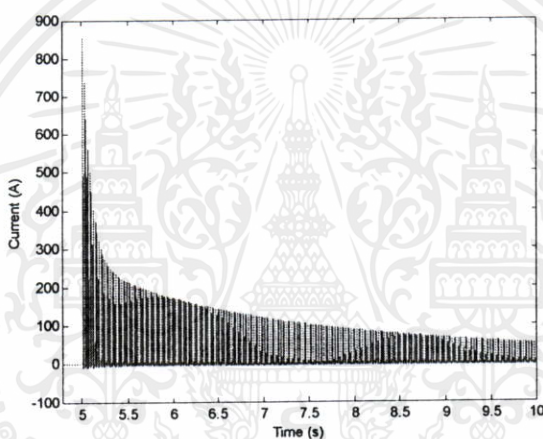
รูปที่ 5.48 กระแสอินรัลเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 180°



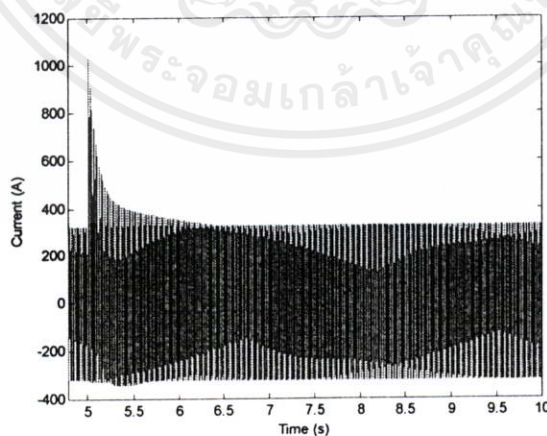
รูปที่ 5.49 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 180°



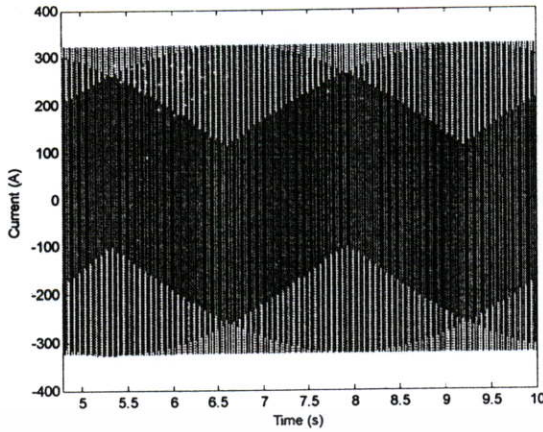
รูปที่ 5.50 กระแสซิมพาเทตคอินรีเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด



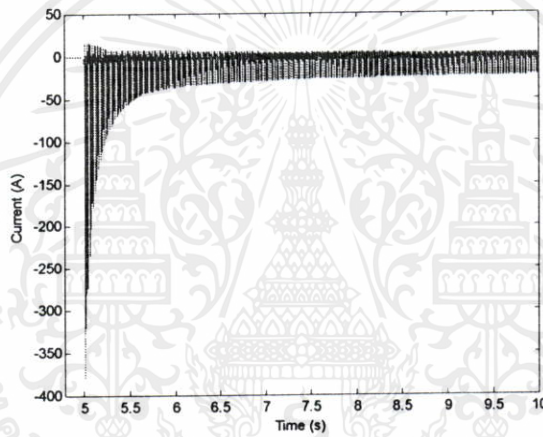
รูปที่ 5.51 กระแสอินรีเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด



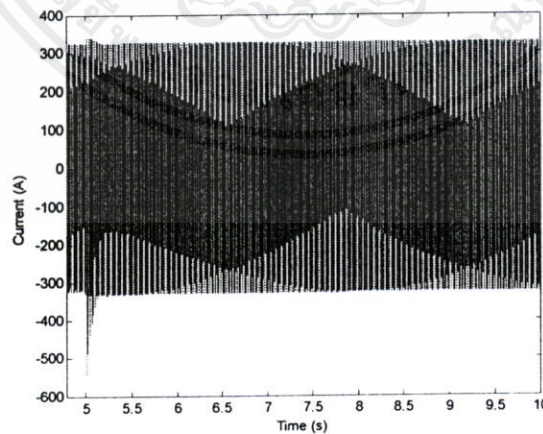
รูปที่ 5.52 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่าย
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ภาระโหลด
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.53 กระแสขิมพาเทคอินรีเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด

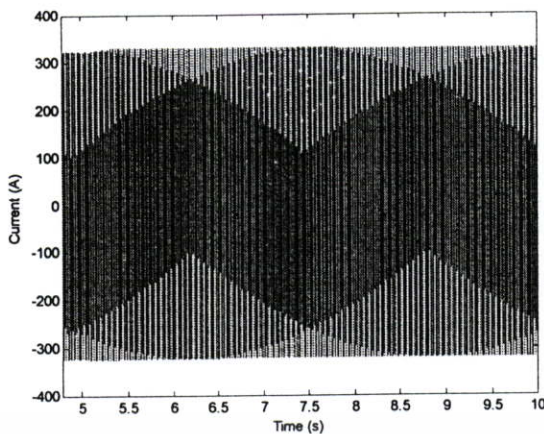


รูปที่ 5.54 กระแสอินรีเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด

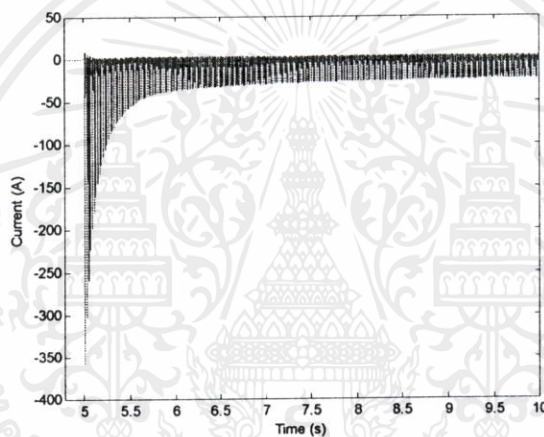


รูปที่ 5.55 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด

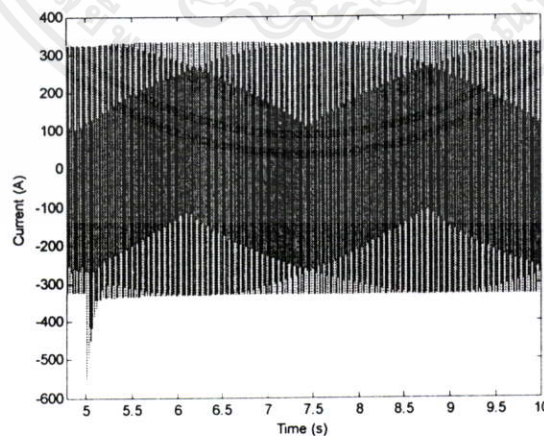
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



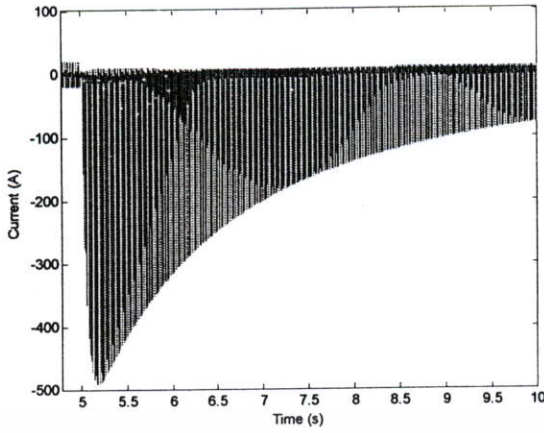
รูปที่ 5.56 กระแสซิมพาเทติกอินรัซเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด



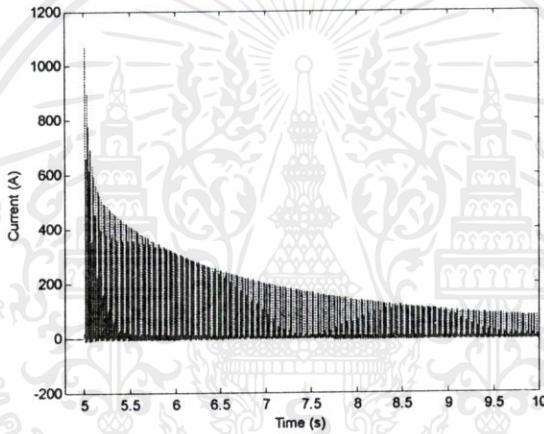
รูปที่ 5.57 กระแสอินรัซเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด



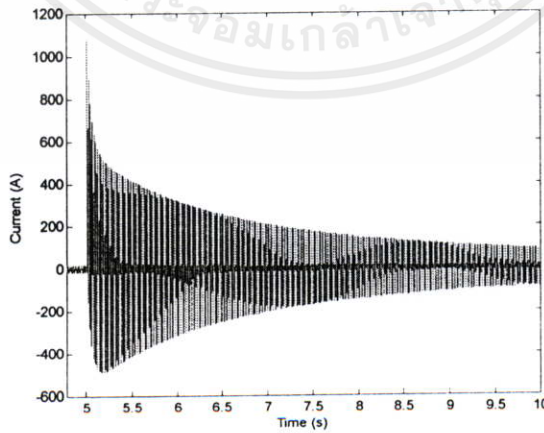
รูปที่ 5.58 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่าย
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ภาระโหลด
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



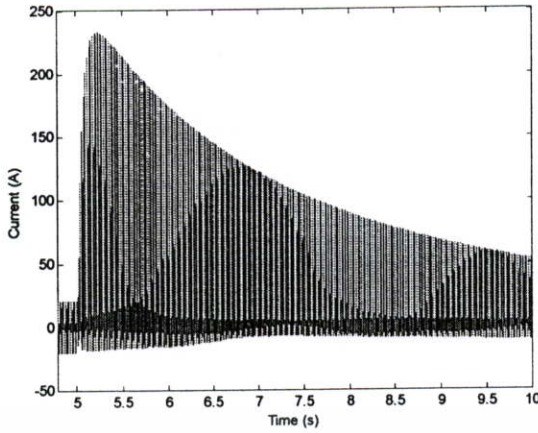
รูปที่ 5.59 กระแสซิมพาเทติกอินรีซเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ



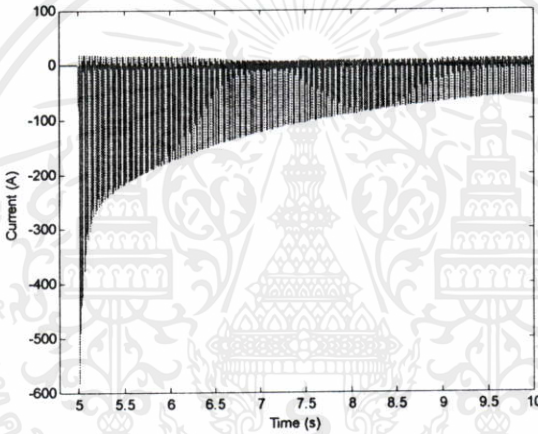
รูปที่ 5.60 กระแสอินรีซเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ



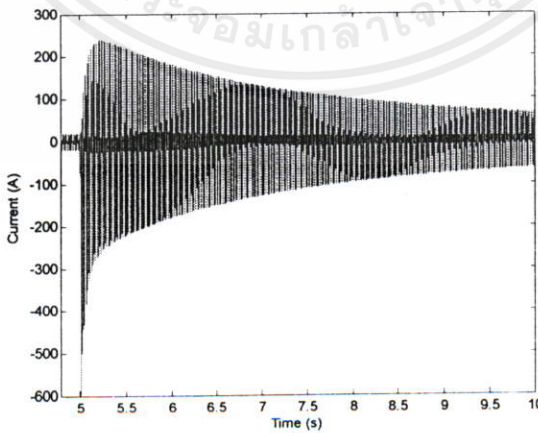
รูปที่ 5.61 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ



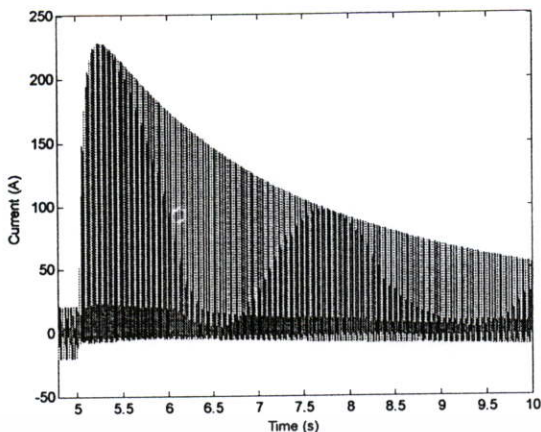
รูปที่ 5.62 กระแสขิมพาเทคอินรัชเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ



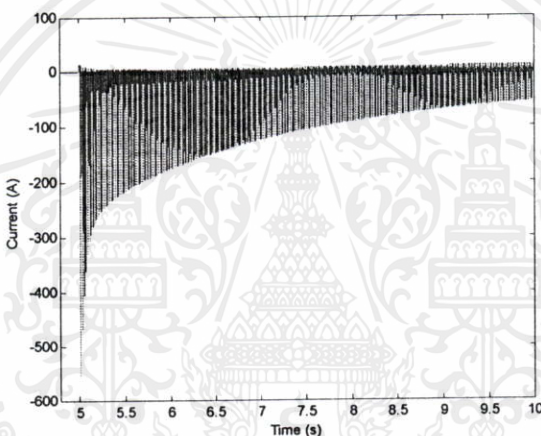
รูปที่ 5.63 กระแสอินรัชเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ



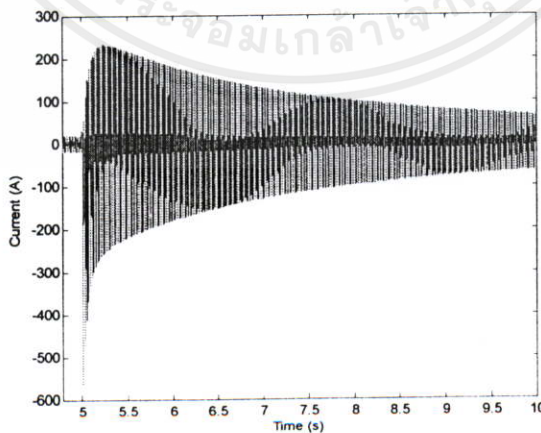
รูปที่ 5.64 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ



รูปที่ 5.65 กระแสซิมพาเทติกอินรัซเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

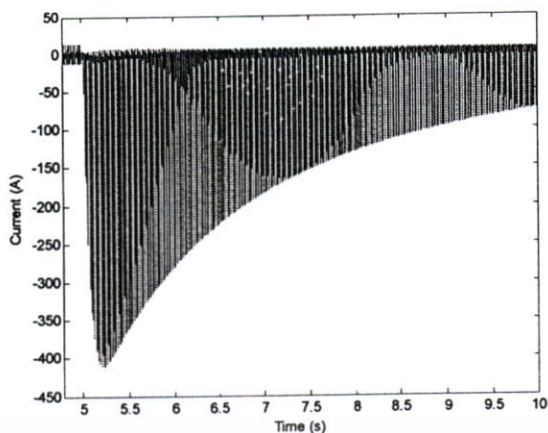


รูปที่ 5.66 กระแสอินรัซเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

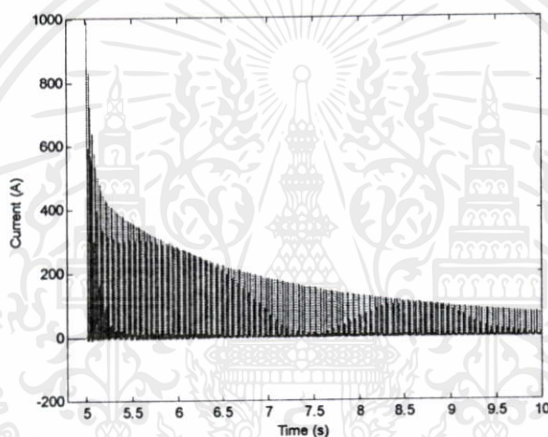


รูปที่ 5.67 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 90% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

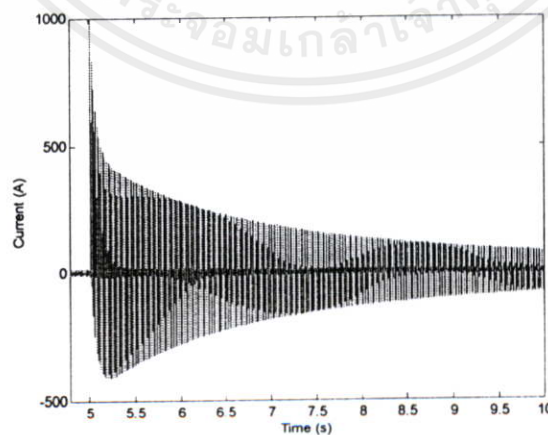
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยและใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า การขาย หรือการอื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.68 กระแสขิมพาเทตคอินรัชเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

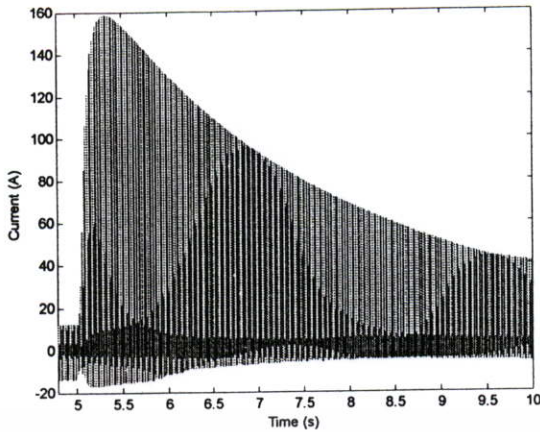


รูปที่ 5.69 กระแสอินรัชเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

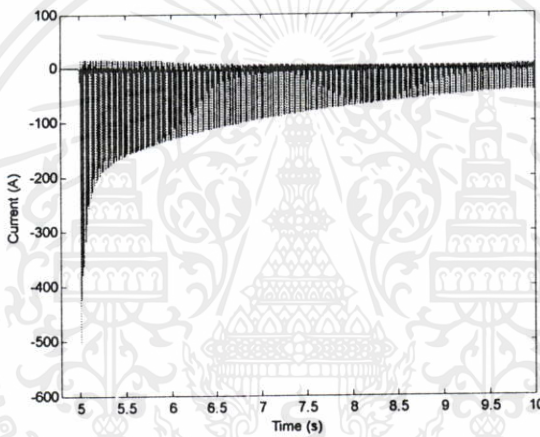


รูปที่ 5.70 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

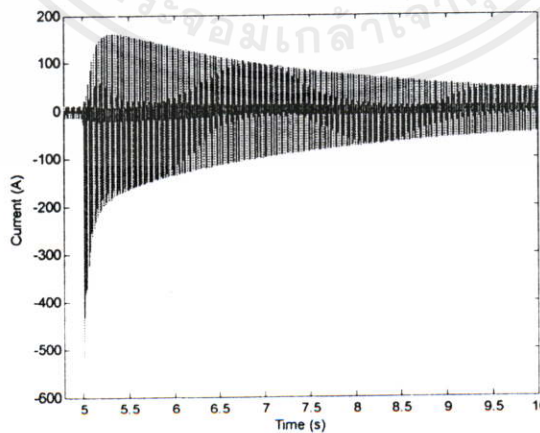
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ก่อนเผยแพร่การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้เพื่อการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอแจ้งด้วยว่าเอกสารนี้จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.71 กระแสขิมพาเทคอินรีฟเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

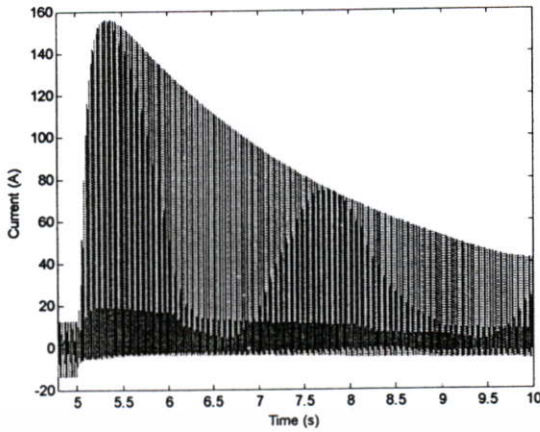


รูปที่ 5.72 กระแสอินรีฟเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

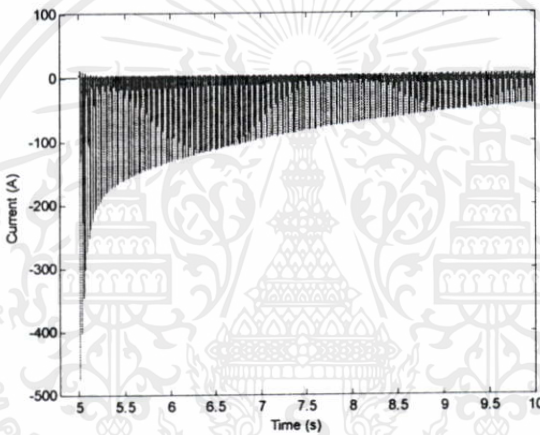


รูปที่ 5.73 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

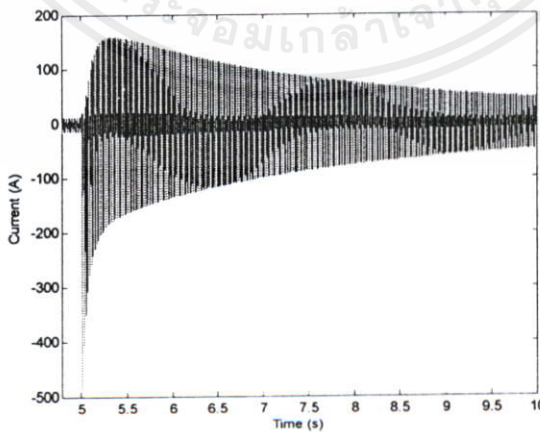
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



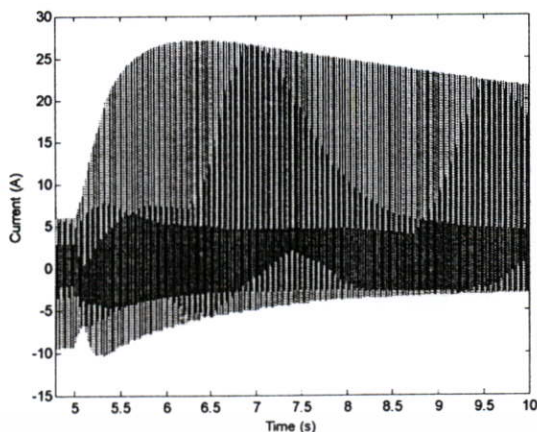
รูปที่ 5.74 กระแสซิมพาเทคอินรัฟเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ



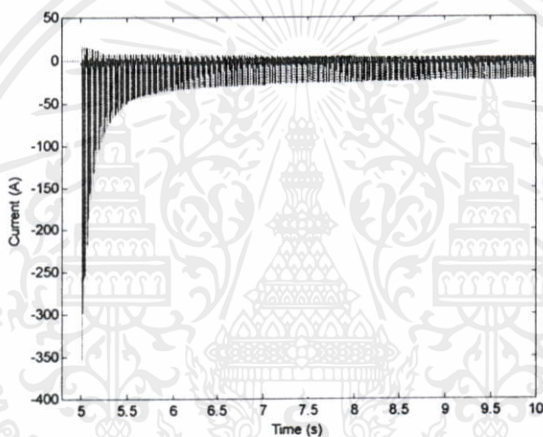
รูปที่ 5.75 กระแสอินรัฟเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ



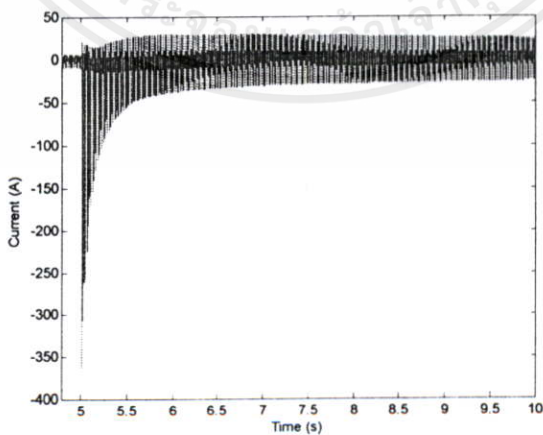
รูปที่ 5.76 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 95% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ



รูปที่ 5.80 กระแสขิมพาทะคินรัชเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 105% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

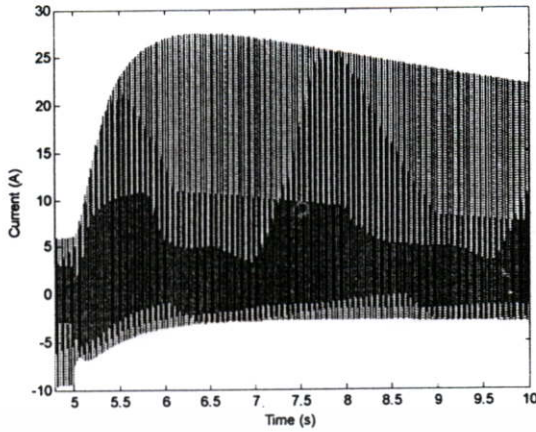


รูปที่ 5.81 กระแสอินรัชเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 105% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

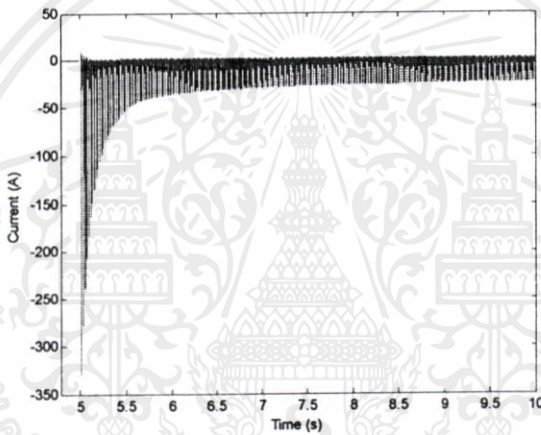


รูปที่ 5.82 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 105% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

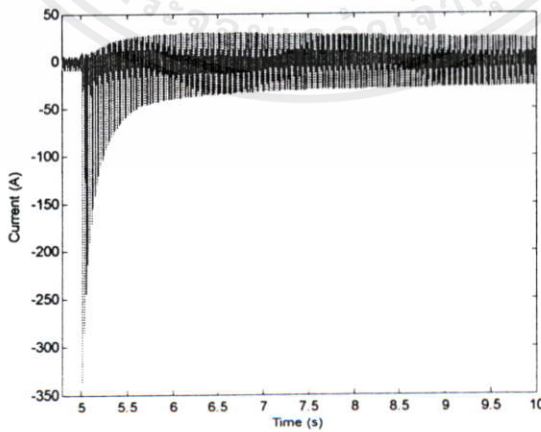
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะด้านเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้ข้อมูลไปแจ้งต่อทางราชการและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.83 กระแสขิมพาทศิอินรัชเฟส C ในหมีอแปลงไฟฟ้า T_1 กรณิศ่าฟลักร์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 105% ของค่าฟลักร์เหล็กอิมตัวปกติ

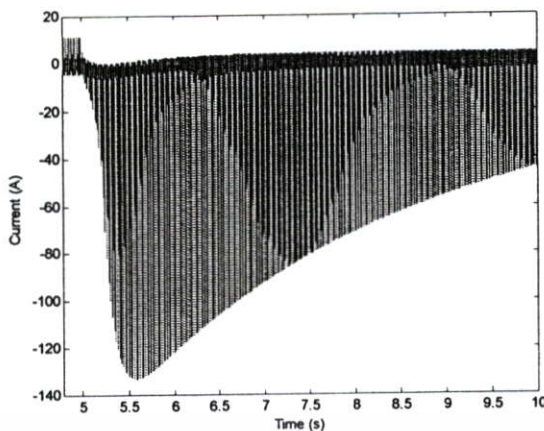


รูปที่ 5.84 กระแสอินรัชเฟส C ในหมีอแปลงไฟฟ้า T_2 กรณิศ่าฟลักร์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 105% ของค่าฟลักร์เหล็กอิมตัวปกติ

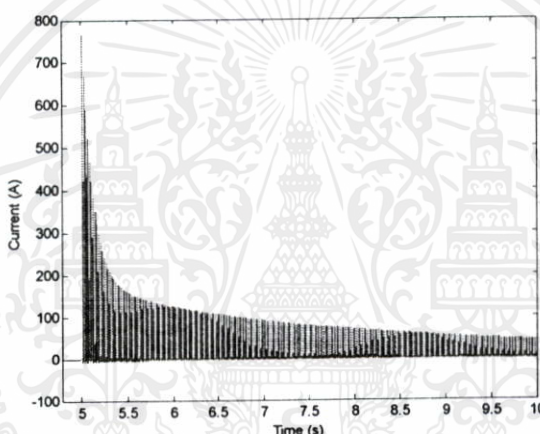


รูปที่ 5.85 กระแสผลรวมของหมีอแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณิศ่าฟลักร์แม่เหล็กอิมตัวมีค่า 105% ของค่าฟลักร์เหล็กอิมตัวปกติ

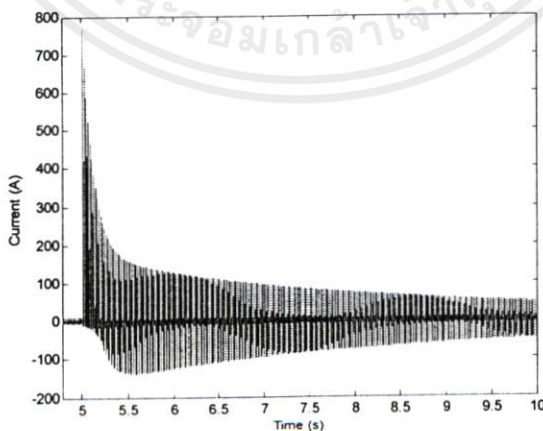
เอกสรเป็นเอกสรที่สงวนไว้สำหรับการใช้ของเอกสรลิมเมตที่สงวนไว้สำหรับการใช้ของเอกสรค่า
ไม่วากรณิศ่าทั้งอัน อิกทั้งค่าฟลักร์ให้ค่าฟลักร์และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสรทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.86 กระแสขิมพาทดคอินรัชเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

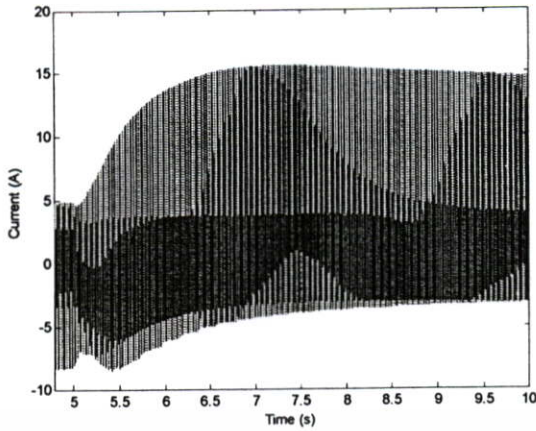


รูปที่ 5.87 กระแสอินรัชเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

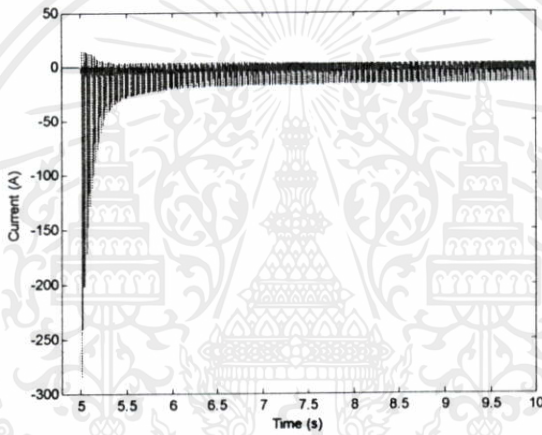


รูปที่ 5.88 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

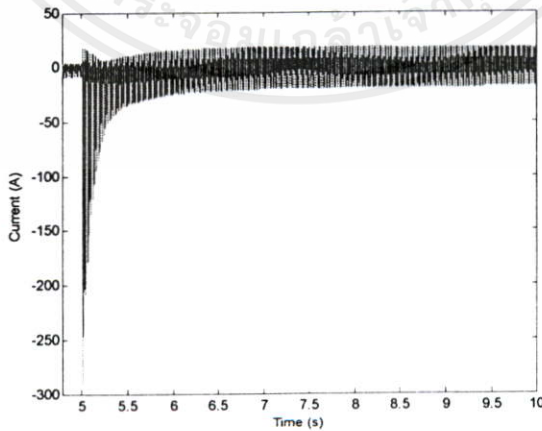
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยและพัฒนาการวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถเอามาใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถือว่าเป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.89 กระแสขิมพาเทคอินรัฟเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

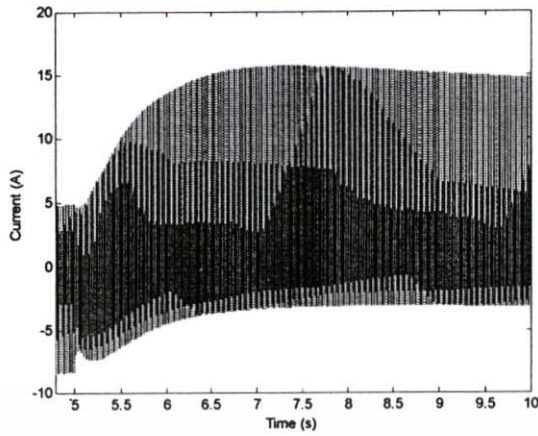


รูปที่ 5.90 กระแสอินรัฟเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

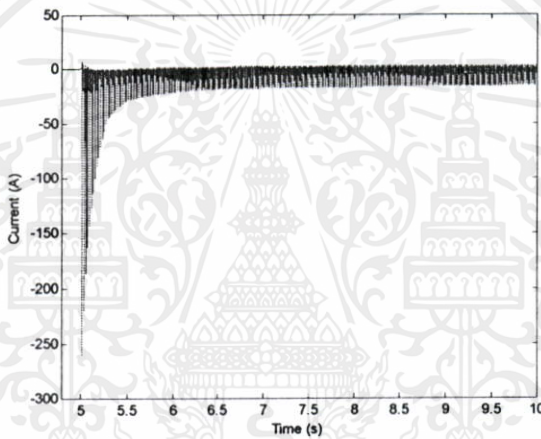


รูปที่ 5.91 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

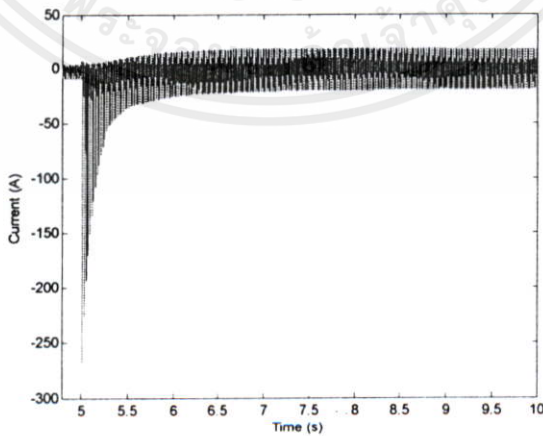
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของเอกสารถือว่าผิดกฎหมาย



รูปที่ 5.92 กระแสซิมพาเทติกอินรีเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ



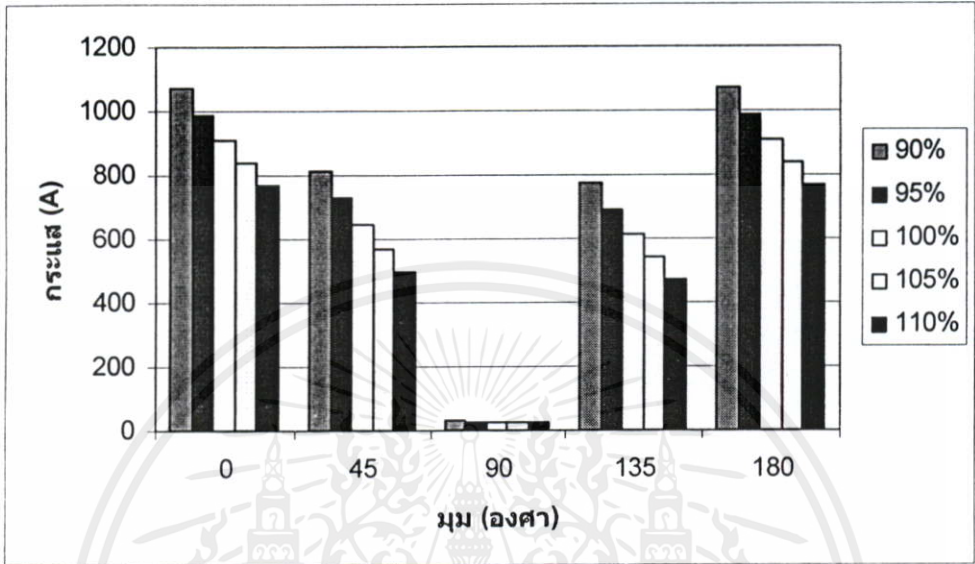
รูปที่ 5.93 กระแสอินรีเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ



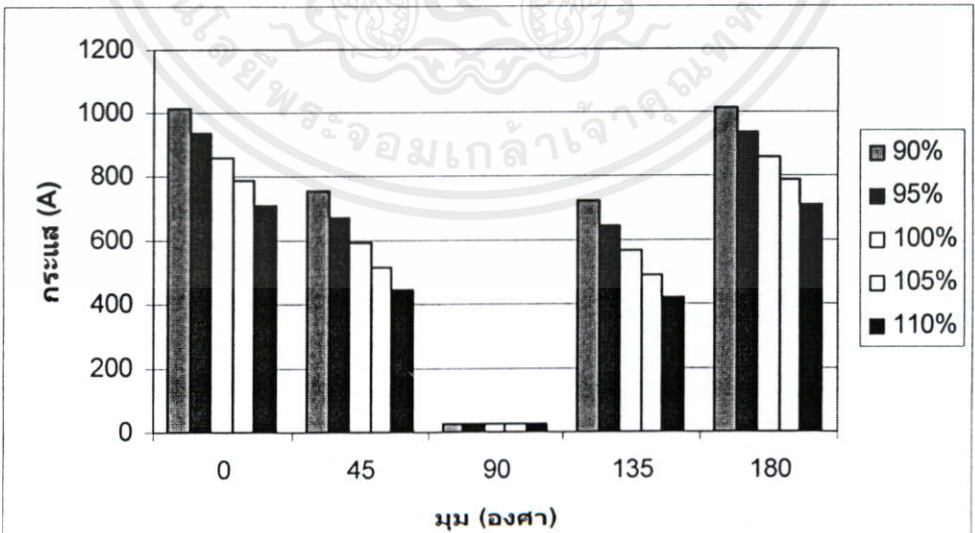
รูปที่ 5.94 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวมีค่า 110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวมไว้บนเว็บไซต์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยสงวนลิขสิทธิ์ไว้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถือว่าสงวนลิขสิทธิ์ไว้ด้วย และขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลทั้งหมดที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้
110% ของค่าฟลักซ์เหล็กอิ่มตัวปกติ

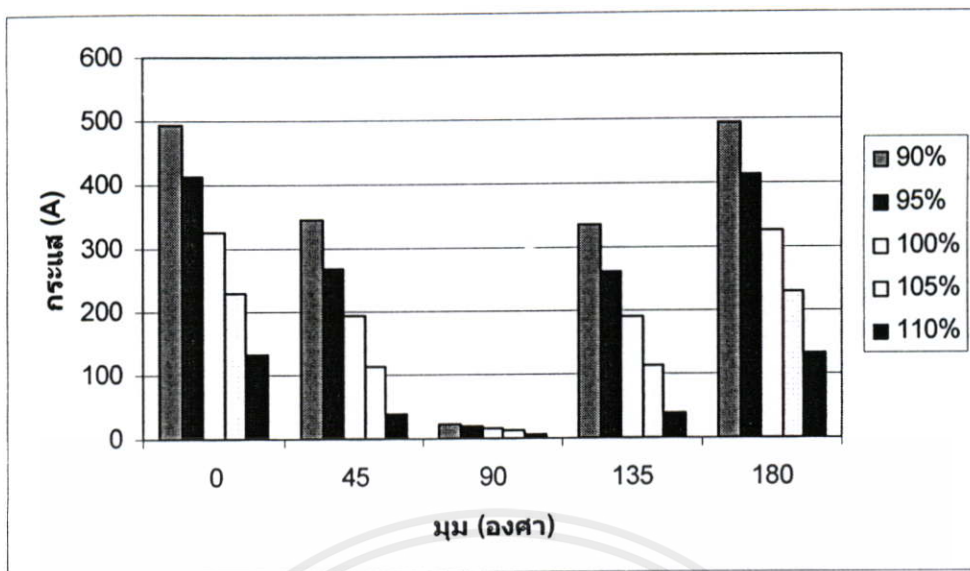
จากผลการจำลองดังกล่าว นำค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดมาเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 5.95 ถึง 5.112 แสดงให้เห็นผลกระทบจากปัจจัยต่างๆที่มีต่อขนาดของกระแสขั้วพาทดกอินรัช ที่อาจส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาดได้



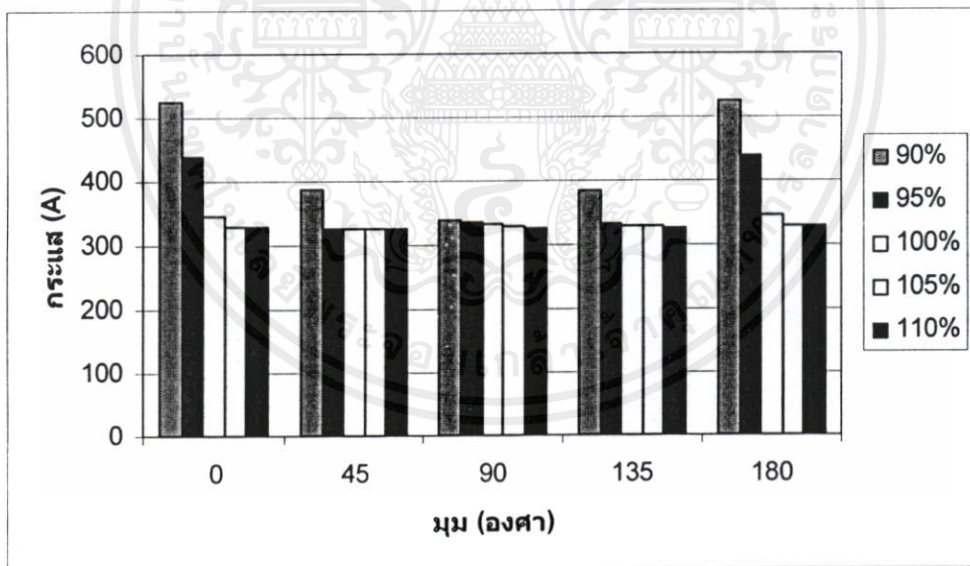
รูปที่ 5.95 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสอินรัชเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด



รูปที่ 5.96 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสอินรัชเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จำภาระโหลด

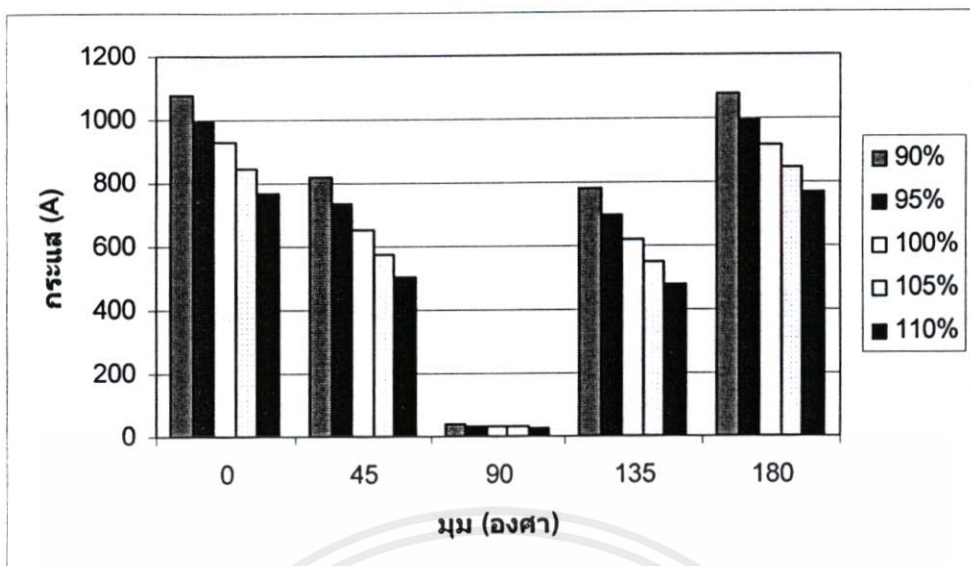


รูปที่ 5.97 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสซิมพาเทติกอินรัฟเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T, กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด

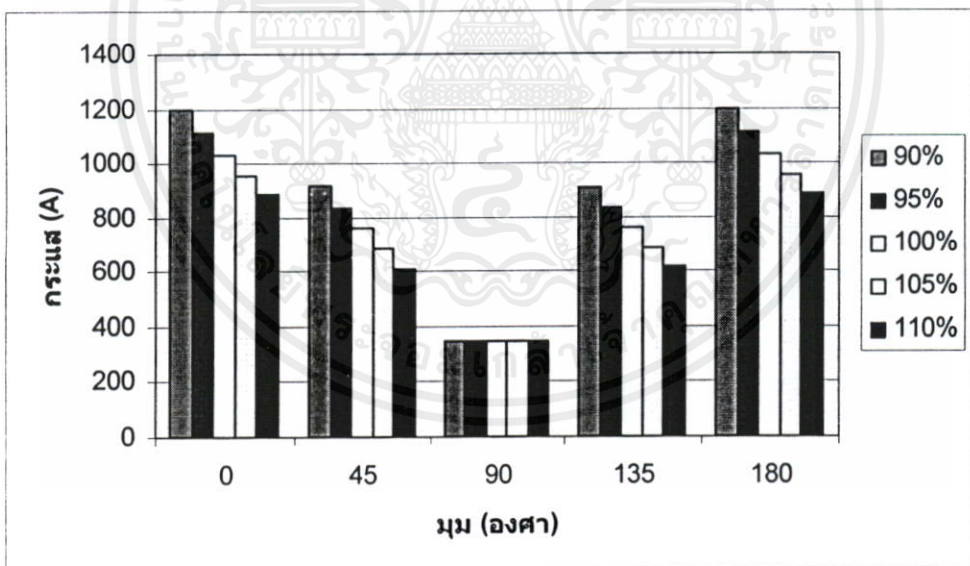


รูปที่ 5.98 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสซิมพาเทติกอินรัฟเฟส A ในหม้อแปลงไฟฟ้า T, กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T, จ่ายภาระโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

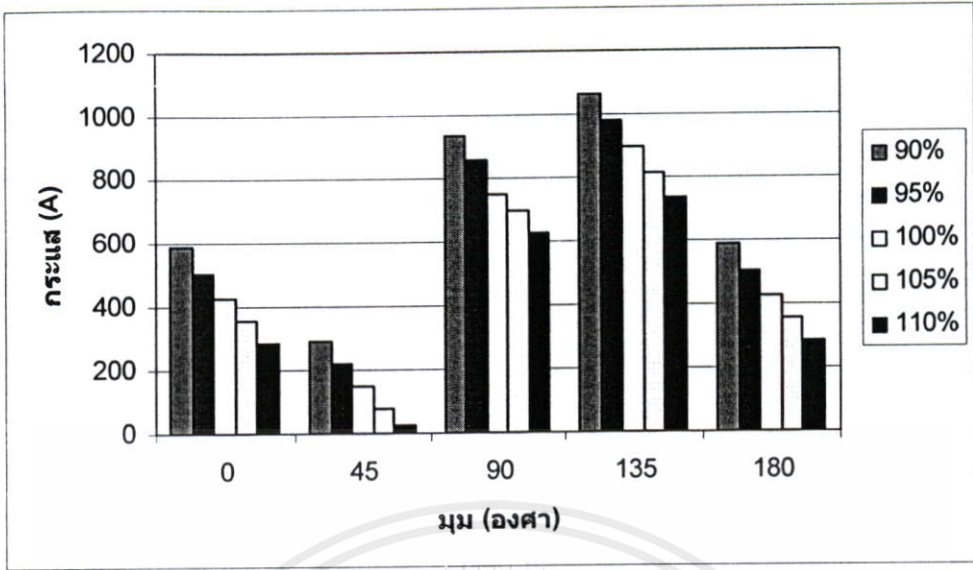


รูปที่ 5.99 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด

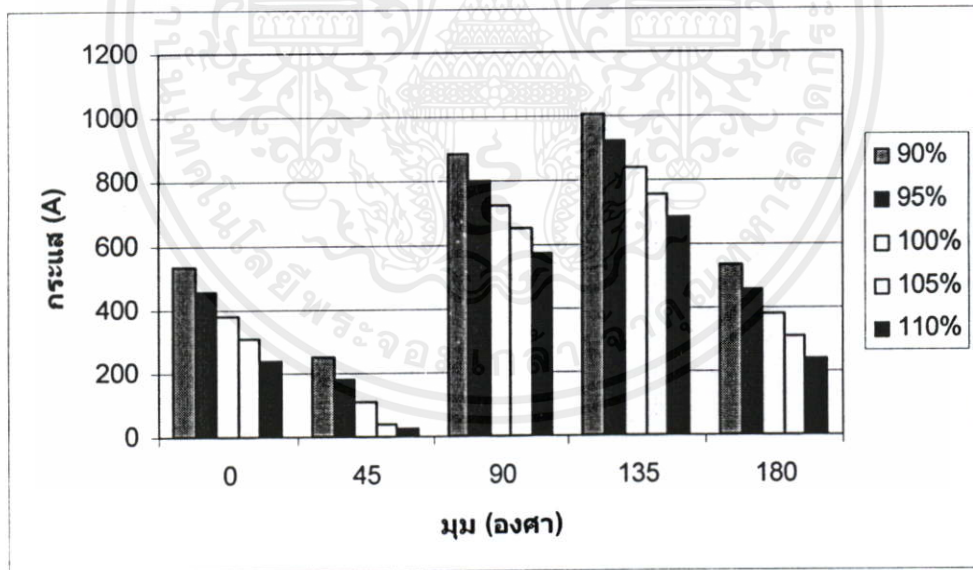


รูปที่ 5.100 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส A กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

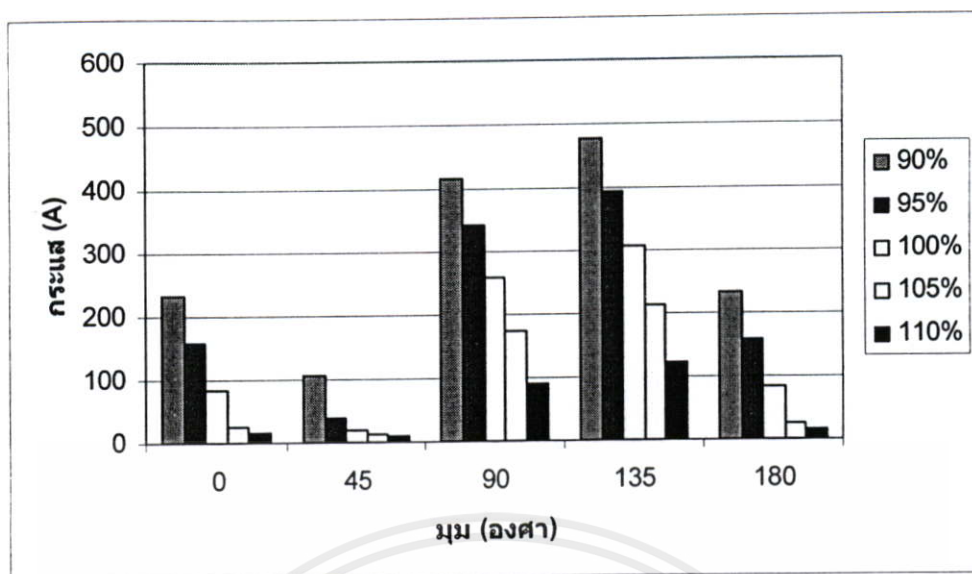


รูปที่ 5.101 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสอินรีฟเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T₂ กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด

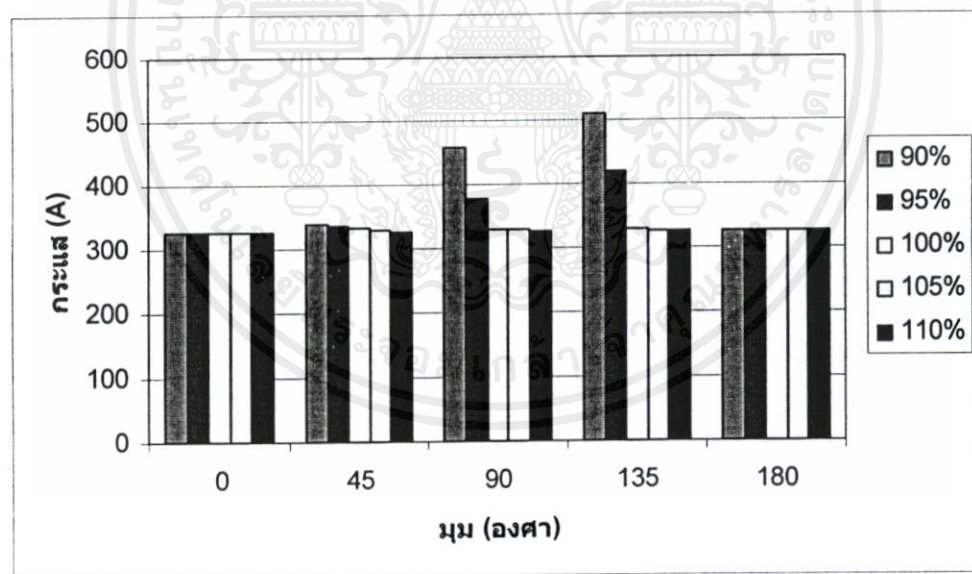


รูปที่ 5.102 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสอินรีฟเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T₂ กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T₁ จำภาระโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

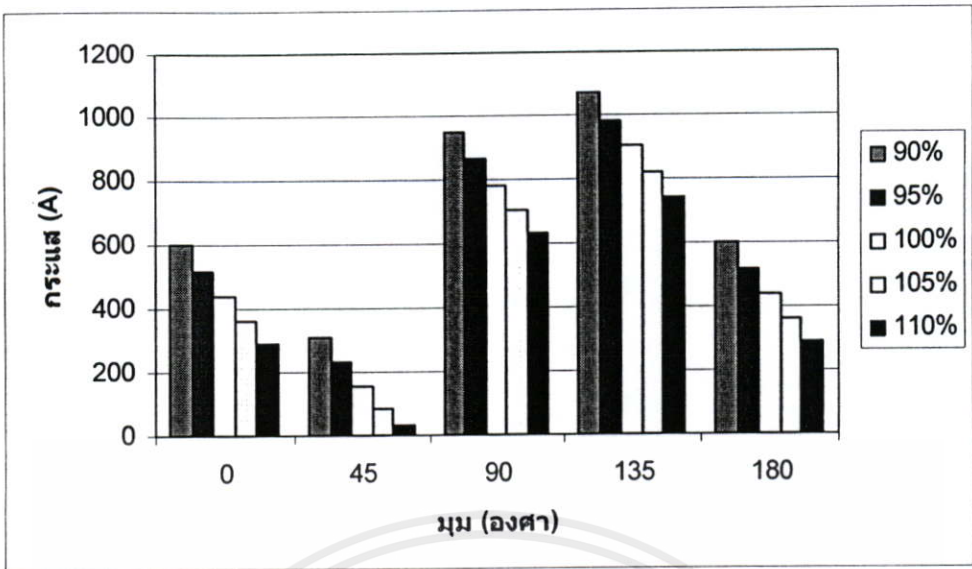


รูปที่ 5.103 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสขั้วพาดคิกอินรีเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด

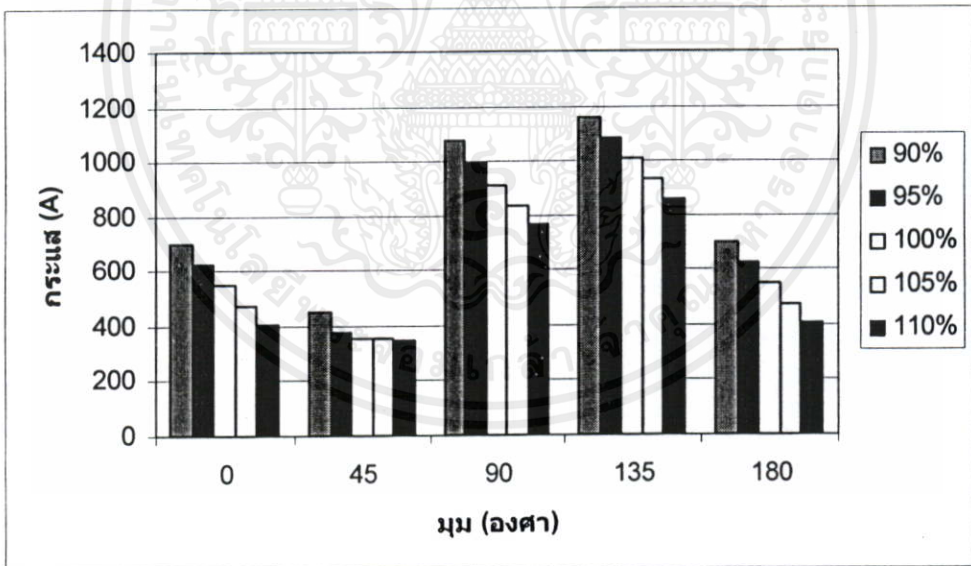


รูปที่ 5.104 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสขั้วพาดคิกอินรีเฟส B ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ง่ายภาระโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

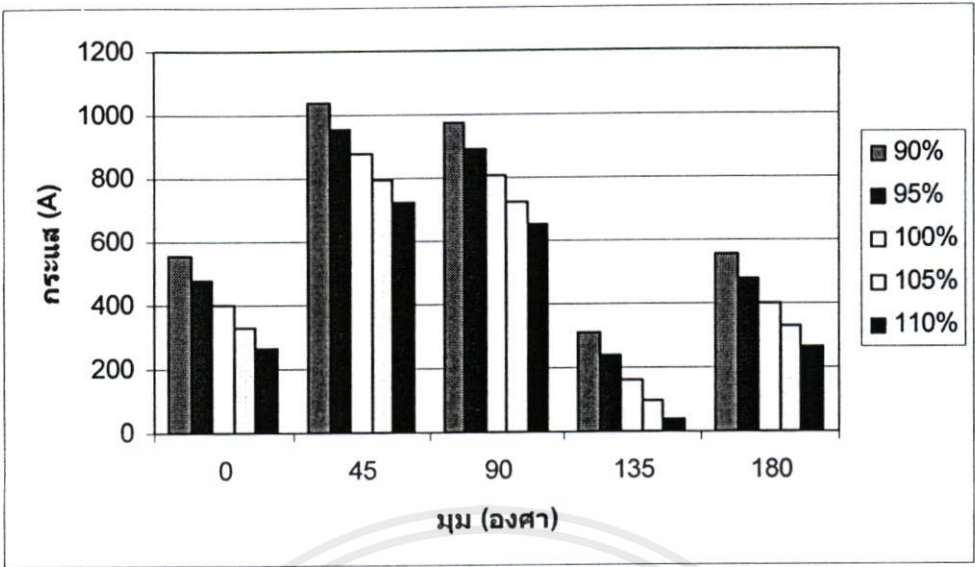


รูปที่ 5.105 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด

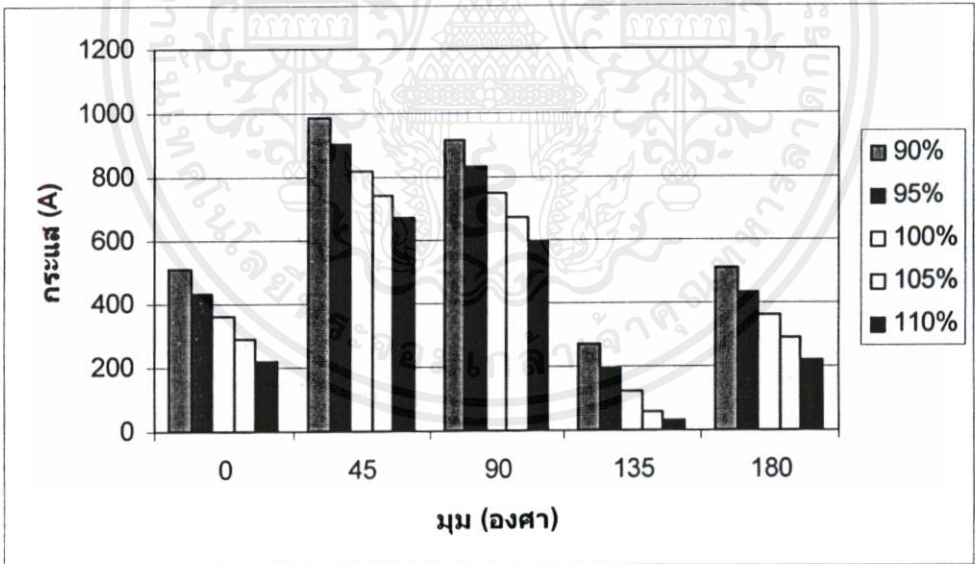


รูปที่ 5.106 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส B กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ว่างภาระโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

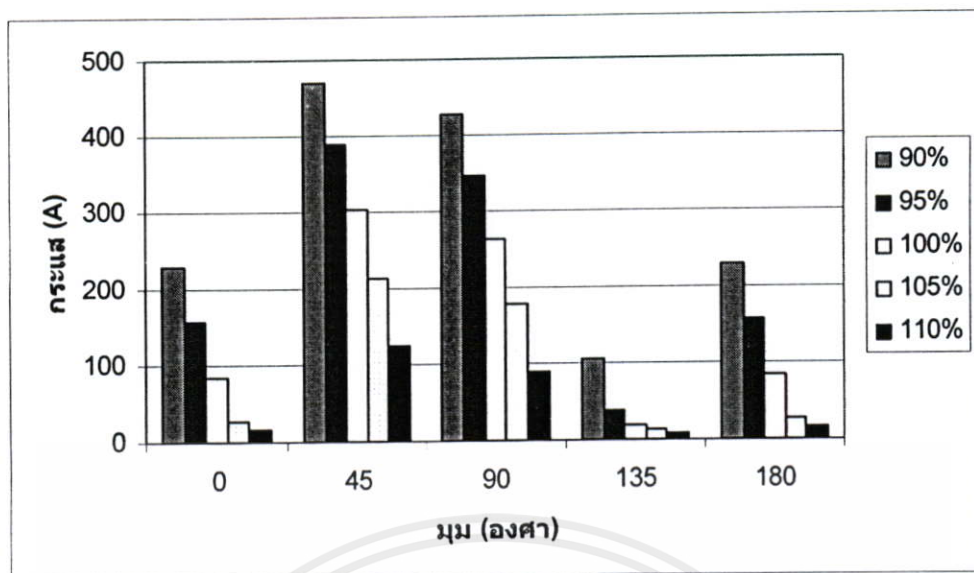


รูปที่ 5.107 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสอินรีเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T₂ กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด

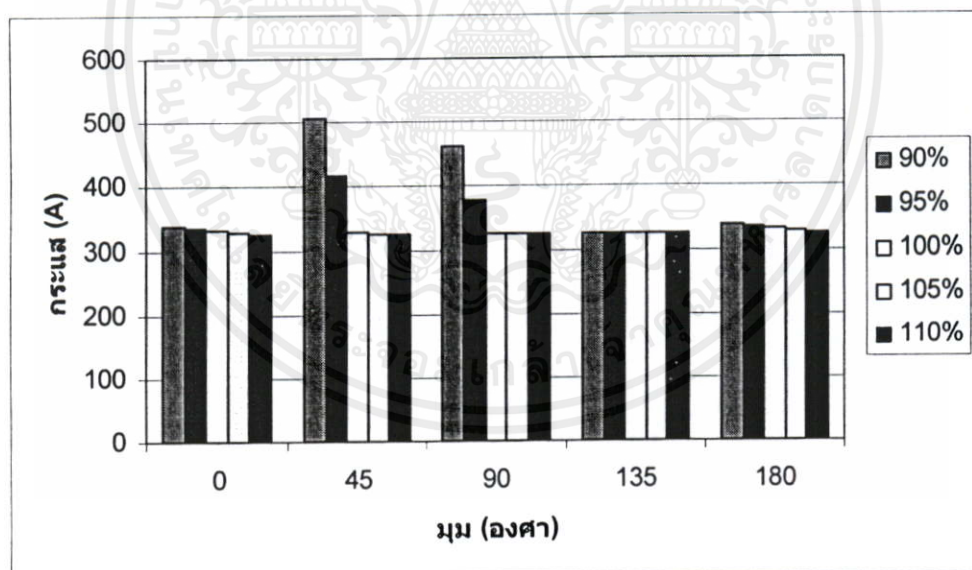


รูปที่ 5.108 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสอินรีเฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T₂ กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T₁ ง่ายภาระโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

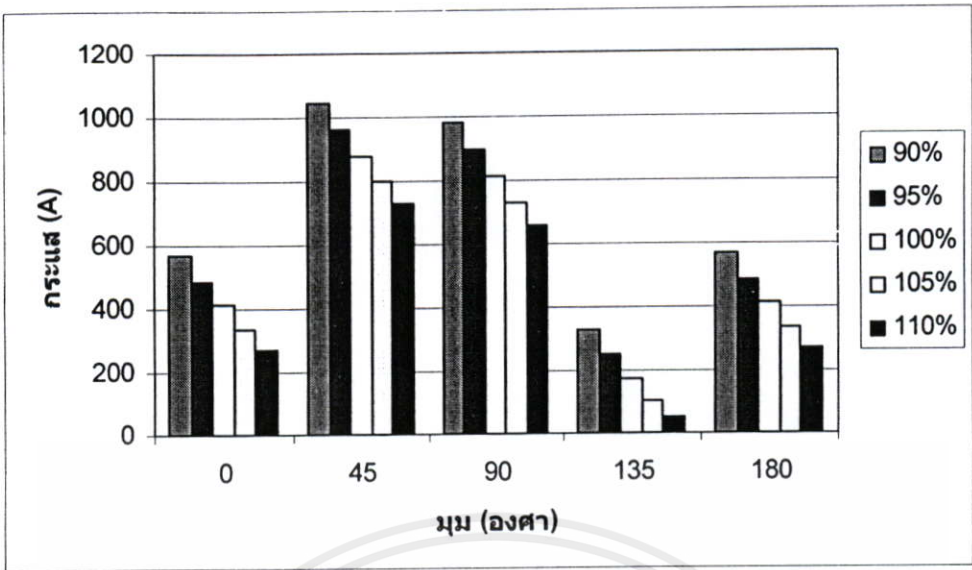


รูปที่ 5.109 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสซิมพาเทติกอินรีฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด

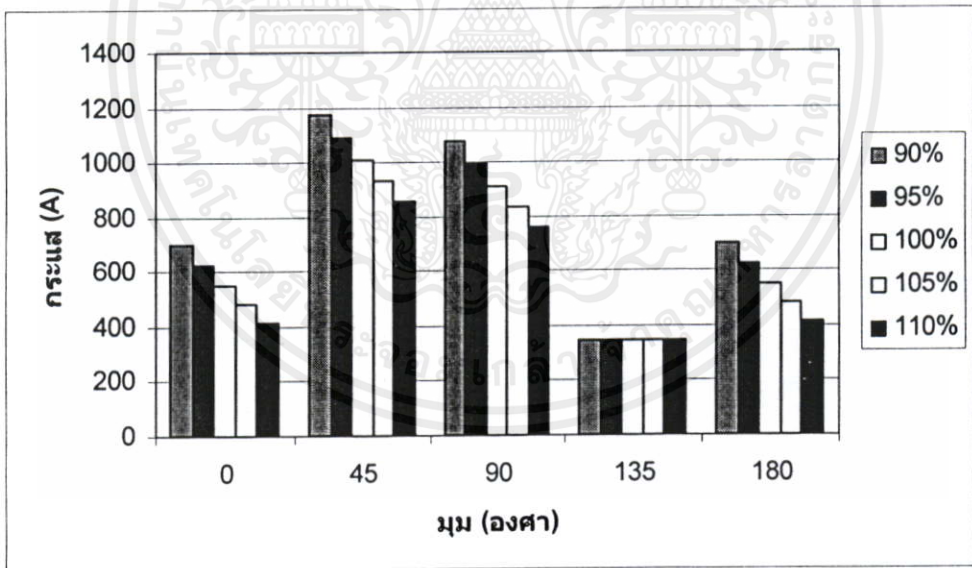


รูปที่ 5.110 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสซิมพาเทติกอินรีฟส C ในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ง่ายภาระโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.111 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองไม่มีภาระโหลด



รูปที่ 5.112 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 เฟส C กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ว่างภาระโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาวิจัยเพื่อวิเคราะห์การเกิดกระแสซิมพาทิคอินรักระหว่างหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP ประกอบกับการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดของกระแสซิมพาทิคอินรัที่เกิดขึ้น สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

6.1 ลักษณะการเกิดกระแสซิมพาทิคอินรั

ปรากฏการณ์การเกิดกระแสซิมพาทิคอินรัระหว่างหม้อแปลงเกิดขึ้นเมื่อมีหม้อแปลงไฟฟ้าต่อขนานจากบัสเดียวกัน ซึ่งตัวแรกได้จ่ายไฟอยู่ก่อนจนถึงช่วงเวลาสถานะกระแสคงที่ และตัวที่ 2 อยู่ในช่วงเริ่มจ่ายไฟ เมื่อเกิดกระแสอินรัขึ้นที่หม้อแปลงตัวที่ 2 ทำให้มีกระแสไหลในหม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรก ซึ่งเกิดกระแสกระตุ้นขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรก เรียกกระแสนั้นว่า กระแสซิมพาทิคอินรั

6.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดของกระแสซิมพาทิคอินรั

การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดของกระแสซิมพาทิคอินรัที่เกิดขึ้นระหว่างหม้อแปลงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากมุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ ภาวะโหลดของหม้อแปลง และฟลักซ์แม่เหล็กอ้อมตัวภายในหม้อแปลง โดยสามารถสรุปผลการจำลองได้ดังนี้

6.2.1 ผลกระทบจากมุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์

จากการศึกษาผลกระทบจากมุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.1 สังเกตได้จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในรูปที่ 5.67 จะเห็นว่าที่มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0° ขนาดของกระแสซิมพาทิคอินรัจะมีค่าสูงสุด และมีค่าลดลงเรื่อยๆตามมุมสลับที่เพิ่มขึ้นจนมีค่าต่ำสุดที่มุมของแรงดันขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 90°

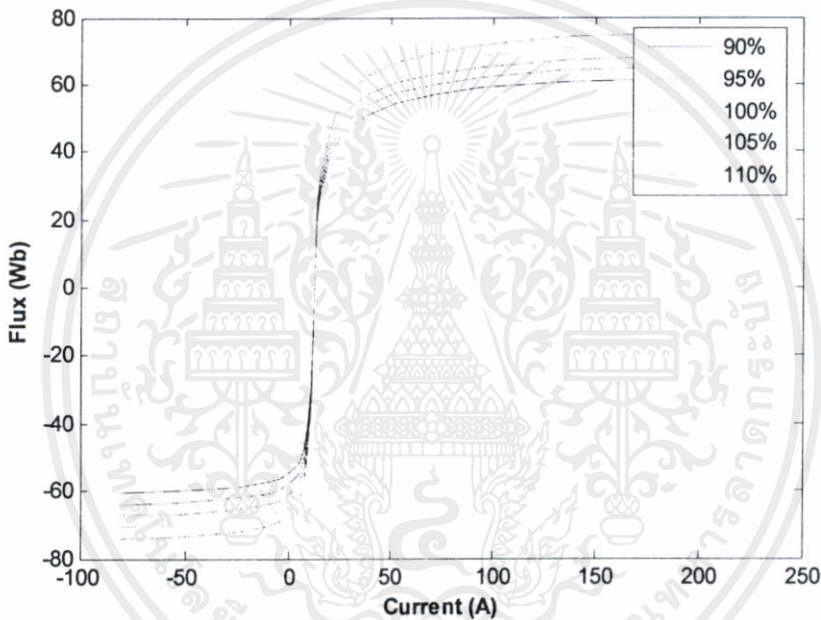
6.2.2 ผลกระทบจากภาวะโหลดของหม้อแปลง

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรกมีภาวะโหลดต่ออยู่ จะทำให้ขนาดของกระแสซิมพาทิคอินรัที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าในกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีภาวะโหลด สังเกตได้การเปรียบเทียบค่า

สัมประสิทธิ์สูงสุดระหว่างรูปที่ 5.67 และ 5.68 ณ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ และค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวภายในหม้อแปลงเท่ากัน

6.2.3 ผลกระทบจากฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวภายในหม้อแปลง

จากการศึกษาจะเห็นว่าค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวภายในหม้อแปลงมีค่าต่ำ ขนาดของกระแสชิมพาเทติกอินรัชจะมีค่าสูง ในทางกลับกันหากค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวภายในหม้อแปลงมีค่าสูง ขนาดของกระแสชิมพาเทติกอินรัชจะมีค่าต่ำ สังเกตได้จากรูปที่ 6.1 จะเห็นว่า ณ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กเดียวกัน หม้อแปลงที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวสูงกระแสจะต่ำกว่าหม้อแปลงที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอิมตัวต่ำ



รูปที่ 6.1 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์แม่เหล็กกับกระแสของหม้อแปลง

6.3 สิ่ง ที่ควรได้รับการพิจารณาต่อไป

นอกเหนือจากการวิเคราะห์กระแสชิมพาเทติกอินรัชระหว่างหม้อแปลงกรณีต่อขนานจากบัสเดียวกันในวิทยานิพนธ์นี้แล้ว ควรทำการศึกษาและวิเคราะห์ถึงปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบต่อขนาดของกระแสชิมพาเทติกอินรัช เช่น ค่าความต้านทานของระบบ หรือกรณีที่มีหม้อแปลงต่ออยู่ในระบบมากกว่าสองตัว รวมถึงการวิเคราะห์ห้องคัปเปอร์ฮาร์โมนิกที่อาจส่งผลกระทบต่อรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้หลักการตรวจจับฮาร์โมนิก และนำกรณีศึกษานี้เป็นแนวทางในการทำการทดสอบจริง เพื่อลดความผิดพลาดของรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงไม่ให้งานในสภาวะนอกเหนือจากสภาวะฟอลต์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Equipment and Power System Diagram Section, Transmission System Operation & Planning Department, System Control Operation Division, EGAT, "Switching and Transmission Line Diagram," September 2002.
- [2] GEC ALSTHOM MEASUREMENTS LIMITED, "Protective Relays Application Guide", Stafford, England, 1987.
- [3] เกรียงไกร กิตติวรารุณี, "การศึกษาและวิเคราะห์กระแสอินรัชของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการแปลงเวฟสี่เหลี่ยม", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [4] H. J. Li and J. L. Blackburn, Applied Protective Relaying, First Edition, Westinghouse-Electric Corporation, 1976.
- [5] S.V. Kulkarni and S.A. Khaparde, "Transformer Engineering Design and Practice", Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [6] A. A. Hudson, "Transformer Magnetizing Inrush Current a Resume of Published Information." Electrical Research Association, Report No. 5152, August, 1966.
- [7] M. Sengul, B. Alboyaci, S. Ozturk and H.B. Cetinkaya, "Case Study of Sympathetic Interaction between Transformers Caused by Inrush Transients", International Conference on Power Systems Transients, Canada, June 19-23, 2005.
- [8] H. BronZeado and R. Yacamini, "Phenomenon of Sympathetic Interaction between Transformers Caused by Inrush Transients", Proceedings IEE – Science, Measurement and Technology, Vol. 142, No. 4, July 1995., pp.323-329.
- [9] A. Kulidjian and B. Kasztenny, "An Improved Transformer Inrush Restraint Algorithm", 53rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, April 11-13, 2000.
- [10] H. S. Bronzeado, P. B. Brogan and R. Yacamini, "Harmonic Analysis of Transient Currents during Sympathetic Interaction", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 11, No. 4, November 1996, pp. 2051-2056.
- [11] X. F. Sun, H. C. Shu, D. J. Si, "Analysis on Performance of Inrush Current Identification Algorithms under Sympathetic Inrush",

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] จิตร อินทร์พยุง, “การวิเคราะห์ฟอลต์ที่ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [13] Brandwajn V, Dommel H. W and Dommel I.I. 1982. “Matrix Representation of Three-Phase N-Winding Transformer for Steady-State and Transient Studies” IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-01, No.6, 1369-1978.
- [14] BPA 1987-1996., **Alternative Transient Program (ATP) Rule Book USA.**
- [15] L. Prikler and Hans Kr. Hoidalen. 1998., **ATPDraw for Windows 3.1x/95/NT Version 1.0 User’s Manual**, SINTEF Energy Research, Trondheim, Norway.
- [16] A. Narang and R. H. Brierley. 1994. “Topology Based Magnetic Model for Steady-State and Transient Studies for Three Phase Core Type Transformers” IEEE Transaction on Power Systems, Vol.9, No.3, 1337-1349.
- [17] X. Chen and S. S Venkata. 1997. “A Three Phase Three Winding Core-Type Transformer Model for Low-Frequency Transient Studies” IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.12, No.2, 775-782.
- [18] P. Bastard, P. Bertrand and M. Meunier. 1994. “A Transformer Model for Winding Fault Studies” IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.9, No.2, 690-699.
- [19] A.I Megahed. 2001. “A Model for Simulating Internal Earth Faults in Transformer” IEE Developments in Power System Protection, No.479, 775-782.
- [20] P. P. Buckle, K L Butler, N.D.R. Sarma and A. Kopp. 1999. “Simulation of Incipient Transformer Fault” IEEE Transaction on Power Delivery.
- [21] R. K Aggarwal and P. Mao. 1998. “Digital Simulation of The Transient Phenomena in High Voltage Power Transformers with Particular Reference to Accurate Fault Detection” IEE International Conference on Simulation, No.457, 390-397.
- [22] M. Kezunovic, C. W. Fromen and F. Philips. 1994. “Experimental Evaluation of EMTP Based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study” IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.9, No.1, 405-413.
- [23] R. Flocker, SEL. “Determine Current Transformer Suitability Using EMTP Model” SEL Inc. Pullman, WA, USA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การคำนวณหาค่าเมตริกซ์ RL ในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้ โปรแกรม BCTRAN

ผลการทดสอบหม้อแปลง B (จาก บริษัท เอบีบี จำกัด Serial no. 56039) เป็นดังต่อไปนี้

Power Rating S/Winding Connection : 50.0 MVA/YNyn0

Voltage Rating : 115.0 / 23 kV

Current Rating : 251.02/1255.11A

Positive Excitation Losses (Open HV) : 22.18 kW

Positive Excitation Current : 0.922 A

Positive Excitation Voltage (Energized at Rated Voltage) : 23 kV

Positive Short-Circuit Losses (Short LV) : 148.10 kW

Positive Short-Circuit Current (Energized at Rated Current) : 251.07 A

Positive Short-Circuit Voltage : 14.44 kV

Zero Excitation Losses (Open HV) : 221.0 kW

Zero Excitation Current : 200 A

Zero Excitation Voltage : 1.993 kV

Zero Short-Circuit Losses (Short LV) : 345.0 kW

Zero Short-Circuit Current : 200.2 A

Zero Short-Circuit Voltage : 3.224 kV

จากผลการทดสอบหม้อแปลง ทำให้เราได้ข้อมูลที่ใช้ป้อนให้กับโปรแกรมย่อย BCTRAN สำหรับจำลองเป็นหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ ดังต่อไปนี้

ผลของข้อมูลในการทดสอบหม้อแปลงแบบจ่ายกระแสกระตุ้นที่จะใช้ในการป้อนให้กับโปรแกรมย่อย BCTRAN มีการคำนวณดังนี้ คือ

NW = 2 ทั้งนี้เนื่องจากเรามีขดลวดอยู่ 2 ขด

FREQ = 50.0 (Hz)

เนื่องจาก I_{EXPOS} (Positive Excitation Current) = 0.0735 (%) นั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ
ไม่ว่ากรณีใดๆ เนื่องจากว่าในการทำ Direct Excitation Test นั้นได้ทำในสภาวะแรงดันปกติ ดังนั้นให้นำไปใช้

$$I_0 = 0.922 \text{ A}$$

จากนั้นทำให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์จะได้

$$\text{IEXPOS} = 0.922 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{3} \times 23.0}{50} \times 100 = 0.0735 \%$$

$$\text{SPOS} = 50.0 \text{ (MVA)}$$

$$\text{LEXPOS (Positive Excitation Losses)} = 22.18 \text{ (kW)}$$

เนื่องจากว่าในการทำ Direct Excitation Test นั้นได้ทำในสภาวะแรงดันปกติ ดังนั้น

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

$$\text{IEXZERO (Zero Excitation Current)} = 35.39 \%$$

เนื่องจากว่าในการทำ Homopolar Excitation Test นั้นไม่ได้ทำในสภาวะแรงดันปกติ ดังนั้นค่ากระแสกระตุ้นลำดับศูนย์จึงต้องมีการปรับตั้งข้างล่างนี้

$$I_0 = \frac{200}{3} \times \frac{23.0}{\sqrt{3} \times 1.993} = 444.19 \text{ A}$$

จากนั้นทำให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ได้

$$\text{IEXZERO} = 444.19 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{3} \times 23.0}{50} \times 100 = 35.39 \%$$

$$\text{SZERO} = 50.0 \text{ (MVA)}$$

$$\text{LEXZERO (Zero Excitation Losses)} = 9810.97 \text{ (kW)}$$

$$\text{LEXZERO} = 221.0 \times \left[\frac{23.0}{\sqrt{3} \times 1.993} \right]^2 = 9810.97 \text{ kW}$$

NP = 0 เนื่องจากเป็นหม้อแปลงชนิด 3 เฟส

IT = 2 เนื่องจากการทำ Excitation Test ได้ทำในด้านแรงต่ำ

IW = 2 เนื่องจาก Magnetizing Branch ควรจะต่อที่ทางด้านขดลวดแรงต่ำ

IP = -1 ซึ่งเราต้องการให้เอาที่พหุของโปรแกรมอยู่ในรูปของ [A]-[R] และ [R]-[ωL] ด้านการคำนวณ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับข้อมูลทั่วไปจากโครงสร้างของหม้อแปลงที่ใช้ป้อนให้กับโปรแกรมนั้น จะกำหนดให้เริ่มป้อนจากขดลวดที่มีแรงดันสูงสุด

$K = 1$ (HV - Winding) ซึ่งหมายความว่าขดลวดขดที่ 1 เป็นขดที่มีแรงดันสูงสุด

$VRAT1 = 66.39$ (kV) เป็นค่าแรงดันเฟสกับกราวด์เนื่องจากหม้อแปลงต่อแบบ WYE ($115/\sqrt{3}$)

$R1 = 0.391$ สำหรับค่า R นั้น หากเราไม่ป้อน โปรแกรมก็จะทำการคำนวณภายในเอง สำหรับค่าดังกล่าวได้มาจาก

$$R_{sh} = \frac{1}{3} \times \left[\frac{148100}{251.07^2} \right] = 0.783 \Omega$$

$$\text{ดังนั้น, } R_1 = \frac{1}{2} R_{sh} = 0.391 \Omega$$

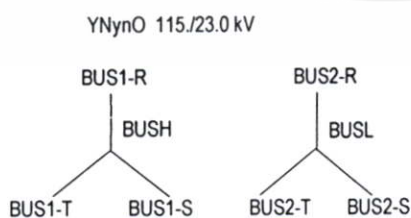
$K = 2$ (LV - Winding) เป็นขดลวดที่มีแรงดันสูงเป็นลำดับต่อมา

$VRAT2 = 13.279$ (kV) เป็นค่าแรงดันระหว่างเฟสกับกราวด์เนื่องจากหม้อแปลงต่อแบบ WYE ($23.0/\sqrt{3}$)

$R2 = 0.0156$ ซึ่งได้มาจาก

$$R_2 = R_1 \times \left[\frac{23.0}{115.0} \right]^2 = 0.0156 \Omega$$

ส่วนการกำหนดชื่อเทอร์มินอลของขดลวดจะเป็นดังต่อไปนี้



BUS1	BUS2	PHASE
BUS1-R BUSH	BUS2-R BUSL	R
BUS1-S BUSH	BUS2-S BUSL	S
BUS1-T BUSH	BUS2-T BUSL	T

ส่วนของข้อมูลที่ต้องใช้สำหรับป้อนให้กับโปรแกรมโดยอาศัยข้อมูลของการทดสอบหม้อแปลงเป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการฉีกจากต้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$NW \times (NW - 1) / 2 = 1$$

I = 1 ทำการจ่ายไฟที่ด้านขดลวดแรงสูง

J = 2 ขดลวดที่ทำกรัดวงจร คือขดลวดแรงต่ำ

P12 (Positive Short – Circuit Impedance) = 148.10 (kW) เนื่องจากการทำการทดสอบแบบ
ลัดวงจรได้ทำในสภาวะปกติ

ZPOS12 (Positive Short – Circuit Impedance) = 18.265 (%) ได้มาจาก

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

SPOS = 50.0 (MVA)

ZZERO12 (Zero Short – Circuit Impedance) = 18.265 (%) ได้มาจาก

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

SZERO = 50.0 (MVA)

ID = 0 หมายความว่าค่ารีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์ (Zero-Sequence Reactance) จะถูกคำนวณโดย
อัตโนมัติ โดยการใช้ค่าความสูญเสียแบบมีภาระลำดับบวก (Positive Sequence Load Losses or
Short-Circuit Losses) ทั้งนี้เนื่องจากว่าเป็นหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด

IL = 1 หมายความว่าค่าความต้านทานของขดลวดจะถูกคำนวณโดยอัตโนมัติ ซึ่งสามารถคำนวณ
ได้จากใช้ค่าความสูญเสียแบบมีภาระลำดับบวก (Positive-Sequence Short-Circuit Losses) ทั้งนี้
เนื่องจากเป็นหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด

ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการป้อนให้กับโปรแกรม BCTRAN จะเป็นไปตามข้างล่างนี้

```
BEGIN NEW DATA CASE
ACCESS MODULE BCTRAN
$ERASE
C |   FREQ|   IEXPOS|   SPOS|   LEXPOS|   IEXZERO|   SZERO|   LEXZERONPITIWIPI
  2     50.   .0734   50.   22.180   35.39     50.   9810.97  0 2 2-1
C k|   VRAT|   R1| |bus1||bus2||bus1||bus2||bus1||bus2|
  1     66.39   |   BUS1_RBUSH  BUS1_SBUSH  BUS1_TBUSH
C k|   VRAT|   R2| |bus1||bus2||bus1||bus2||bus1||bus2|
  2     13.28   |   BUS2_RBUSL  BUS2_SBUSL  BUS2_TBUSL
C | |   PIJ|   ZPOSIJ|   SPOS|   ZZEROIJ|   SHOMIDIL
  1 2   148.10  12.557   50.   18.265     50. 0 1
BLANK CARD TERMINATE INPUT OF SHORT-CIRCUIT TEST DATA
$PUNCH
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่อย่างไรก็ตามเมตริกซ์ที่ได้จากโปรแกรม BCTRAN จะให้ผลของฟลักซ์แม่เหล็กในลักษณะที่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการที่ต้องการให้แบบจำลองหม้อแปลงมีการคำนึงถึงผลของความไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำได้โดยการต่อรีแอกเตอร์ที่เทอร์มินอล แต่ต้องแก้ไขค่าพารามิเตอร์ในส่วนของค่ากระแสกระตุ้นสำหรับโปรแกรม BCTRAN

จากผลการทดสอบ ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับบวก (LEXPOS) มีค่า 22.18 kW ที่แรงดัน 23 kV ดังนั้นในส่วน of ค่ากระแสกระตุ้นลำดับบวกที่คิดเฉพาะค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$I_{cu,dir} \approx \frac{P_{ex,dir}}{\sqrt{3} \times U_{ex,dir}} \approx \frac{22.18 \text{ kW}}{\sqrt{3} \times 23 \text{ kV}} \approx 0.556 \text{ A}$$

$$I_{EXPOS} = 0.556 \times \frac{\sqrt{3} \times 23 \text{ kV}}{50 \text{ MVA}} \times 100 = 0.0442 \%$$

และค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ (LEXZERO) มีค่า 9810.97 kW ที่แรงดัน 23 kV ดังนั้นในส่วน of ค่ากระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ที่คิดเฉพาะค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$I_{cu,har} \approx \frac{P_{ex,har}}{3 \times U_{ex,har}} \approx \frac{9810 \text{ kW}}{3 \times 23 / \sqrt{3} \text{ kV}} \approx 246.27 \text{ A}$$

$$I_{EXZERO} = 246.27 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{3} \times 23}{50} \times 100 = 19.621 \%$$

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องป้อนให้กับโปรแกรม BCTRAN ใหม่และเอาท์พุตเป็นดังนี้

```
BEGIN NEW DATA CASE
ACCESS MODULE BCTRAN
$ERASE
C |   FREQ|   IEXPOS|   SPOS|   LEXPOS|   IEXZERO|   SZERO|   LEXZERONPITIWIPI
  2 |   50. |   .0442 |   50. |  22.180 |  20.00 |   50. |  9810.97 0 2 2-1
C k|   VRAT|
  1 |  66.39 |
   |   |   |   |   |   |   |   |   |
C k|   VRAT|   R2| |bus1||bus2||bus1||bus2||bus1||bus2|
  2 |  13.28 |   |   |   |   |   |   |   |   |
   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
C | |   PIJ|   ZPOSIJ|   SPOS|   ZZEROIJ|   SHOMIDIL
  1 2 | 148.10 | 12.557 |   50. |  18.265 |   50. 0 1
BLANK CARD TERMINATE INPUT OF SHORT-CIRCUIT TEST DATA
$PUNCH
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เสกสรรค์ งามศรีตระกูล, อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล, อานันท์วัฒน์ คุณากร, “การวิเคราะห์กระแส
 ชิมพาเทติกอินรัระหว่างหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP.”, ได้รับการตีพิมพ์ลงใน
 วารสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29 (EECON29) , 9-10 พฤศจิกายน 2549 ,
 หน้า 53-56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




29th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๒๙

หนังสือรวมบทความคัดย่อของบทความที่น่าสนใจในการประชุม

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

๙-๑๐ พฤศจิกายน ๒๕๕๙
ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี







ดำเนินการโดย **STC** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์กระแสซิมพาเทติกอินรัชระหว่างหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP

Analysis of Sympathetic Inrush Current between Transformers using ATP/EMTP

เสกสรรค์ งามศรีตระกูล อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล อานันท์วัฒน์ คุณากร
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 0-2326-9902 E-mail : s8060220@kmit.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้อธิบายปรากฏการณ์กระแสซิมพาเทติกอินรัชระหว่างหม้อแปลงซึ่งเกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้จ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังในขณะที่มีหม้อแปลงอื่นจ่ายไฟฟ้าอยู่ก่อนหน้าปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถทำให้รีเลย์แบบผลต่างทำงานผิดพลาดได้ กรณีศึกษาได้ถูกจำลองขึ้นบนโปรแกรม ATP/EMTP โดยพิจารณาถึงลักษณะของกระแสที่เกิดขึ้นที่มุมการสับสวิตซ์ต่างๆ บนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า

คำสำคัญ : กระแสอินรัช, ซิมพาเทติก, หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

Abstract

This paper describes the sympathetic inrush current between transformers. Such an inrush current occurs when a transformer is energized to a system which other transformers in the system have been switched on. The sympathetic inrush current can have an effect on the misoperation of a differential relay. Case studies are performed and simulated using ATP/EMTP with consideration on the magnitude of the sympathetic inrush current at various switching angles on a voltage waveform.

Keywords: Inrush current, Sympathetic interaction, Power transformer

1. บทนำ

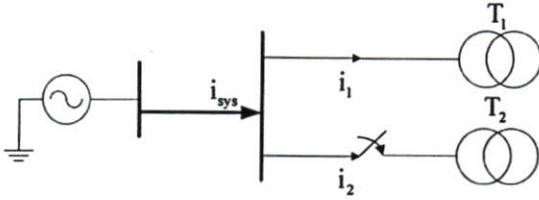
ในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นจึงมีการเชื่อมโยงโครงข่าย (Network) ของระบบไฟฟ้าเข้าด้วยกัน โดยที่สายส่งเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่ในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า (Power Plant) ไปยังผู้ใช้โดยผ่านส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น สถานีไฟฟ้า (Substation), เขตชุมชน เป็นต้น ในขณะที่เดียวกัน หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) เป็นหนึ่งในการเชื่อมโยงที่สำคัญที่สุดในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความสถานีไฟฟ้าต่างๆ มีการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นจำนวนมาก ในปัจจุบัน การป้องกันหม้อแปลง

ไฟฟ้ากำลังที่มีความเชื่อถือได้และมีความเร็วสูงวิธีหนึ่งก็คือ การใช้รีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง (Differential Protection Relay) จะใช้หลักการ Percentage Differential Current เป็นตัวตรวจจับความผิดปกติ (fault) ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และยังคงใช้หลักการตรวจจับฮาร์โมนิก (Harmonic Restraint Differential Relay) เพื่อป้องกันการสั่งปลดดวงวงจรเนื่องจากกระแสอินรัช แต่ยังคงมีความผิดพลาดเนื่องจากการแยกแยะความแตกต่างระหว่างฟอลต์ภายในกับกระแสอินรัช ซึ่งในงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาได้มีการวิจัยแยกแยะความแตกต่างระหว่างฟอลต์ภายในกับกระแสอินรัชในกรณีที่ไม่นับถึงผลกระทบระหว่างหม้อแปลง ซึ่งในทางปฏิบัติได้มีการค่อหม้อแปลงมากกว่าหนึ่งตัว ไม่ว่าจะหม้อแปลงจะต่อแบบขนานหรือไม่ก็อนุกรมกับหม้อแปลงถูกอื่นที่ได้จ่ายไฟอยู่ก่อนจะแสดงผลของกระแสซิมพาเทติกอินรัช (Sympathetic Inrush Current) ซึ่งเป็นหนึ่งในเหตุผลที่ทำให้รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างทำงานผิดพลาด [1,2] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับกระแสซิมพาเทติกอินรัช โดยจะพิจารณาจากระบบที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าสองตัวต่อขนานกัน และใช้โปรแกรม ATP/EMTP ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของกระแสซิมพาเทติกอินรัช ได้แก่ มุมการสับสวิตซ์ตามรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า

2. กระแสซิมพาเทติกอินรัช (Sympathetic Inrush Current)

ในกรณีที่หม้อแปลงต่อขนานกันโดยที่หม้อแปลงตัวแรกได้จ่ายไฟแล้ว และตัวที่ 2 อยู่ในช่วงเริ่มจ่ายไฟ ทำให้เกิดกระแสอินรัช ซึ่งกระแสอินรัชประเภทนี้เรียกว่า กระแสซิมพาเทติกอินรัช (Sympathetic Inrush Current) ซึ่งในสภาวะที่หม้อแปลงตัวที่ 2 เริ่มจ่ายไฟนั้น จะมีกระแสอินรัชไหลเข้าสู่หม้อแปลงดังกล่าว ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงที่ขนานกันอยู่ โดยองค์ประกอบของกระแสตรง (dc component) ที่อิมตัวอยู่ในแกนเหล็กของหม้อแปลงจะทำหน้าที่สร้างกระแสอินรัช ซึ่งขนาดของกระแส (Magnitude) และช่วงระยะเวลาลดลง (Decaying Time) ของกระแส จะขึ้นอยู่กับ ขนาด, ชนิดแกนเหล็ก และการออกแบบของหม้อแปลง (Transformer Size, Type of core and Design) ค่าอิมพิแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Source Impedance), ค่าสนามแม่เหล็กค้างในแกนเหล็ก ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าแอมพลิจูดของรูปคลื่นแรงดันขณะปลดดวงวงจร (Interrupting Angle), ค่ามุมของรูปคลื่นแรงดันขณะต่อวงจร (Energizing

Angle), ชนิดการต่อขดลวดของหม้อแปลง และที่ตั้งของระบบไฟฟ้า [1,2,3,4]



รูปที่ 1 ลักษณะการเกิดกระแสซิมพาทคอินรัชระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าสองตัวที่ต่อขนานกัน

3. การจำลองกระแสซิมพาทคอินรัช

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระแสซิมพาทคอินรัชที่เกิดขึ้น โปรแกรม ATP/EMTP ถูกนำมาใช้เพื่อการจำลองปรากฏการณ์ดังกล่าว โดยใช้ข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้า [5] ของบริษัทผู้ผลิตแห่งหนึ่ง ซึ่งมีขนาดพิกัดกำลัง 50MVA พิกัดแรงดัน 115/23 kV คอแบบสตาร์-สตาร์ (Y-Y) ซึ่งโปรแกรม ATP/EMTP ได้ทำการจำลองสัญญาณทั้งหมด 500 ไซเคิล

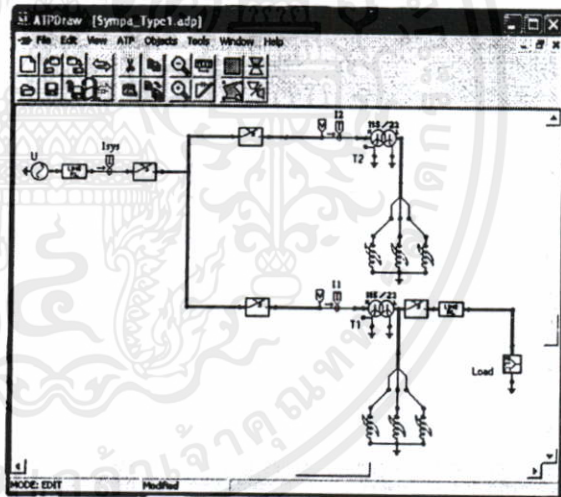
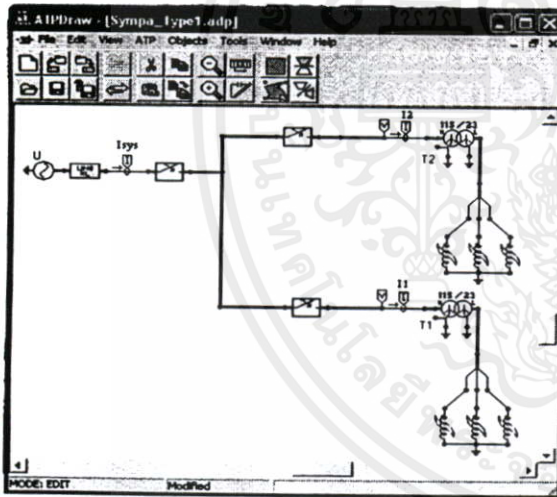
(0-10 วินาที) มีอัตราการสุ่ม (sampling rate) 20 kHz ในการศึกษา ได้รวมผลความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็กเข้าไปในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าบนโปรแกรม ATP/EMTP

3.1 หม้อแปลงทั้งสองตัวไม่มีภาระโหลด

จากรูปที่ 2 เริ่มจ่ายไฟให้หม้อแปลงตัวที่ 1 ที่เวลา 0.1 วินาที และจ่ายไฟให้หม้อแปลงตัวที่ 2 ที่เวลา 5 วินาที ซึ่งเป็นช่วงที่กระแสของหม้อแปลงตัวที่ 1 อยู่ในสภาวะกระแสคงที่ (Steady State) เปลี่ยนมุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มุม 0°, 45°, 90°, 135° และมุม 180° ของเฟส A ทางด้าน primary ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 5,6,7

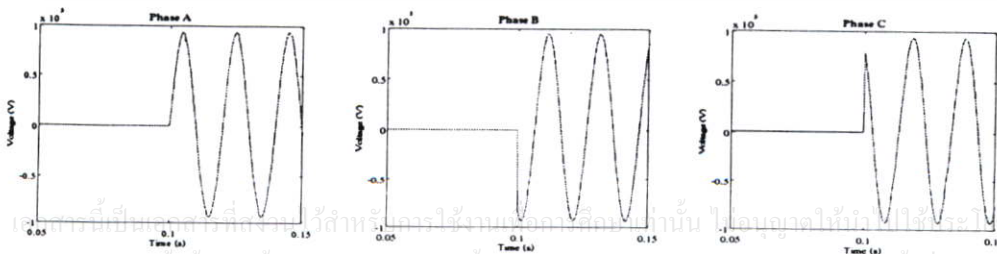
3.2 หม้อแปลง T₁ อัดภาระโหลด

จากรูปที่ 3 ทำการต่อโหลดขนาด 40 MVA, p.f. = 0.8 ให้กับหม้อแปลงตัวที่ 1 เริ่มจ่ายไฟที่เวลา 0.1 วินาที และจ่ายไฟให้หม้อแปลงตัวที่ 2 ที่เวลา 5 วินาที วินาที ซึ่งเป็นช่วงที่กระแสของหม้อแปลงตัวที่ 1 อยู่ในสภาวะกระแสคงที่ (Steady State) เปลี่ยนมุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มุม 0°, 45°, 90°, 135° และมุม 180° ของเฟส A ทางด้าน primary ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 8,9,10



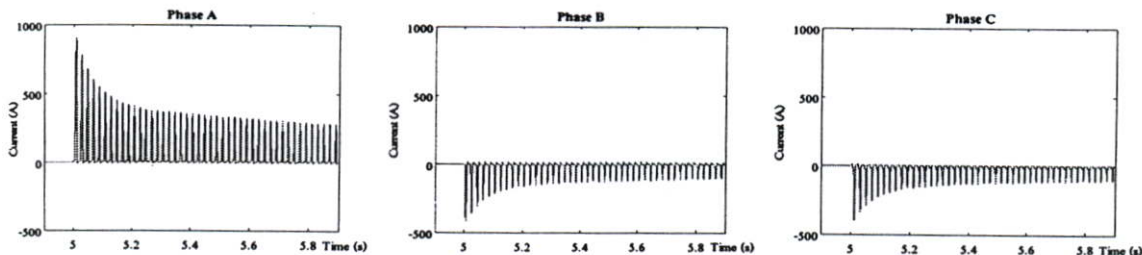
รูปที่ 2 การจำลองบน ATP/EMTP ขณะหม้อแปลงไฟฟ้า T₁ ไม่มีภาระโหลด

รูปที่ 3 การจำลองบน ATP/EMTP ขณะหม้อแปลงไฟฟ้า T₁ อัดภาระโหลด

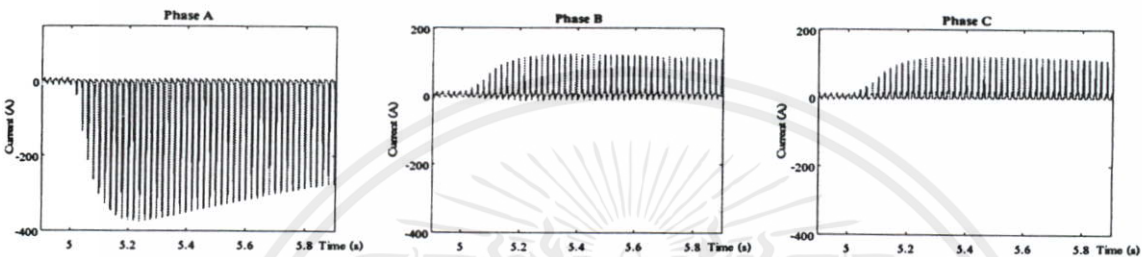


รูปที่ 4 แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า T₁ ขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เวลา 0.1 วินาที ของแอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

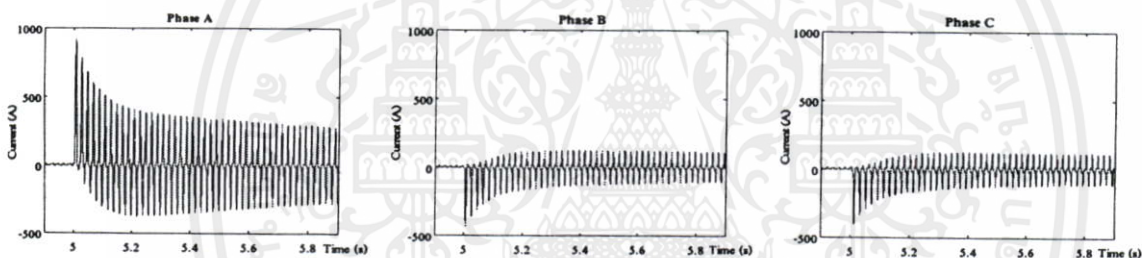
PW14



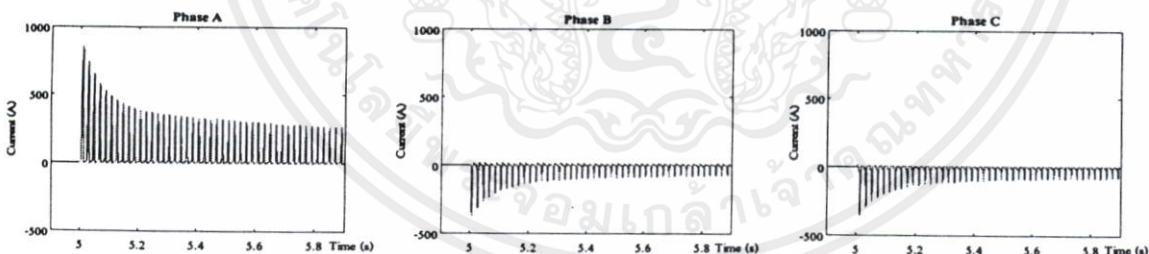
รูปที่ 5 กระแสในรั้งในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ที่มุม 0° ของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ (หม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ไม่มีภาวะไหลค)



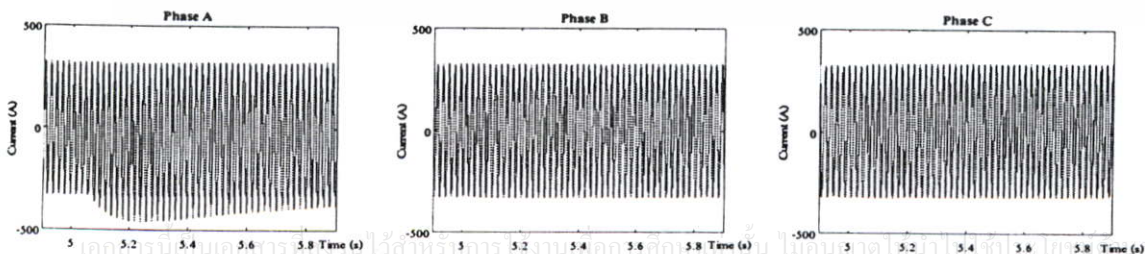
รูปที่ 6 กระแสที่ขดลวดปฐมภูมิในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ที่มุม 0° ของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ (หม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ไม่มีภาวะไหลค)



รูปที่ 7 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 ที่มุม 0° ของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ (หม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ไม่มีภาวะไหลค)

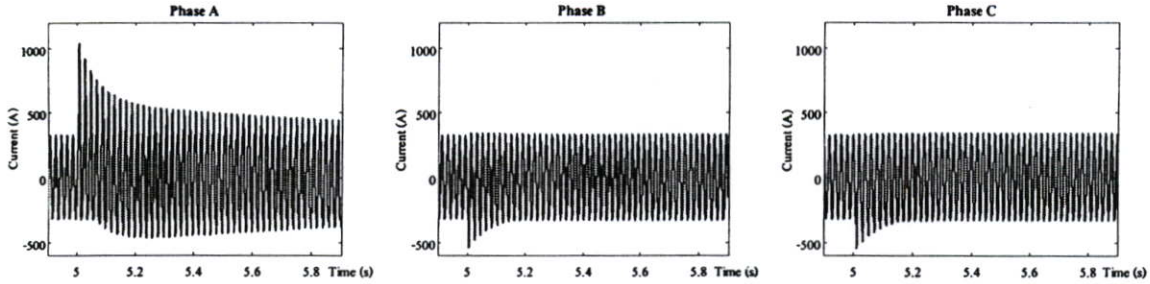


รูปที่ 8 กระแสในรั้งในหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 ที่มุม 0° ของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ (หม้อแปลงไฟฟ้า T_2 ง่ายภาวะไหลค)



รูปที่ 9 กระแสที่ขดลวดปฐมภูมิในหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ที่มุม 0° ของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ (หม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ง่ายภาวะไหลค)

PW14



รูปที่ 10 กระแสผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 ที่มุม 0° ของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ (หม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด)

ตารางที่ 1 ค่ากระแสสูงสุดจากการปรับเปลี่ยนมุมของแรงดันไฟฟ้าในเฟส A ทางด้าน primary ขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ (หม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ไม่มีภาระโหลด)

เวลา (วินาที)	T_1			T_2			T_3		
	เฟส A	เฟส B	เฟส C	เฟส A	เฟส B	เฟส C	เฟส A	เฟส B	เฟส C
0	912.08	-428.52	-401.98	-324.91	83.60	83.23	926.86	-438.09	-410.04
45	645.99	147.25	-874.34	-192.35	-18.95	303.24	653.99	156.58	-879.12
90	-26.62	7745.84	-805.07	17.62	-259.54	263.37	-31.54	781.56	-811.75
135	-614.35	894.51	-164.25	189.01	-305.47	18.62	-621.11	900.07	-175.23
180	-912.09	428.52	401.97	324.92	-83.60	-83.23	-916.86	438.09	410.04

ตารางที่ 2 ค่ากระแสสูงสุดจากการปรับเปลี่ยนมุมของแรงดันไฟฟ้าในเฟส A ทางด้าน primary ขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ (หม้อแปลงไฟฟ้า T_1 จ่ายภาระโหลด)

เวลา (วินาที)	T_1			T_2			T_3		
	เฟส A	เฟส B	เฟส C	เฟส A	เฟส B	เฟส C	เฟส A	เฟส B	เฟส C
0	858.44	-380.69	-358.20	-343.83	326.13	331.34	1034.03	-546.84	-551.52
45	593.49	108.49	-819.87	-326.74	-330.74	329.70	757.46	353.42	-1008.10
90	-25.50	724.20	-749.19	330.95	-330.38	326.73	-348.45	913.67	-909.97
135	-566.19	837.44	-121.89	330.44	-328.79	325.34	-757.37	1005.33	343.83
180	-858.44	380.69	-358.20	343.83	-326.13	-331.34	-1034.00	546.84	551.52

จากตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมของแรงดันขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ กระแสจะมีค่าเปลี่ยนแปลง โดยสัมพันธ์กับมุมที่สับ (เปรียบเทียบที่เฟส A) กล่าวคือกระแสจะมีค่าสูงสุดที่มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเป็น 0° และมีค่าลดลงตามมุมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าลดลงต่ำสุดที่มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเป็น 90° ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีกระแสรีซ [3]

4. บทสรุป

จากบทความที่นำเสนอขึ้นนี้มีหม้อแปลงไฟฟ้าคอกันกัน ซึ่งตัวแรกได้จ่ายไฟอยู่ก่อนจนถึงช่วงเวลาสภาวะกระแสสูงที่ และครั้งที่ 2 อยู่

ในช่วงเริ่มจ่ายไฟ ทำให้เกิดกระแสซิมพาทิคอินรัชขึ้น และมีกระแสอินรัชไหลเข้าสู่มหม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรก และทำให้ปริมาณกระแสที่ไหลในหม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรกเกิดการเปลี่ยนแปลง มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์มีผลต่อค่ากระแสสูงสุดของหม้อแปลงทั้ง 2 ตัว กล่าวคือกระแสรีซจะมีค่าสูงสุดที่มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเป็น 0° และมีค่าลดลงตามมุมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าลดลงต่ำสุดที่มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเป็น 90° ผลการจำลองนี้เป็นการแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของปรากฏการณ์ซิมพาทิคอินรัชระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้า จึงควรนำมาพิจารณาเพื่อทำการตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.Sengul, B.Alboyaci, S.Ozturk and H.B. Cetinkaya, "Case study of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients", International Conference on Power Systems Transients, Canada, June 19-23, 2005
- [2] H.BronZeado and R.Yacamini, "Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients", Proceedings IEE - Science, Measurement and Technology, Vol. 142, No. 4, July 1995, pp.323-329.
- [3] S.V. Kulsmi and S.A. Khaparde, "Transformer Engineering Design and Practice", Marcel Dekker, Inc., 2004
- [4] Ara Kulidjian and Bogdan Kasztenny, "An Improved Transformer Inrush Restraint Algorithm", 53rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, April 11-13, 2000
- [5] ABB Thailand, Test report no.56039.

ประวัติผู้เขียน

นาย เสกสรรค์ งามศรีตระกูล เกิดเมื่อวันที่ 23 ธันวาคม 2526 ที่จังหวัดยะลา สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2547

เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปี 2548 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ณ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานวิชาการตีพิมพ์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าระหว่าง
ศึกษาปริญญาโท 1 บทความคือ วารสารประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 จำนวน 1 เรื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้