

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับกระแสอินรัช  
ของหม้อแปลงไฟฟ้า

Computer Simulation for Transformer Magnetizing Inrush Current



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2546

เอกสารฉบับนี้...  
เลขที่ทะเบียน... 55608...  
วันที่... 20 พ.ค. 2548...  
โปรดใช้เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไป...  
ไม่ว่าโดยวิธีใดๆ ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับกระแสอินรัช  
ของหม้อแปลงไฟฟ้า

Computer Simulation for Transformer Magnetizing Inrush Current



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับกระแสอินรัชของหม้อแปลงไฟฟ้า

Computer Simulation for Transformer Magnetizing Inrush Current

ผู้จัดทำ

- |                |            |              |          |
|----------------|------------|--------------|----------|
| 1. นายโฆสิต    | เอ่งฉ้วน   | รหัสประจำตัว | 43010046 |
| 2. นายนนทวัฒน์ | เหรียญโมรา | รหัสประจำตัว | 43010197 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร)

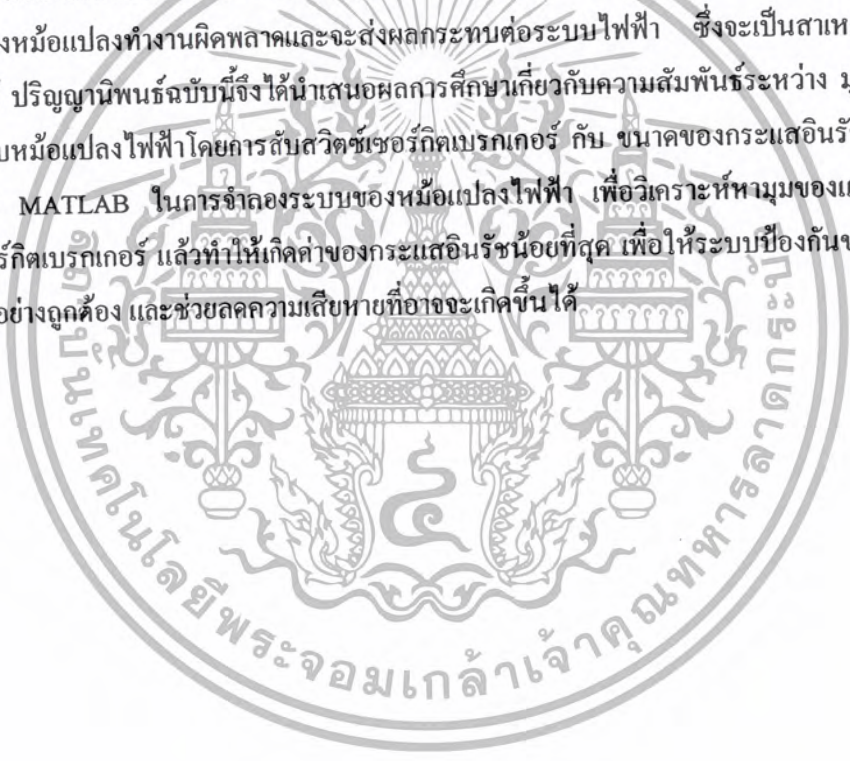
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับกระแสอินรัช  
ของหม้อแปลงไฟฟ้า

นายโฆสิต      เอ่งฉ้วน              43010046  
นายนนทวัฒน์    เหรียญโมรา           43010197  
ผศ.ดร.อานันท์    คุณากร    อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

ในการเริ่มทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในแต่ละครั้งจะเกิด Transient Current หรือที่รู้จักกันในชื่อของ Magnetizing Inrush Current ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับกระแสฟอลต์ ดังนั้นถ้าระบบป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่สามารถแยกแยะระหว่างกระแสอินรัชกับกระแสฟอลต์ได้ ก็จะมีผลทำให้ระบบป้องกันของหม้อแปลงทำงานผิดพลาดและจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายได้  ปริญญาณพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอผลการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่าง มุมของแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการสับสวิทช์เซอร์กิตเบรกเกอร์ กับ ขนาดของกระแสอินรัช โดยที่จะใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองระบบของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์หามุมของแรงดันที่ใช้สับสวิทช์เซอร์กิตเบรกเกอร์ แล้วทำให้เกิดค่าของกระแสอินรัชน้อยที่สุด เพื่อให้ระบบป้องกันของหม้อแปลงทำงานได้อย่างถูกต้อง และช่วยลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้

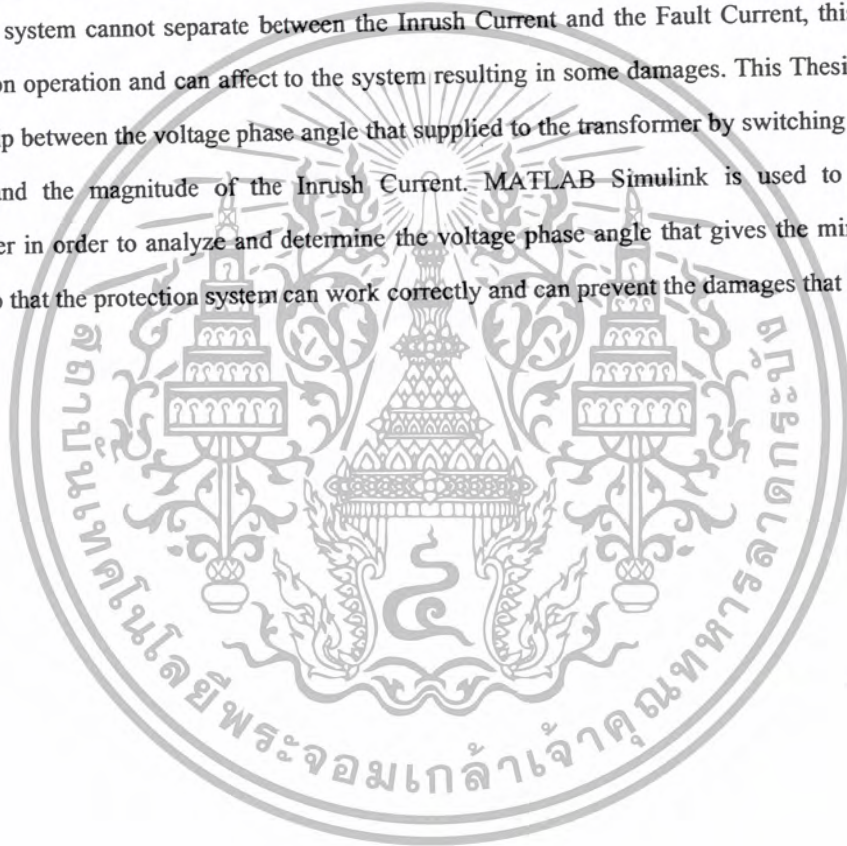


## Computer Simulation for Transformer Magnetizing Inrush Current

Kosit Eangchuan	43010046
Nonthavat Rhienmora	43010197
Assist. Prof. Anantawat Kunakorn	Advisor

## ABSTRACT

When a transformer is energized, there is a Transient Current, known as Magnetizing Inrush Current, generated in a system. The magnitude of such a current is similar to that of Fault Current. If a protection system cannot separate between the Inrush Current and the Fault Current, this can cause a malfunction operation and can affect to the system resulting in some damages. This Thesis presents the relationship between the voltage phase angle that supplied to the transformer by switching of the Circuit Breaker and the magnitude of the Inrush Current. MATLAB Simulink is used to simulate the transformer in order to analyze and determine the voltage phase angle that gives the minimum Inrush Current so that the protection system can work correctly and can prevent the damages that may occur.



### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลุล่วงได้คือ อาจารย์อานันทวัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือเอาใจใส่ และให้คำแนะนำที่ดีอยู่เสมอมา ซึ่งผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ผู้จัดทำมีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้จัดทำมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และเป็นผู้ให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมาในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าผู้จัดทำจึงขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาท และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



นายโฆสิต

นายอานันทวัฒน์

เอ่งฉ้วน

เหรียญโมรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 การแนะนำ	4
2.2 การอธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพ	4
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของกระแสอินรัช	8
2.3.1 มุมของแรงดันขณะสับสวิตช์เปิดวงจร	8
2.3.2 ขนาดและเครื่องหมายของเส้นแรงแม่เหล็กตกต่างในแกนเหล็ก	8
2.3.3 ลักษณะ hysteresis ของแกนเหล็ก	9
2.3.3.1 เมื่อไม่พิจารณา hysteresis loop	9
2.3.3.2 เมื่อพิจารณา hysteresis loop	9
2.3.4 สภาวะของระบบ	10
2.3.4.1 ค่าความต้านทานทั้งหมด (impedance) ของแหล่งจ่ายไฟ	10
2.3.4.2 แรงดันของระบบ	11
2.3.4.3 โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า	11
2.4 ผลกระทบของกระแสอินรัช	12
2.4.1 ผลต่อหม้อแปลงไฟฟ้า	12
2.4.2 ผลต่อรีเลย์ป้องกันหม้อแปลง	12
2.4.2.1 วิธีป้องกันไม่ให้รีเลย์ทำงานโดยไม่จำเป็น	12
2.4.3 ผลต่อฟิวส์ป้องกันหม้อแปลง	13
2.4.4 ผลต่อสภาวะของระบบ	13
2.4.5 ผลต่อสวิตช์เกียร์	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
2.5 วิธีการลดขนาดของกระแสอินรัช	13
2.5.1 รีซิสแตนซ์สวิตชิง (Resistance Switching)	13
2.5.2 การลดความเป็นแม่เหล็กตกค้าง	13
2.5.3 การสับสวิตซ์คานแรงสูง	14
2.5.4 การเพิ่มขดลวดแม่เหล็ก	14
บทที่ 3 ที่มาและวิธีสร้างโมเดลของหม้อแปลงเพื่อทดลองหาค่าของกระแสอินรัช	16
3.1 หม้อแปลงไฟฟ้า	13
3.2 รูปแบบขดหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 2 ขดลวด	16
3.2.1 สมการของฟลักซ์เกี่ยวคล้อง	16
3.2.2 สมการของแรงดัน	17
3.2.3 การแทนค่าในวงจรสมมูลย์	18
3.3 การจำลองการทำงานของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด	19
3.4 สภาวะเงื่อนไขที่ขาออก	21
3.5 การรวมค่าการอิ่มตัวของแกนเหล็กกับการจำลองหม้อแปลง	22
3.6 การจำลองระบบของโมเดลของหม้อแปลงโดยใช้ MATLAB	27
3.7 การวิเคราะห์กราฟของกระแสอินรัช	28
3.8 ระบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นโดยใช้ Tools box ในโปรแกรม MATLAB	28
3.8.1 การใช้และป้อนค่าให้กับระบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ในโปรแกรม MATLAB	29
3.8.1.1 หม้อแปลง (Transformer)	29
3.8.1.2 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Voltage Source)	33
3.8.1.3 กราวนด์ (Ground)	34
3.8.1.4 เบรกเกอร์ (Breaker)	34
3.8.1.5 มัลติมิเตอร์ (Multimeter)	36
3.8.1.6 สโคป (Scope)	36
3.9 แบบจำลองของหม้อแปลงที่สร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB	36
บทที่ 4 ผลการทดลอง	39
4.1 มุมของแรงดัน(องศา) ที่ใช้ในการทดสอบ	39
4.2 มุมของแรงดันที่ป้อนให้กับแหล่งจ่ายแรงดันของทั้ง 2 ระบบ	39
4.2.1 มุมของแรงดัน (เรเดียน) ที่ป้อนให้กับระบบจำลองที่ได้มาจากหนังสือ	39
4.2.2 มุมของแรงดัน(องศา)ที่ควบคุมโดยเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อป้อนให้กับระบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB	39

## สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

4.2.2.1 วิธีคำนวณหาค่าเวลาที่สั่งให้เซิร์ฟเวอร์ทำงาน	39
4.3 กราฟแสดงผลของค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นจากการจำลองระบบ	41
1. ที่มุม 0 องศา	41
2. ที่มุม 30 องศา	42
3. ที่มุม 45 องศา	43
4. ที่มุม 60 องศา	44
5. ที่มุม 90 องศา	45
6. ที่มุม 120 องศา	46
7. ที่มุม 150 องศา	47
8. ที่มุม 180 องศา	48
9. ที่มุม 225 องศา	49
10. ที่มุม 270 องศา	50
11. ที่มุม 315 องศา	51
12. ที่มุม 360 องศา	52
4.4 ขนาดของกระแสทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการป้อนมุมของแรงดันที่กำหนด	53
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	55
5.1 สรุปผลการทดลอง	55
5.2 แนวทางการพัฒนา	56
บรรณานุกรม	

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้าที่
2.1	รูปคลื่นแรงดันและเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อสับสวิตช์เปิดวงจร ที่มุมแรงดันสูงสุด	5
2.2	รูปคลื่นแรงดันและเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อสับสวิตช์เปิดวงจร ที่มุมแรงดันศูนย์	5
2.3	วิธีการสร้างรูปคลื่นกระแสกระตุ้นแม่เหล็ก จาก hysteresis loop	6
2.4	รูปคลื่นแรงดันและเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อสับสวิตช์ on ที่มุมแรงดันศูนย์และมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง $\phi$	6
2.5	รูปคลื่นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสอินรัช	7
2.6	แสดง hysteresis loop ของเส้นแรงแม่เหล็กกับ กระแสกระตุ้นแม่เหล็ก	7
2.7	ปรากฏการณ์กระแสอินรัช	8
2.8	ผลจากการที่เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างมีเครื่องหมายเดียวกันกับ sinusoidal flux	9
2.9	แสดงกระแสกระตุ้นเมื่อไม่มี hysteresis loop	9
2.10	แสดงกระแสกระตุ้นเมื่อไม่มี hysteresis loop	10
2.11	การลดลงของกระแสอินรัชสูงสุดเมื่อรีแอกแตนซ์ (reactance) ของระบบเพิ่มขึ้น	11
2.12	ผลจากแรงดันของระบบที่มีค่ายอดสูงสุดของกระแสอินรัช	11
2.13	วงจร rectifier relay	12
2.14	แสดงวงจร resistance switching	13
2.15	วงจรที่เพิ่มขดลวดแม่เหล็ก	14
3.1	เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องในหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด	16
3.2	วงจรสมมูลของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด	18
3.3	การทำงานของตัวแปรในการจำลองระบบของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด (กรณีเป็นเชิงเส้น )	20
3.4	แสดงการจำลองระบบของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด (กรณีเป็นเชิงเส้น )	21
3.5	แสดงลักษณะของการอิ่มตัว	22
3.6	แสดงการทำงานของตัวแปรในการจำลองระบบของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด (กรณีที่มีการอิ่มตัวของฟลักซ์ที่เกี่ยวข้อง )	24
3.7	แสดงการจำลองระบบของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด (กรณีที่มีการอิ่มตัวของฟลักซ์ที่เกี่ยวข้อง )	25
3.8	แสดงตัวอย่างของผลที่ได้จากการจำลองระบบ	28
3.9	แสดงโมเดลของหม้อแปลงในโปรแกรม MATLAB	29
3.10	แสดงการป้อนค่าให้กับโมเดลของหม้อแปลง	29
3.11	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ฟลักซ์ที่เกี่ยวข้อง กับ กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้าที่
3.12	แสดงโมเดลของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับในโปรแกรม MATLAB	33
3.13	แสดงการป้อนค่าให้กับโมเดลของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ	33
3.14	แสดงระบบจำลองของกราวด์ในโปรแกรม MATLAB	34
3.15	แสดงระบบจำลองของเบรกเกอร์ในโปรแกรม MATLAB	34
3.16	แสดงการป้อนค่าให้กับระบบจำลองของ เบรกเกอร์	35
3.17	แสดงระบบจำลองของมัลติมิเตอร์ในโปรแกรม MATLAB	36
3.18	แสดงระบบจำลองของสโคปในโปรแกรม MATLAB	36
3.19	แสดงแบบจำลองระบบของหม้อแปลงที่สร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB	37
3.20	แสดงการป้อนค่าของ Simulation Parameters	37
4.1	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองจากหนังสือที่เกิดขึ้นที่มุม 0 องศา	41
4.2	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองที่สร้างขึ้นที่เกิดขึ้นที่มุม 0 องศา	41
4.3	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองจากหนังสือที่เกิดขึ้นที่มุม 30 องศา	42
4.4	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองที่สร้างขึ้นที่เกิดขึ้นที่มุม 30 องศา	42
4.5	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองจากหนังสือที่เกิดขึ้นที่มุม 45 องศา	43
4.6	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองที่สร้างขึ้นที่เกิดขึ้นที่มุม 45 องศา	43
4.7	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองจากหนังสือที่เกิดขึ้นที่มุม 60 องศา	44
4.8	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองที่สร้างขึ้นที่เกิดขึ้นที่มุม 60 องศา	44
4.9	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองจากหนังสือที่เกิดขึ้นที่มุม 90 องศา	45
4.10	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองที่สร้างขึ้นที่เกิดขึ้นที่มุม 90 องศา	46
4.11	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองจากหนังสือที่เกิดขึ้นที่มุม 120 องศา	47
4.12	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองที่สร้างขึ้นที่เกิดขึ้นที่มุม 120 องศา	47
4.13	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองจากหนังสือที่เกิดขึ้นที่มุม 150 องศา	48
4.14	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองที่สร้างขึ้นที่เกิดขึ้นที่มุม 150 องศา	48
4.15	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองจากหนังสือที่เกิดขึ้นที่มุม 180 องศา	49
4.16	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองที่สร้างขึ้นที่เกิดขึ้นที่มุม 180 องศา	49
4.17	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองจากหนังสือที่เกิดขึ้นที่มุม 225 องศา	50
4.18	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองที่สร้างขึ้นที่เกิดขึ้นที่มุม 225 องศา	50
4.19	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองจากหนังสือที่เกิดขึ้นที่มุม 270 องศา	51
4.20	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองที่สร้างขึ้นที่เกิดขึ้นที่มุม 270 องศา	51
4.21	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองจากหนังสือที่เกิดขึ้นที่มุม 315 องศา	52
4.22	แสดงค่ากระแสแอมแปร์ของระบบจำลองที่สร้างขึ้นที่เกิดขึ้นที่มุม 315 องศา	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้าที่
4.23	แสดงค่ากระแสอินรีชของระบบจำลองจากหนังสือที่เกิดขึ้นที่มุม 360 องศา	53
4.24	แสดงค่ากระแสอินรีชของระบบจำลองที่สร้างขึ้นที่เกิดขึ้นที่มุม 360 องศา	53
4.25	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกระแสอินรีชกับมุมของแรงดัน	53



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้าที่
3.1	แสดงค่าของ $I$ กับ $\lambda$ จากกราฟ	32
3.2	แสดงค่าของ $I_{p.u.}$ กับ $\lambda_{p.u.}$ จากการคำนวณ	32
4.1	ค่าพารามิเตอร์ที่จะป้อนให้กับระบบจำลองของหม้อแปลงทั้ง 2 แบบ	40
4.2	แสดงขนาดของกระแสอินรัชที่ค่ามุมของแรงดันมุมต่างๆ	53



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

เนื่องจากการรักษาความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันมีความสำคัญมาก เพราะถ้าไฟฟ้าขัดข้องนั้นหมายถึงความสูญเสียอย่างมหาศาลทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ ทั้งโรงงานอุตสาหกรรม ร้านค้า และบ้านพักอาศัยต่างจำเป็นต้องใช้ไฟฟ้า เช่น กระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม การทำงานของเครื่องจักรกล เครื่องจำหน่ายสินค้าอัตโนมัติ เครื่องอำนวยความสะดวกที่เป็นเครื่องใช้ไฟฟ้า และระบบแสงสว่าง

อาจรวมถึงความผิดพลาดด้านการรักษาความปลอดภัย ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินด้วย เช่น เมื่อเกิดไฟไหม้แล้วอุปกรณ์เตือนภัยซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ทำงาน หรือในกรณีที่มีการโจรกรรมแต่อุปกรณ์ตรวจจับไม่ทำงานเนื่องจากไฟฟ้าขัดข้อง ดังนั้นการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังให้มีความมั่นคงจึงมีความสำคัญมาก

อย่างไรก็ตาม จำนวนเงินที่จะใช้ในการป้องกันระบบไฟฟ้าต้องมีความเหมาะสมโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความซับซ้อนของระบบไฟฟ้า วิธีการป้องกัน ชนิดอุปกรณ์ป้องกันและสถานที่ตั้ง ดังนั้นจึงควรศึกษาระบบไฟฟ้าที่จะทำการป้องกันอย่างละเอียด เพื่อที่จะได้เลือกวิธีการป้องกันและอุปกรณ์ป้องกันได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม และประหยัดที่สุด

แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่อยู่ห่างไกลโหล่มาก มีความเป็นไปได้หลายทางที่จะเกิดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าซึ่งอาจเกิดจากฉนวนเสื่อม การลัดวงจร ความบกพร่องของอุปกรณ์ หรืออุบัติเหตุ ในที่นี้จะกล่าวถึงสาเหตุความไม่มั่นคงของระบบไฟฟ้าซึ่งเกิดจากมุมแรงดันขณะสับสวิตช์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (circuit breaker)

ในขณะที่เริ่มจ่ายไฟให้แก่หม้อแปลงไฟฟ้า จะมีกระแสทรานเซียนต์ (Transient Current) หรือที่รู้จักในชื่อ กระแสกระตุ้นแม่เหล็ก (magnetizing inrush current) เกิดขึ้นในขดลวดปฐมภูมิเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพทางแม่เหล็กของแกนเหล็ก และยังคงไหลต่อไปจนกว่าสภาพเส้นแรงแม่เหล็กจะกลับมามีอยู่ในสภาวะคงที่ (steady state)

โดยขนาดของกระแสขึ้นอยู่กับการสับสวิตช์ช่วงขณะนั้น เช่น มุมแรงดันขณะสับสวิตช์ สมบัติการอิ่มตัวของแกนเหล็ก และเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง ขนาดของกระแสอาจมากจนทำให้เกิดความผิดพลาดภายในระบบหรือทำให้ฟิวส์และรีเลย์ที่ป้องกันหม้อแปลงทำงานโดยไม่จำเป็น ระบบจะขาดความมั่นคงได้

การศึกษาอ้างอิงจากพฤติกรรมของกระแสอินรัช ทุกครั้งที่ปลดหม้อแปลงออกจากระบบไฟฟ้า จะมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างอยู่ส่วนหนึ่ง ต่อมาเมื่อจ่ายไฟให้หม้อแปลงอีกครั้ง ถ้าเราสามารถจ่ายไฟในมุมแรงดันที่ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างมีความต่อเนื่องได้ก็จะทำให้ไม่มีกระแสอินรัชเกิดขึ้น ดังนั้น

จึงทำการศึกษาหาค่ามุมของแรงดันที่จะนำไปใช้ในการสับสวิทช์เซอร์กิตเบรกเกอร์ เพื่อที่จะทำให้ค่าของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างมีความต่อเนื่องหรือใกล้เคียงที่สุดกับตอนที่ปลดหม้อแปลงออกจากระบบ ทั้งนี้ผลที่ได้จากการศึกษาอาจนำไปวิจัยเพิ่มเติมเพื่อหาวิธีการเลือกมุมแรงดันในการสับสวิทช์เซอร์กิตเบรกเกอร์ ได้จริงหรือสร้างวงจรเลือกมุมแรงดันในการสับสวิทช์

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาลักษณะกระแสอินรัช สาเหตุที่ทำให้เกิดกระแสอินรัชและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อขนาดของกระแสอินรัช
- 1.2.2 ศึกษาระบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery สมการที่นำมาใช้และลักษณะการแทนค่าข้อมูลต่างๆ ในโปรแกรม MATLAB
- 1.2.3 จำลองระบบของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ฟังก์ชัน simulink ในโปรแกรม MATLAB และป้อนค่าข้อมูลต่างๆ ให้สอดคล้องกับระบบจำลองของ Chee-Mun Ong จากหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery แล้วสังเกตผลที่ได้
- 1.2.4 เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสอินรัชกับการสับสวิทช์เซอร์กิตเบรกเกอร์ มุมแรงดันต่างๆ เพื่อหามุมของแรงดันที่เหมาะสมจะใช้ในการสับสวิทช์เซอร์กิตเบรกเกอร์แล้วทำให้ค่าของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุด

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ทำการศึกษาถึงลักษณะและขนาดของกระแสอินรัช และสาเหตุต่างๆ ที่เป็นปัจจัยที่ทำให้กระแสอินรัชเกิดขึ้น โดยมุ่งเน้นสาเหตุที่ทำให้ขนาดกระแสอินรัชสูงสุดเนื่องจากการสับสวิทช์เซอร์กิตเบรกเกอร์ ที่มุมแรงดันต่างๆ
- 1.3.2 การศึกษาถึงวิธีการใช้บล็อกอุปกรณ์ไฟฟ้า วิธีการต่อวงจร การป้อนค่าข้อมูล การตั้งให้โปรแกรมทำงาน และการแสดงผลใน simulink ที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB เพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ในการจำลองระบบของหม้อแปลงไฟฟ้า
- 1.3.3 นำระบบจำลองหม้อแปลงที่มีอยู่ในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery ของ Chee – Mun Ong มาใช้ประกอบ ในการวิเคราะห์หาขนาดกระแสอินรัช โดยหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้มีพิกัดดังนี้

1.5 kVA, 120/240 V, 60-Hz, pole-type, two-winding distribution transformer

$$r_1 = 0.25 \text{ โอห์ม} \quad r_2 = 0.134 \text{ โอห์ม}$$

$$x_{11} = 0.056 \text{ โอห์ม} \quad x_{12} = 0.056 \text{ โอห์ม}$$

$$x_{m1} = 708.8 \text{ โอห์ม}$$

- 1.3.4 สร้างระบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นมาอีกวงจรหนึ่งใน simulink และป้อนค่าข้อมูล ต่างๆ ให้ตรงตามพิกัดของหม้อแปลงที่ใช้ในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery เพื่อเปรียบเทียบลักษณะและขนาดกระแสอินรัชที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.5 วิเคราะห์หาค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมจะนำไปใช้ในการสับสวิตช์ เซอร์คิตเบรกเกอร์ ที่ทำให้เกิดค่าของกระแสอินรัชน้อยที่สุด

#### 1.4 วิธีดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ กระแสอินรัช โปรแกรม MATLAB ระบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าของ Chee-Mun Ong จากหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery และการจำลองระบบของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ simulink ใน โปรแกรม MATLAB
- 1.4.2 จำลองระบบของหม้อแปลงไฟฟ้าลงโดยใช้ simulink ใน MATLAB โดยใช้ค่าข้อมูลจากระบบจำลองในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery
- 1.4.3 ทดสอบระบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยเปลี่ยนแปลงมุมแรงดันขณะสับสวิตช์ แล้วสังเกตลักษณะและขนาดกระแสอินรัช
- 1.4.4 เปรียบเทียบลักษณะและขนาดกระแสอินรัชที่ได้จากระบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นกับระบบจำลองในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery
- 1.4.5 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของมุมแรงดันขณะสับสวิตช์กับขนาดกระแสอินรัช



## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 การแนะนำ

ในขณะที่เริ่มจ่ายไฟให้แก่หม้อแปลงไฟฟ้า จะมีกระแสทรานเซียนต์(transient current)หรือที่รู้จักในชื่อ กระแสกระตุ้นแม่เหล็ก(magnetizing inrush current) เกิดขึ้นในขดลวดปฐมภูมิเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพทางแม่เหล็กของแกนเหล็ก(core) และยังคงไหลต่อไปจนกว่าสภาพเส้นแรงแม่เหล็กจะกลับมามีอยู่ในสภาวะคงที่(steady state) โดยขนาดของกระแสที่ขึ้นอยู่กับสภาพของการสับสวิทช์ช่วงขณะเวลานั้น ขนาดของกระแสอาจจะมีมากจนทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นภายในระบบหรือทำให้ฟิวส์และรีเลย์ที่ป้องกันหม้อแปลงทำงานโดยไม่จำเป็นซึ่งจะมีผลทำให้ระบบขาดความมั่นคง

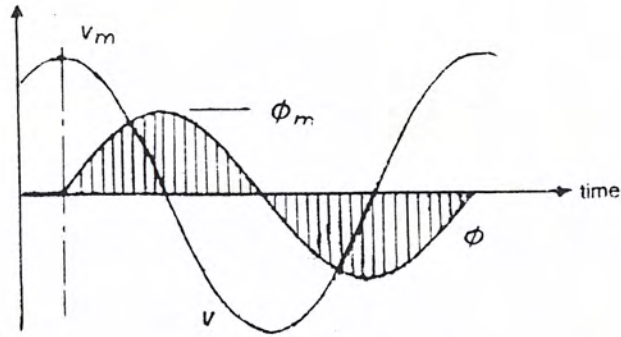
การศึกษาปรากฏการณ์ของ magnetizing inrush current นั้นไม่ได้คำนึงถึงอันตรายจากขนาดของกระแสที่สูงมาก แต่จะคำนึงถึงการรักษาความมั่นคงของระบบโดยหลีกเลี่ยงผลกระทบซึ่งอาจเกิดจากการสับสวิทช์หม้อแปลง

กระแสในรีซันซ์นั้นนอกจากจะเกิดขึ้นขณะเริ่มจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงแล้วยังสามารถเกิดขึ้นได้ในอีก 2 กรณีคือ กรณีแรก เมื่อเกิดข้อผิดพลาด (short circuit fault) ในระบบก็จะทำให้แรงดันในระบบลดลงอย่างมาก และเมื่อฟอลต์ (fault) ถูกกำจัดจะมีผลทำให้แรงดันจะเพิ่มขึ้นเป็นค่าปกติอีกครั้ง ในระหว่างที่แรงดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วรีซันซ์ก็จะเกิดขึ้นในหม้อแปลงที่ต่ออยู่กับระบบ ส่วนอีกกรณีคือ เมื่อมีหม้อแปลง 2 ตัวหรือมากกว่านั้นต่อขนานกัน การสับสวิทช์หม้อแปลงตัวใดตัวหนึ่งจะทำให้เกิดกระแสรีซันซ์ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงตัวที่เหลือด้วย

#### 2.2 การอธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพ

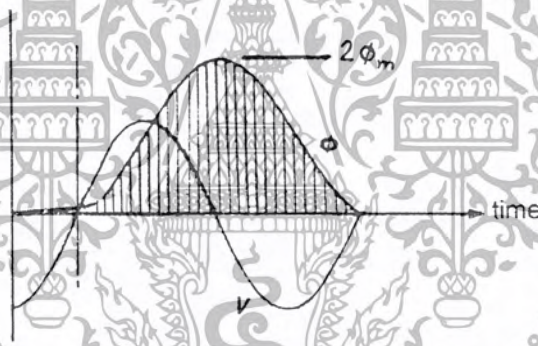
เมื่อสับสวิทช์ให้วงจรทำงาน(on)ทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่มีโหลดต่ออยู่ด้วยแรงดันไฟฟ้าปกติ หม้อแปลงจะเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำ(nonlinear inductor) ตัวหนึ่ง เมื่อไม่พิจารณาความต้านทาน (R) ภายในหม้อแปลง แรงดันที่จ่ายจะต้องสมดุลกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า (e.m.f.) ที่ถูกเหนี่ยวนำโดย กระแสกระตุ้นแม่เหล็ก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาด ขั้ว และ อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จ่ายขณะสับสวิทช์

สมมติว่า ตอนเริ่มต้นให้แกนเหล็กถูกกำจัดเส้นแรงแม่เหล็กที่ตกค้างอยู่ (unmagnetized) ออกไปจนหมดและสับสวิทช์ on ที่แรงดันสูงสุด(voltage peak) เพื่อให้เกิด e.m.f. ที่สมดุลจึงต้องการอัตราการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปในทิศทางเดียวกับแรงดันจนมีค่าสูงสุดเป็น  $\phi_m$  ดังแสดงในรูปที่ 2.1



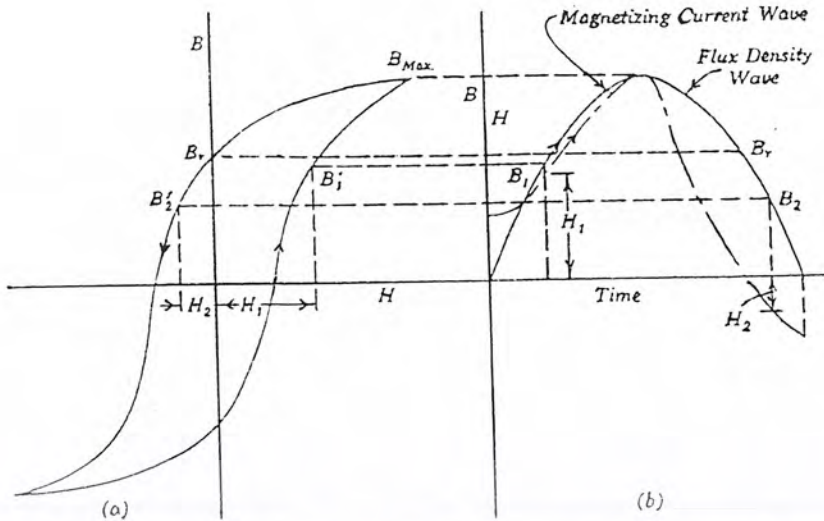
รูปที่ 2.1 แสดงรูปคลื่นแรงดันและเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า  
เมื่อสับสวิตช์ on ที่แรงดันสูงสุด

ถ้าสับสวิตช์ on ที่มุมแรงดันศูนย์ (voltage zero) ดังรูปที่ 2.2 แรงดันจะเป็นบวกในช่วงครึ่งคาบเวลาแรก ดังนั้นปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นตลอดเวลาถึงค่าสูงสุดเป็นสองเท่าของค่าขดปกติ ( $2\phi_m$ ) ปรากฏการณ์นี้จะถูกเรียกว่า “ดับบลิงเอฟเฟกต์ (Doubling Effect)” และในอีกครึ่งคาบเวลาต่อมา ผลจากการสูญเสีย (loss) จะลดขนาดรูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็กอย่างรวดเร็วและสมมาตรตามแนวแกนเวลา



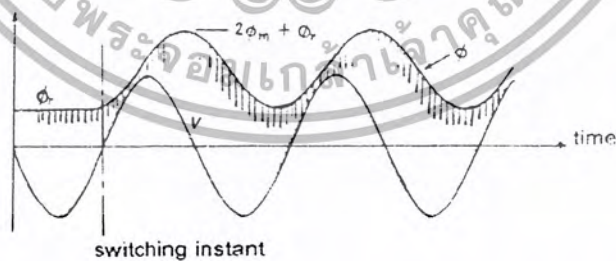
รูปที่ 2.2 แสดงรูปคลื่นแรงดันและเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า  
เมื่อสับสวิตช์ on ที่แรงดันศูนย์

ในกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทำงานอยู่แล้วสับสวิตช์ตัดวงจร (off) ของหม้อแปลง จะมีผลทำให้ค่าของ magnetizing current ซึ่งมีลักษณะตามฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop) มีค่าเป็นศูนย์และจะมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (B) ดังรูปที่ 2.3



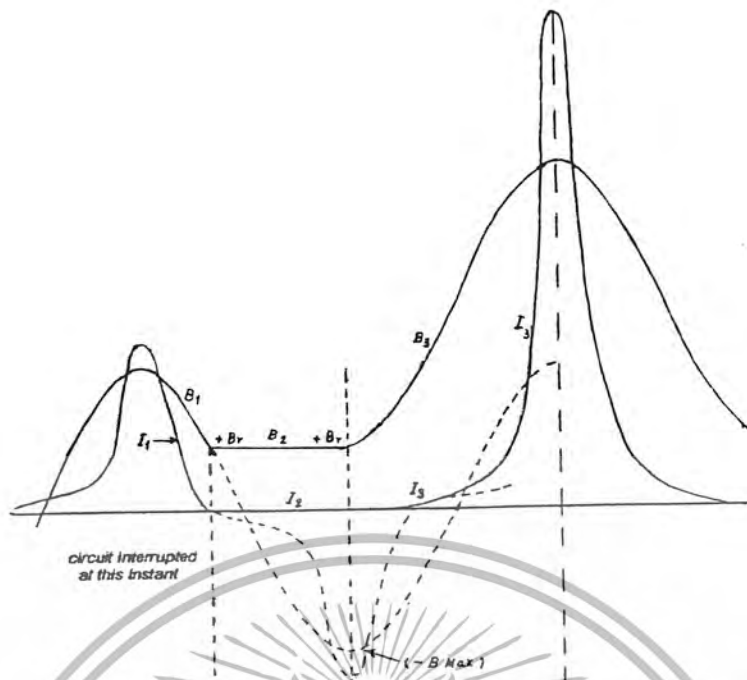
รูปที่ 2.3 แสดงวิธีการสร้างรูปคลื่นกระแส magnetizing จาก hysteresis loop

ขณะที่หม้อแปลงกำลังทำงานตามปกติ จะมีรูปคลื่นของกระแสกระตุ้นแม่เหล็ก ( $I_1$ ) และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_1$ ) ต่อมาสับสวิตซ์ตัดวงจรเมื่อกระแสเป็นศูนย์ จะมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง ( $+B_r$ ) แต่ถ้าหม้อแปลงไม่ได้ถูกสับสวิตซ์ตัดวงจร รูปคลื่นกระแสและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะเป็นไปตามเส้นโค้งประ แต่เนื่องจากหม้อแปลงได้ถูกสับสวิตซ์ตัดวงจร ดังนั้นรูปคลื่นกระแสและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจึงเป็นไปตามเส้นทึบ  $I_2$  และ  $B_2$  เมื่อหม้อแปลงถูกสับสวิตซ์ให้วงจรทำงานอีกครั้งที่แรงดันเท่ากับศูนย์ และมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างอยู่ในแกนเหล็กในทิศทางที่เสริมกันภายใต้สภาวะนี้จะทำให้เกิดขนาดของกระแสอินรัช ( $I_r$ ) สูงสุด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีขนาดเป็น  $2\phi_m$  แต่ขนาดรวมทั้งหมุดจากศูนย์ถึงค่ายอด มีค่าเป็น  $2\phi_m + \phi_r$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5

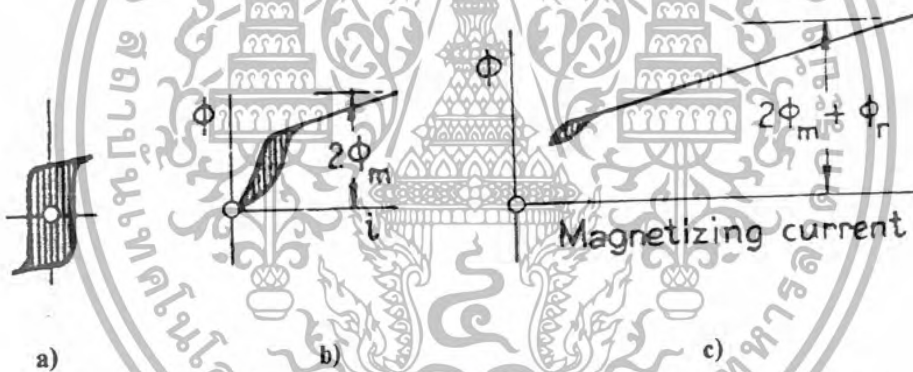


รูปที่ 2.4 แสดงรูปคลื่นแรงดันและเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อสับสวิตซ์ on ที่แรงดันศูนย์และมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง  $\phi_r$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงรูปคลื่นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสอินรัช



รูปที่ 2.6 แสดง hysteresis loop ของเส้นแรงแม่เหล็กกับ magnetizing current

รูป a) เป็น hysteresis loop แบบปกติและสมมาตร

รูป b) เมื่อไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างและสับสวิชท์ที่มุมแรงดันศูนย์

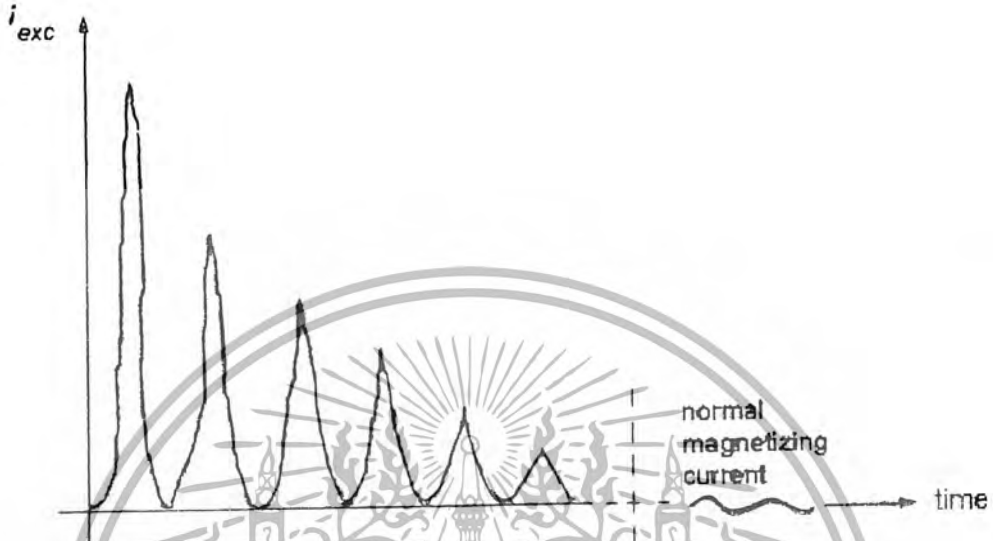
รูป c) แสดงซูเปอร์แซตเจอเรชัน(super-saturation) และไม่พิจารณา

ค่าสูญเสียฮิสเทอรีซิส(hysteresis loss)

เมื่อแกนเหล็กมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กค่าๆ เส้นแรงแม่เหล็กจะถูกจำกัดขอบเขตอยู่ในแกนเหล็ก แต่ถ้าแกนเหล็กมีการอัดตัวสูงค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (permeability) ของแกนเหล็กจะต่ำมาก ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กจำนวนมากไหลออกไปยังภายนอกของแกนเหล็ก หรือที่เรียกว่าเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (leakage flux) ค่ากระแสกระตุ้นแม่เหล็กสูงสุดจะถูกกำหนดโดยค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิซึ่งถูกพิจารณาเป็นขดลวดแกนอากาศ หลังจากนั้นค่ายอดของกระแสจะตกลงอย่างรวดเร็วเพราะอัตราการสลายตัวซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วน  $R/L$  เมื่อ  $R$  มีค่ามากและ  $L$  มีค่าน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติ เมื่อเวลาผ่านไปความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กลดลงค่า R จะลดลง แต่ค่า L จะเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้อัตราการสลายตัวช้าลงและเป็นสาเหตุให้เกิดการผิดเพี้ยน(distortion) ของกระแสกินเวลาหลายวินาที ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงปรากฏการณ์กระแสอินรัช

### 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของกระแสอินรัช

#### 2.3.1) มุมของแรงดันขณะสับสวิทซ์ให้วงจรทำงาน

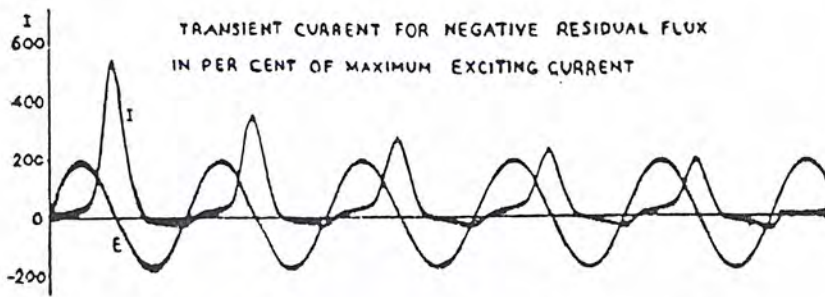
เนื่องจากในสถานะคงที่(steady state) รูปคลื่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะคล้ายรูปคลื่นของแรงดันประมาณ 90 องศา และขนาดของกระแสอินรัชสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อจ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่แรงดันศูนย์และแกนเหล็กมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

#### 2.3.2) ขนาดและเครื่องหมายของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก

เมื่อหม้อแปลงถูกสับสวิทซ์ตัดวงจร จะเห็นว่ายังคงมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างอยู่ภายหลังจากที่มีการสับสวิทซ์ และมีเครื่องหมายเกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นบวกหรือลบก็ตาม ขนาดของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นเมื่อจ่ายพลังงานให้กับหม้อแปลงในครั้งต่อไปจะขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างเป็นอย่างมาก

เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างมีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับรูปคลื่นไซน์ของเส้นแรงแม่เหล็ก (sinusoidal flux) ขณะสับสวิทซ์ให้วงจรทำงาน ที่แรงดันศูนย์จะได้ขนาดของกระแสอินรัชสูงสุด แต่ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างมีเครื่องหมายเดียวกันกับ รูปคลื่นไซน์ของเส้นแรงแม่เหล็ก และสับสวิทซ์ให้วงจรทำงาน ที่แรงดันศูนย์จะได้ขนาดของกระแสอินรัชสูงกว่ากระแสกระตุ้นแม่เหล็กที่สถานะคงตัวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



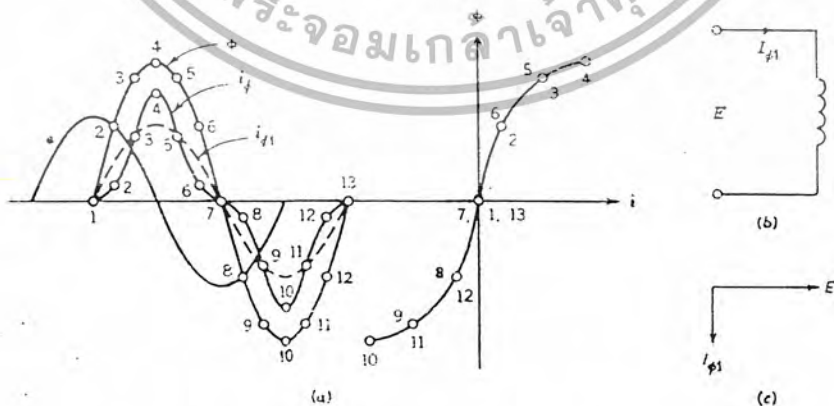
รูปที่ 2.8 แสดงผลจากการที่เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างมีเครื่องหมายเดียวกับ sinusoidal flux

### 2.3.3) ลักษณะ hysteresis ของวัสดุแกนเหล็ก

รูป hysteresis loop ที่ผลิตขึ้นมาเมื่อมีสาเหตุมาจากการจ่ายพลังงานให้กับหม้อแปลงในขณะที่ยังมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างอยู่ในแกนเหล็ก loop จะขยายออกไปในส่วนของ super-saturation อย่างมาก เนื่องจากกระแสกระตุ้นแม่เหล็ก ต้องสร้างเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดให้สอดคล้องกับสภาวะอินรัช ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของ hysteresis loop

#### 2.3.3.1) เมื่อไม่พิจารณา Hysteresis Loop

เริ่มแรกให้พิจารณา B-H curve ที่ไม่มี hysteresis loop แล้วเปลี่ยน B-H curve เป็น  $\phi$ -i curve ( $\phi = BA$ ,  $i = HI/N$ ) ดังรูป 2.9a จากรูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็ก sinusoidal และ  $\phi$ -i curve จะได้รูปคลื่นกระแสกระตุ้นดังรูป 2.9a กระแสกระตุ้นไม่เป็น sinusoidal แต่อินเฟสกับรูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็กและสมมาตรกับแรงดัน  $e$  fundamental component ( $i_{f1}$ ) ของกระแสกระตุ้นจะล่าหลังแรงดัน  $e$  อยู่ 90 องศา ดังนั้นจึงไม่มีค่ากำลังสูญเสียมาเกี่ยวข้องเพราะ hysteresis loop ซึ่งแสดงถึงค่ากำลังสูญเสีย นั้นไม่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นกระแสกระตุ้นจึงเป็นกระแสล่าหลังล้วนๆ และขดลวดกระตุ้นถูกแทนด้วยค่าความเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียวดังรูป 2.9b phasor diagram ของ fundamental current และแรงดันป้อนเข้าเป็นดังรูป 2.9c



รูปที่ 2.9 แสดงกระแสกระตุ้นเมื่อไม่มี hysteresis loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.2) เมื่อพิจารณา Hysteresis Loop

เมื่อพิจารณา hysteresis loop ของแกนเหล็ก รูป 2.10a รูปคลื่นของกระแสกระตุ้น( $i_c$ ) ได้มาจาก รูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็ก sinusoidal และ  $\phi$ - $i$  characteristic ของแกนเหล็ก กระแสกระตุ้นจะไม่เป็น sinusoidal และไม่สมมาตรกับรูปคลื่นแรงดัน สามารถแบ่งกระแสกระตุ้นออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรก ( $i_c$ ) อินเฟสกับแรงดัน  $e$  เป็นส่วนที่ทำให้เกิด การสูญเสียในแกนเหล็ก และอีกส่วนหนึ่ง ( $i_m$ ) จะอินเฟสกับ เส้นแรงแม่เหล็กและสมมาตรกับแรงดัน  $e$  ซึ่งจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการกระตุ้นแม่เหล็ก (magnetization) ของแกนเหล็ก ส่วนกระแสกระตุ้นแม่เหล็กนี้จะเหมือนเป็นกระแสกระตุ้นที่ไม่นำ hysteresis loop มา พิจารณา รูปที่ 2.10b แสดง phasor diagram ดังนั้นขดลวดกระตุ้นจะถูกแทนด้วยความต้านทาน  $R_c$  (core loss) และความเหนี่ยวนำ  $L_m$  (magnetization ของแกนเหล็ก) ดังรูป 2.10c

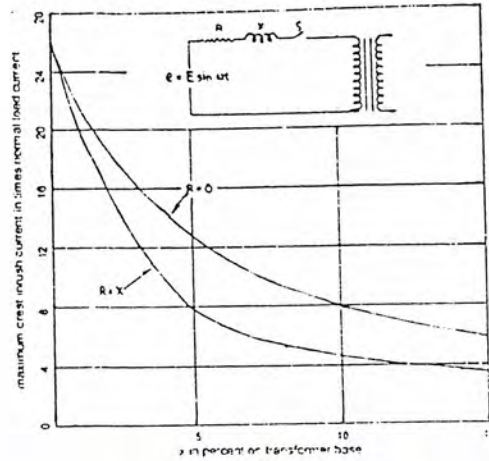


รูปที่ 2.10 แสดงกระแสกระตุ้นเมื่อมี hysteresis loop

### 2.3.4) สถานะของระบบ

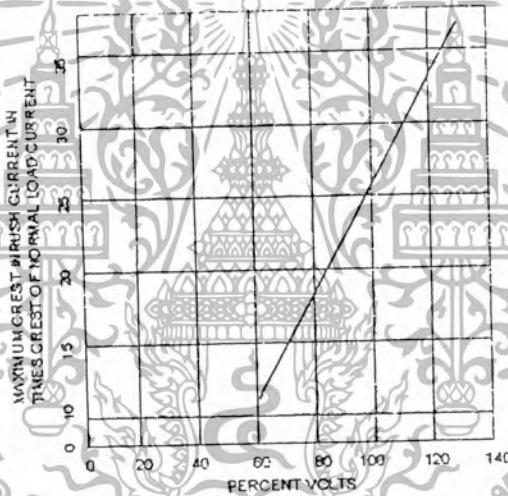
#### 2.3.4.1) ค่าความต้านทานทั้งหมด(impedance) ของแหล่งจ่ายไฟ

หม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่ใกล้แหล่งจ่ายกำลังขนาดใหญ่จะยังคงมีแรงดันเกือบเต็มพิกัดที่ปลายทาง (terminal) ในระหว่างที่จ่ายพลังงาน ดังนั้นค่าความต้านทานทั้งหมดของหม้อแปลงและสายส่งจึงไม่นำมาพิจารณาเมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานทั้งหมดของแหล่งจ่ายซึ่งจะทำให้แรงดันที่ปลายทางของหม้อแปลงลดลงอย่างมาก ขนาดของกระแสอินรัชจึงจะลดลงด้วย จากรูปที่ 2.11 จะสังเกตได้ว่าขนาดของกระแสอินรัชสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อค่า reactance ของระบบเป็นศูนย์



รูปที่ 2.11 แสดงการลดลงของกระแสอินรีชสูงสุดเมื่อรีแอกแตนซ์ (reactance) ของระบบเพิ่มขึ้น

2.3.4.2) แรงดันของระบบ



รูปที่ 2.12 แสดงผลจากแรงดันของระบบที่มีต่อค่ายอดสูงสุดของกระแสอินรีช

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกระแสอินรีชสูงสุดกับแรงดันป้อนเข้าเป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งอธิบายได้ว่า ภายใต้สภาวะที่ทำให้เกิดค่าของกระแสอินรีชสูงที่สุด แกนเหล็กจะอิ่มตัวอย่างเต็มที่ ดังนั้นขนาดกระแสอินรีชจะถูกจำกัดโดยreactance ของแกนอากาศของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเท่านั้น และความสัมพันธ์จะเป็นแบบเชิงเส้น ในช่วงของแรงดันที่จ่ายตั้งแต่ประมาณ 60% ของแรงดันพิกัด (rated voltage) ของหม้อแปลงขึ้นไป

2.3.4.3) โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการศึกษากระแสอินรีชของหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะสนใจที่การสับสวิทช์ต่อวงจรขณะไม่มีโหลด อย่างไรก็ตาม เมื่อได้ตรวจสอบการจ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงที่มีโหลดและพิจารณาผลของการล่าหลัง (lagging), นำหน้า (leading) และ ค่าของยูนิตีเพาเวอร์แฟกเตอร์ (unity power factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโหลดแล้ว ได้ผลสรุปว่าโหลดของหม้อแปลงที่ต่อทางด้านทุติยภูมิจะมีผลต่อขนาดของกระแสอินรัชเพียงเล็กน้อย

## 2.4 ผลกระทบของกระแสอินรัช

### 2.4.1) ผลต่อหม้อแปลงไฟฟ้า

ในช่วง transient แรกๆที่มีค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าสูง อาจทำให้เกิดแรงเค้นต่อตัวนำและฉนวนที่พันในขดลวด แรงนี้เกิดขึ้นจากกระแสอินรัชในขดลวดปฐมภูมิเพียงขดเดียวซึ่งต่างจากรีอิตเซอร์กิตปกติซึ่งเกิดในขดลวดทั้งคู่ โดยทั่วไปหม้อแปลงไฟฟ้าจะทนต่อการ short circuit ได้จึงทำให้ทนต่อกระแสอินรัชได้ด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อกระแสอินรัชมีค่าสูงมากก็อาจจะทำให้เกิดแรงเค้นที่มากกว่าในกรณีรีอิตเซอร์กิต

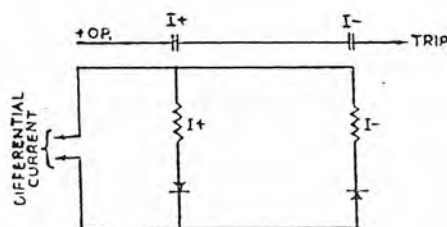
### 2.4.2) ผลต่อรีเลย์ป้องกันหม้อแปลง

กระแสอินรัชซึ่งเกิดในขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงจะมีลักษณะคล้ายกับกระแสฟอลต์ภายใน ดังนั้นรีเลย์บางประเภทจึงไม่สามารถแยกแยะกระแสทั้งสองชนิดนี้ได้ ทำให้รีเลย์ทำงานและหม้อแปลงถูกปลดออกโดยไม่จำเป็น

#### 2.4.2.1) วิธีป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ทำงานโดยไม่จำเป็น

วิธีแรกคือ การทำให้อุปกรณ์ไม่ทำงานในช่วงเวลาหนึ่งจนขนาดของกระแสอินรัชลดลงต่ำกว่าค่าการตอบสนองปกติของรีเลย์ วิธีนี้มีข้อเสียคือ ประสิทธิภาพการป้องกันของรีเลย์ลดลงในช่วงเวลาที่รีเลย์ไม่ทำงาน ซึ่งอาจจะเป็นปัญหาได้ถ้าเกิดฟอลต์ในช่วงเวลาสับสวิตช์ และวิธีนี้ไม่สามารถใช้ได้บางกรณี เช่น กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันหลังจากการกำจัดฟอลต์ภายนอก และกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงซึ่งต้องนานกับหม้อแปลงที่กำลังทำงานอยู่เพราะโวลท์เดจรีเลย์ (voltage relay) ไม่สามารถรีเซ็ตใหม่ได้

อีกวิธีหนึ่งคือ การอาศัยความไม่สมมาตรอย่างมากของกระแสอินรัชเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสฟอลต์ วิธีนี้ใช้รีเลย์ช่วย (auxiliary relay) 2 ตัว ดังรูปที่ 2.13 โดยขดลวดแต่ละขดต่ออนุกรมกับเรกติไฟเออร์ (rectifier) และให้ rectifier ทั้งสองตัวต่อในทิศทางตรงข้ามกัน กระแสไม่สมดุล (unbalanced) จากดิฟเฟอเรนเชียลรีเลย์ (differential relay) จะไหลไปยัง rectifier ที่ขดลวด auxiliary relay ที่ต้องนานกันอยู่ หน้าสัมผัสของ auxiliary relay ที่ต่ออนุกรมกับวงจรทริป (trip) หลัก จะปลดวงจรก็ต่อเมื่อ auxiliary relay ทั้งสองตัวทำงานเท่านั้น



รูปที่ 2.13 แสดงวงจร rectifier relay

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3) ผลต่อฟิวส์ป้องกันหม้อแปลง

ควรเลือกฟิวส์ที่มีขนาดเหมาะสมมีจะนั้นฟิวส์จะขาดเนื่องจากกระแสอินรัชโดยไม่จำเป็น ฟิวส์ควรมีขนาดเป็น 1.5 เท่าของกระแส full load และควรใช้ฟิวส์ที่ออกแบบเป็นพิเศษซึ่งทนกระแสเกินสูงๆในช่วงเวลาสั้นๆ

### 2.4.4) ผลต่อสถานะของระบบ

กระแสอินรัชจะทำให้ระดับแรงดันที่ terminal ของหม้อแปลงไฟฟ้าตกลงอย่างมาก จนอาจทำให้หน้าสัมผัสปลดวงจรออก ซึ่งมีผลทำให้ระบบไม่มั่นคง

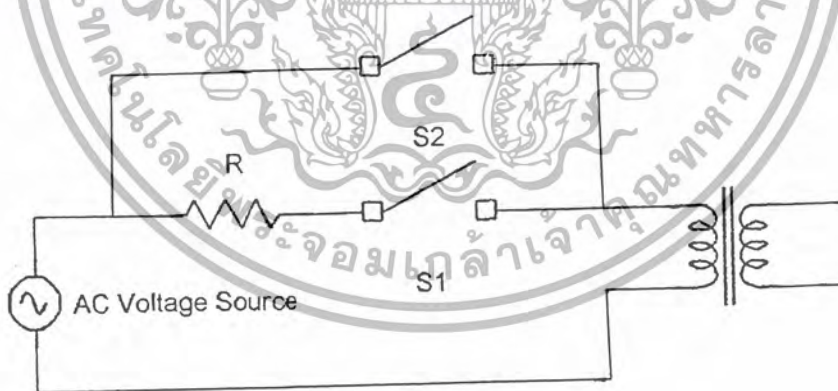
### 2.4.5) ผลต่อสวิตช์เกียร์

ในการจ่ายพลังงานให้หม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้หน้าสัมผัสเกิดการสึกกร่อนอย่างมากเนื่องมาจากมีกระแสค่าสูงไหลผ่าน โดยเฉพาะเมื่อมีการดับสวิตช์ ดังนั้นการที่ระบบป้องกันทำงานผิดพลาดบ่อยก็จะมีผลทำให้มีการสวิตช์มากขึ้นซึ่งจะทำให้หน้าสัมผัสเสียหายเร็วยิ่งขึ้น

## 2.5) วิธีการลดขนาดของกระแสอินรัช

### 2.5.1) วิธีสวิตช์ด้วยตัวต้านทาน (Resistance switching)

โดยใช้การสวิตช์สองชิ้นคอนซึ่งขนานกันและมีตัวต้านทานต่ออนุกรมอยู่ในการสวิตช์ชิ้นแรก เมื่อหน้าสัมผัสอันแรกปิด แรงดันบางส่วนจะไปตกที่ตัวต้านทาน ต่อมาเมื่อสวิตช์ตัวที่สองจะเหมือนการ short circuit ตัวต้านทาน การเลือกตัวต้านทานควรเลือกตัวต้านทานที่ทำให้มีแรงดันตกคร่อมที่ตัวต้านทานเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันวงจร หรือออกแบบตัวต้านทานให้กระแสที่ผ่าน ได้มีค่าลดลงจนเป็นค่าที่ปลอดภัยต่อหม้อแปลง



รูปที่ 2.14 แสดงวงจร Resistance Switching

### 2.5.2) การลดความเป็นแม่เหล็กตกค้าง

การลดปริมาณความเป็นแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีผลให้ขนาดกระแสอินรัชลดลง นอกจากนี้ยังต้องมีช่องอากาศ (air-gap) ในวงจรแม่เหล็กเพื่อที่จะลดความเป็นแม่เหล็กตกค้าง อย่างไรก็ตาม วิธีเหล่านี้ก็มีข้อเสียเรื่องการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นและความร้อนในแกนเหล็กสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ตัวเก็บประจุต่อคร่อมหม้อแปลงเพื่อลดความเป็นแม่เหล็กตกค้าง เมื่อสวิตช์เปิดจะมีการแกว่งของกระแสเล็กน้อยในตัวเก็บประจุและวงจรขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้ hysteresis ในแกนเหล็กเปลี่ยนไปโดยมีขนาดลดลงตามลำดับ

### 2.5.3) การสับสวิตช์ด้านแรงสูง

ขนาดของกระแสในรีซอร์ชขึ้นอยู่กับความเหนียวนำแกนอากาศของขดลวดกระตุ้น การกระตุ้นผ่านขดลวดแรงสูงจะมีผลให้ขนาดกระแสในรีซอร์ชลดลง เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำใหญ่กว่า ดังนั้นความเหนียวนำของขดลวดนี้จึงมีมากกว่า

### 2.5.4) การเพิ่มขดลวดแม่เหล็ก

ค่าขนาดกระแสในรีซอร์ชจะลดลงอย่างมากโดยขดลวดแม่เหล็กที่ใส่เพิ่มเข้าไป เมื่อหน้าสัมผัสหลักที่อยู่ใกล้กับแหล่งจ่ายถูกเปิด แรงดันที่คร่อมขดลวดขดใหม่จะส่งผลให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลในทิศทางตรงข้ามกับที่ไหลในแกนเหล็กที่มีขดลวดของหม้อแปลงพันอยู่ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจึงไหลวนในแกนเหล็กกรอบนอกแต่ไม่มีการเหนียวนำมากพอในแกนกลาง



รูปที่ 2.15 วงจรที่เพิ่มขดลวดแม่เหล็ก

## บทที่ 3

# ที่มาและวิธีสร้างโมเดลของหม้อแปลงเพื่อทดลองหาค่าของกระแสอินรัช

### 3.1 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงระดับศักดาไฟฟ้า จากระดับหนึ่งไปสู่อีกระดับหนึ่ง ซึ่งจุดประสงค์ในการเปลี่ยนระดับศักดาไฟฟ้าเนื่องมาจากถ้าต้องการส่งพลังงานไฟฟ้าในระยะไกลจำเป็นต้องยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นเพื่อการประหยัดทางด้านตัวนำรวมไปถึงการลดความสูญเสียเนื่องจากขดลวด (Copper loss,  $I^2R$ ) เมื่อมาถึงจุดใช้งานจำเป็นต้องลดศักดาให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งเรียกรวมการใช้งานแบบนี้ว่า Step – up หรือ Step – down voltage

ส่วนประกอบสำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยขดลวด 2 ขดหรือ มากกว่าซึ่งในแต่ละขดจะมีการเกี่ยวคล้องของสนามแม่เหล็กถึงกันเรียกว่า ฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องร่วมกัน (Mutual flux,  $\Phi$ ) โดยขดลวดขดด้านหนึ่งจะถูกเรียกว่า ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Coil) ซึ่งขดลวดขดนี้จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับมีผลให้เกิดสนามแม่เหล็ก ( $\Phi$ ) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าทางขดลวดด้านปฐมภูมิและจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ ส่วนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนแม่เหล็กที่ไปคล้องขดลวดอื่น ๆ ที่พันร่วมแกนกัน เราเรียกว่า ฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องร่วมกัน โดยขดลวดที่ถูกฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องร่วมกัน ไปคล้องจะเรียกว่าขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil) ซึ่งขดลวดนี้จะเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้า (induced voltage) และค่าศักดาไฟฟ้าที่ได้จากการเหนี่ยวนำโดย ฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องร่วมกัน จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ โดยคุณสมบัติของอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิต่อขดลวดทุติยภูมิจะเรียกว่า voltage ratio turn หรือ transformer ratio (a)

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำงานที่ความถี่ต่ำๆ ระหว่าง 20 ถึง 400 Hz มักจะมีแกนเหล็กเพื่อเป็นทางผ่านให้กับฟลักซ์ ที่เชื่อมต่อระหว่างขดลวด 2 ขด สำหรับหม้อแปลงที่ใช้งานที่ความถี่สูงๆ มักจะใช้แกนเฟอร์ไรต์ หรือ แกนอากาศ เพื่อลดการสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็ก โดยที่การสูญเสียในแกนเหล็ก (Eddy current losses) สามารถลดได้โดยการใส่แผ่นเหล็ก (lamination) บางๆมาเรียงซ้อนกันเพื่อทำเป็นแกนเหล็ก ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานที่ความถี่ 60Hz จะใช้แผ่นเหล็กหนาประมาณ 0.014 นิ้ว (0.35 mm) จึงจะได้ผลดี

### 3.2 รูปแบบขดหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 2 ขดลวด

ในหัวข้อนี้เราจะเริ่มต้นโดยการนำสมการของฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องในหม้อแปลง และสมการอื่นๆ มาคำนวณร่วมกับความต้านทานและฟลักซ์รั่วไหลในขดลวด และความเหนี่ยวนำของแกนเหล็ก จนถึงท้ายของหัวข้อ เราจะใช้สมการที่ได้ทั้งหมดมาประยุกต์ให้เป็นวงจรสมมูลย์เพื่อใช้แทนหม้อแปลงตัวหนึ่ง

#### 3.2.1 สมการของฟลักซ์ที่เกี่ยวข้อง

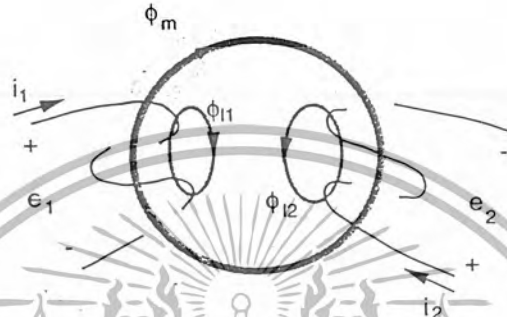
เมื่อมีฟลักซ์เกิดขึ้นดังแสดงในรูป 3.1 ฟลักซ์ทั้งหมดที่เชื่อมถึงกันในแต่ละขดลวดอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ฟลักซ์ที่ใช้ร่วมกัน ( $\Phi_m$ ) ซึ่งเชื่อมระหว่าง 2 ขดลวด และฟลักซ์รั่วไหล ซึ่งเกี่ยวข้องเฉพาะตัวมันเอง ดังนั้นฟลักซ์รวมที่แต่ละขดลวดจะเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_1 = \phi_{11} + \phi_m \quad (1)$$

$$\phi_2 = \phi_{12} + \phi_m \quad (2)$$

เมื่อ  $\phi_1$  และ  $\phi_2$  คือส่วนของฟลักซ์ที่ไหลในขดลวด 1 และ 2 ตามลำดับในหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ ฟลักซ์ที่ใช้ร่วมกัน ( $\phi_m$ ) ได้ถูกสร้างโดยผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวด 2 ขดที่เคลื่อนที่รอบๆ แกนเหล็ก



รูปที่ 3.1 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องในหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด

เมื่อจำนวนรอบที่ขดลวด 1 ( $N_1$ ) มีผลกับทั้ง ฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องร่วมกัน และ ฟลักซ์ที่รั่วไหล (Leakage flux) ดังนั้นฟลักซ์ที่ไหลในขดลวด 1 อาจนิยามในรูปของจำนวนรอบได้ดังนี้

$$\lambda_1 = N_1 \phi_1 = N_1 (\phi_{11} + \phi_m) \quad (3)$$

ซึ่งเราสามารถแปลงเทอมทางขวามือให้อยู่ในเทอมของกระแสได้โดยที่  $\phi_{11}$  ถูกสร้างจาก  $N_1 i_1$  เคลื่อนผ่านความซึมซาบของแกนเหล็ก  $P_{11}$  และ  $\phi_m$  ถูกสร้างโดยแรงเคลื่อน  $N_1 i_1 + N_2 i_2$  ผ่านความซึมซาบ  $P_m$  ซึ่งนำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\lambda_1 = N_1 (N_1 i_1 P_{11} + (N_1 i_1 + N_2 i_2) P_m) = (N_1^2 P_{11} + N_1^2 P_m) i_1 + N_1 N_2 P_m i_2 \quad (4)$$

เพราะฉะนั้นสมการของขด 2 จะเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= N_2 (\phi_{12} + \phi_m) = N_2 (N_2 i_2 P_{12} + (N_1 i_1 + N_2 i_2) P_m) \\ &= (N_2^2 P_{12} + N_2^2 P_m) i_2 + N_1 N_2 P_m i_1 \end{aligned} \quad (5)$$

โดยเราสามารถนำทั้ง 2 สมการที่ได้มาเขียนในรูปของความเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2 \quad (6)$$

$$\lambda_2 = L_{21} i_1 + L_{22} i_2 \quad (7)$$

โดยที่  $L_{11}$  และ  $L_{22}$  คือตัวเหนี่ยวนำในตัวเองของขดลวด 1 และ 2 และ  $L_{12}$  กับ  $L_{21}$  คือค่าความเหนี่ยวนำร่วมกันของทั้งสองขดลวด

ตัวเหนี่ยวนำของขดลวด 1 อาจรวมได้เป็น 2 องค์ประกอบ คือ  $L_{11}$  และ  $L_{m1}$  ดังนี้

$$L_{11} = \frac{\lambda_1 i_1}{i_1} = N_1 (\phi_{11} + \phi_m) = N_1^2 P_{11} + N_1^2 P_m = L_{11} + L_{m1} \quad (8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\phi_{m1} = N_1 i_1 P_m$  และจะได้ขดลวด 2 ดังนี้

$$L_{22} = \frac{\lambda_{2i_2}}{i_2} = N_2 \frac{(\phi_{12} + \phi_{m2})}{i_2} = N_2^2 P_{12} + N_2^2 P_m = L_{12} + L_{m2} \quad (9)$$

โดยที่  $\phi_{m2} = N_2 i_2 P_m$  คือส่วนของฟลักซ์เกี่ยวคล้องที่ถูกสร้างโดย  $i_2$  โดยทั่วไปแล้วค่าความอึดตัวของแกนเหล็กจะมีผลต่อการเหนี่ยวนำของขดลวดด้วย

เมื่อเทียบอัตราส่วน  $L_{m1}$  กับ  $L_{m2}$  เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนี่ยวนำแม่เหล็กของ 2 ขดลวดดังนี้

$$L_{m2} = \frac{N_2 \phi_{m2}}{i_2} = \frac{N_2 L_{12}}{N_1} = N_2^2 P_m = \frac{N_2^2}{N_1^2} L_{m1} \quad (10)$$

ฟลักซ์เกี่ยวคล้องรวมทั้งหมดที่เชื่อมระหว่าง 2 ขดลวด สามารถเขียนในเทอมของค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กของขดลวด ถูกกับผลจากกระแสแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เช่นผลรวมของฟลักซ์ที่ ขดลวด 1 สามารถ เขียนในเทอมของตัวเหนี่ยวนำแม่เหล็กของมันเอง ดังนี้

$$N_1 \phi_m = N_1 (\phi_{m1} + \phi_{m2}) = L_{m1} (i_1 + N_2 i_2) \quad (11)$$

ซึ่งจากสมการข้างบนจะเห็นได้ชัดว่า กระแสสร้างแม่เหล็กที่ขดลวด 1 คือ ผลรวมของกระแสที่ขดลวด 1 กับกระแสของขดลวด 2 ที่ถูกทรานสเฟอร์ มายังด้าน 1

### 3.2.2 สมการของแรงดัน

ค่าของแรงดันที่เหนี่ยวนำในขดลวดแต่ละด้านจะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์คก้างของขดลวด จากสมการที่ 6 เราจะได้สมการของแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวด 1 ดังนี้

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (12)$$

แทนที่ค่า  $L_{11}$  ด้วย  $L_1 + L_{m1}$  และค่า  $L_{12}$  ด้วย  $N_2 L_{m1} i_2 / N_1$  ค่าแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวด 1 จะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$e_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + L_{m1} \frac{d(i_1 + (N_2/N_1) i_2)}{dt} \quad (13)$$

เพื่อความสะดวกในการคำนวณเราจึงจะทำการแปลงค่าของพารามิเตอร์ค่าต่างๆมาไว้ยังด้าน 1 โดยเทียบกับอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด และจะแทนค่าของ  $i_2$  ที่ทรานสเฟอร์มาด้าน 1 ด้วย  $i_2'$  ซึ่งจะเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$e_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + L_{m1} \frac{d(i_1 + i_2')}{dt} \quad (14)$$

เพราะฉะนั้นทางด้าน 2 จะได้ดังนี้

$$e_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + L_{m2} \frac{d[(N_1/N_2) i_1 + i_2]}{dt} \quad (15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันทางด้าน 2 ( $e_2$ ) สามารถย้ายมาทางด้านขดลวด 1 ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ ของขดลวด  $N_1$  กับ  $N_2$  โดยคูณ  $N_1/N_2$  กับสมการของ  $e_2$  ข้างต้น และเขียนแทน  $N_1 e_2/N_2$  ด้วย  $e'_2$  และแทนค่าของ  $N_1^2 L_{m2}/N_2^2$  ด้วย  $L_{m1}$  ดังนั้นจะเขียนสมการ  $e'_2$  ใหม่ได้ดังนี้

$$e'_2 = L'_{12} \frac{di'_1}{dt} + L_{m1} \frac{d}{dt} (i_1 + i'_2) \quad (16)$$

แรงดันที่ด้านปลายของขดลวด คือผลรวมของแรงดันที่เหนี่ยวนำและความต้านทานที่ตกคร่อมขดลวด ซึ่ง จะแสดงแรงดันที่ขดลวด 1 ได้ดังนี้

$$v_1 = i_1 r_1 + e_1 = i_1 r_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{m1} \frac{d}{dt} (i_1 + i'_2) \quad (17)$$

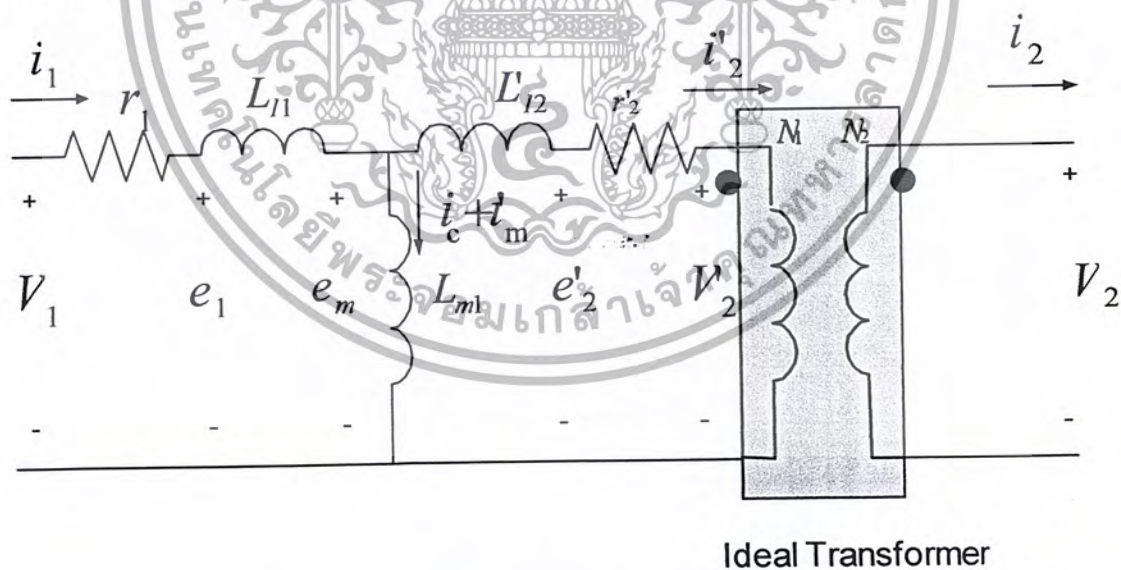
เขียนค่าของแรงดันขดลวด 2 ใหม่โดยทรานสเฟอร์มาด้าน 1 เหมือนข้างต้น ซึ่งจะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} v'_2 &= N_1 v_2 = \frac{(N_2 i_2)(N_1)^2 r_2 + e'_2}{N_2} \\ &= i'_2 r'_2 + L'_{12} \frac{di'_2}{dt} + L_{m1} \frac{d}{dt} (i_1 + i'_2) \end{aligned} \quad (18)$$

สมการข้างต้นคือการย้ายค่าตัวแปรทั้งหมดทางด้าน 1 ถ้าเราต้องการย้ายไปทางด้าน 2 ก็สามารถทำได้โดยวิธีเดียวกันนี้

### 3.2.3 การแทนค่าในวงจรสมมูล

นำค่าสมการที่ได้ทั้งหมดมาสร้างเป็นวงจรของหม้อแปลง ได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่าทั้งหมดที่ด้าน 2 ได้ถูกทรานสเฟอร์มาทางด้าน 1 หมดแล้วโดยใช้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$N_1 i'_2 = N_2 i_1 \quad (19)$$

$$V'_2 / V_2 = N_1 / N_2 \quad (20)$$

และที่หม้อแปลงไฟฟ้า จะมีค่าของความเหนี่ยวนำของแกนเหล็กด้วย ดังนั้นเราจึงจะแทนค่าของความเหนี่ยวนำรวมที่ขดลวด 1 คือ  $L_{m1}$  และค่าพารามิเตอร์ อื่นๆจะหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r'_2 = \frac{N_1^2 r_2}{N_2^2} \quad (21)$$

$$L'_2 = \frac{N_1^2 L_{l2}}{N_2^2} \quad (22)$$

ถ้าเราต้องการรวมค่าความสูญเสียในแกนเหล็กเข้าไปด้วย เราก็สามารถใส่ค่าความต้านทานต่อขนานกับค่า  $L_{m1}$  ที่มีอยู่ในรูปได้ เพื่อแสดงถึงการมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

### 3.3 การจำลองการทำงานของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงวิธีนำเอาสมการของแรงดันและฟลักซ์เกี่ยวคล้องของหม้อแปลง 2 ขดลวดมาจำลองการทำงานโดย คอมพิวเตอร์ ซึ่งจริงๆแล้วมีวิธีการจำลอง การทำงานของหม้อแปลงได้หลายวิธีด้วยกัน แต่ในกรณีของเราจะนำค่าของฟลักซ์เกี่ยวคล้องของขดลวดทั้ง 2 มาทำแบบ State variables ซึ่งจะสามารถเขียนสมการของแรงดันใหม่ ดังนี้

$$V_1 = i_1 r_1 + \frac{1}{\omega b} \frac{d\psi_1}{dt} \quad (23)$$

$$V'_2 = i'_2 r'_2 + \frac{1}{\omega b} \frac{d\psi'_2}{dt} \quad (24)$$

โดยที่  $\psi_1 = \omega b \lambda_1$ ,  $\psi_2 = \omega b \lambda_2$  โดยที่  $\omega b$  คือความถี่พื้นฐาน ที่ใช้งาน ค่าของฟลักซ์เกี่ยวคล้องต่อวินาทีของขดลวดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\psi_1 = \omega b \lambda_1 = X_{l1} i_1 + \psi_m \quad (25)$$

$$\psi'_2 = \omega b \lambda'_2 = X'_{l2} i'_2 + \psi_m \quad (26)$$

$$\text{และ} \quad \psi_m = \omega b L_{m1} (i_1 + i'_2) + X_{m1} (i_1 + i'_2) \quad (27)$$

โดยที่ค่าของ  $\psi_m$  ได้ถูกทรานสเฟอร์มาทางด้าน 1 พร้อมกับ  $L_{m1}$

ค่าของกระแส  $i_1$  สามารถเขียนใหม่ในรูปของ  $\psi_1$  กับ  $\psi_m$  และ  $i'_2$  ก็สามารถเขียนในรูปของ  $\psi'_2$  และ  $\psi_m$  โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการ 25 และ 26 ข้างต้น

$$i_1 = (\psi_1 - \psi_m) / X_{l1} \quad (28)$$

$$i'_2 = (\psi'_2 - \psi_m) / X'_{l2} \quad (29)$$

นำค่าของ  $i_1$  และ  $i'_2$  ไปแทนในสมการของ  $\psi_m$  ได้

$$\psi_m / X_{m1} = (\psi_1 - \psi_m) / X_{l1} + (\psi'_2 - \psi_m) / X'_{l2} \quad (30)$$

รวม  $\psi_m$  ไว้ในเทอมเดียวเราจะได้สมการของ  $\psi_m$  ในเทอมของสองสถานะ พิจารณาดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Psi_m \left( \frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{l1}} + \frac{1}{X'_{l2}} \right) = (\Psi_1 / X_{l1}) + (\Psi'_2 / X'_{l2}) \tag{31}$$

ให้  $\frac{1}{X_m} = \frac{1}{X_{m1}} + \frac{1}{X_{l1}} + \frac{1}{X'_{l2}}$  (32)

เราจะเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

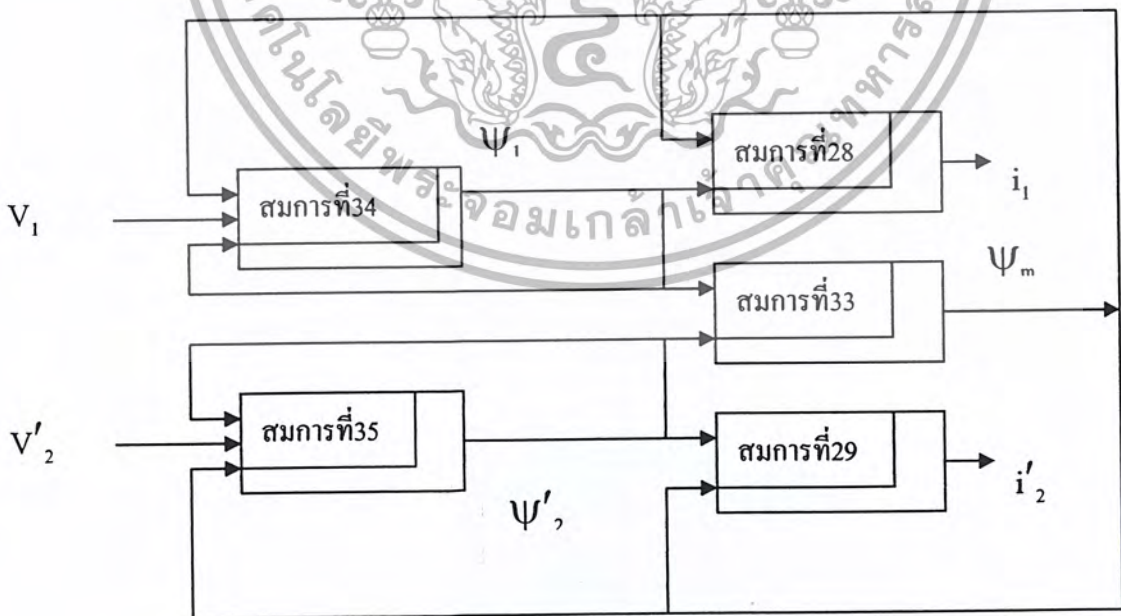
$$\Psi_m = X_m [(\Psi_1 / X_{l1}) + (\Psi'_2 / X'_{l2})] \tag{33}$$

เมื่อรวมสมการทั้งหมดเข้าด้วยกัน เราจะได้สมการของฟลักซ์เกี่ยวกับของแต่ละขดลวด ในรูปของการอินทิเกรต ดังนี้

$$\Psi_1 = \int \{ \omega b v_1 - \omega b r_1 (\Psi_1 - \Psi_m) \} dt \tag{34}$$

$$\Psi'_2 = \int \{ \omega b v'_2 - \omega b r'_2 (\Psi'_2 - \Psi_m) \} dt \tag{35}$$

ตามระบบจำลองที่ได้ ค่าของฟลักซ์เกี่ยวกับคือตัวแปรภายใน ค่าของแรงดันขาออกเป็นค่าของอินพุต และกระแสในขดลวดเป็นค่าเอาต์พุต ดังรูป 3.3 แสดงถึงการทำงานของตัวแปรในการจำลองการทำงานของหม้อแปลง 2 ขดลวด (กรณีเป็นเชิงเส้น) ที่ต้องการค่าของแรงดันขาออกขณะนั้นของทั้ง 2 ขดลวด เป็นค่าเริ่มต้นของการจำลองระบบ รูป 3.4 แสดงวงจรที่ใช้งานโดยโปรแกรม MATLAB ที่ประยุกต์มาจากวงจรการทำงานของตัวแปรในรูป 3.3 ซึ่งมันจะบอกค่าของตัวแปรภายใน คือ  $\Psi_1$ ,  $\Psi'_2$  และ  $\Psi_m$  ที่หาได้โดยตรงจากการจำลองระบบนี้



**รูปที่ 3.3** การทำงานของตัวแปรในการจำลองระบบของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด (กรณีเป็นเชิงเส้น)

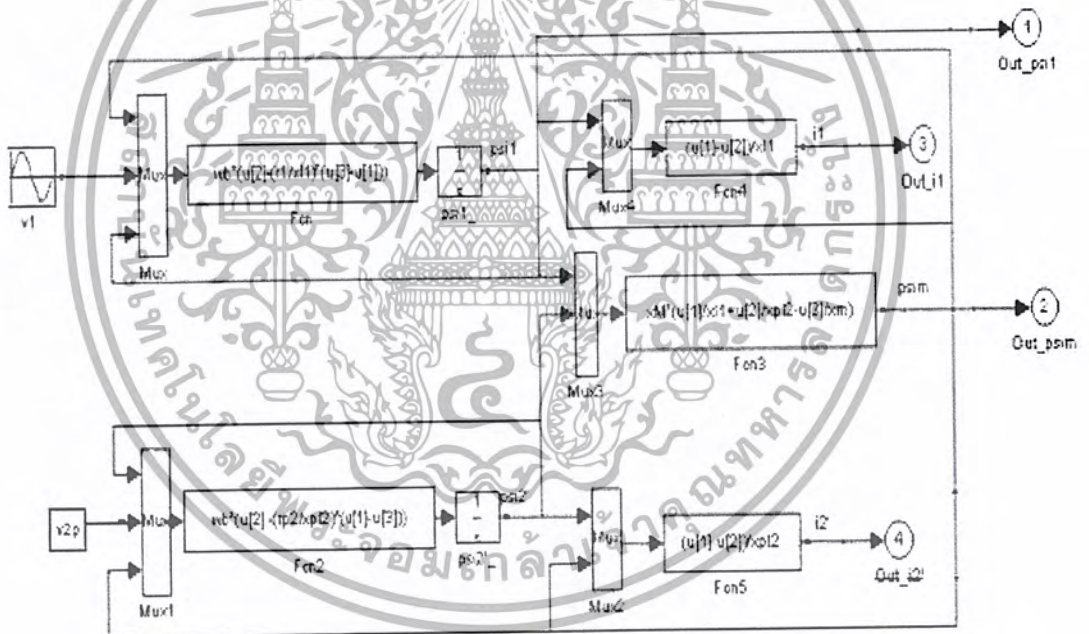
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 สถานะเงื่อนไขที่ขาออก

ดังแสดงในรูปที่ 3.4 คือการจำลองระบบของขดลวดหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวดโดยใช้แรงดันขาออกของขดลวดทั้ง 2 เป็นอินพุตให้กับกรจำลองระบบและสร้างกระแสขดลวดเป็นเอาต์พุต ค่าแรงดันอินพุตที่ป้อนเข้าขดลวด 1 ( $V_1$ ) เป็นได้ทั้งค่าที่ระบุไว้ก่อนแล้ว หรือจะเป็นค่าที่ได้มาจากส่วนอื่นในระบบจำลองที่เชื่อมต่อกับขดลวด 1 อยู่ ซึ่งเราจะเห็นภาพได้ชัดเจนขึ้นเมื่อพิจารณาถึงการได้มาของค่าแรงดันป้อนเข้าที่ขาของ  $V_2$

สถานะที่เราทำการ short-circuit ที่ด้านขดลวด 2 จะง่ายต่อการจำลองระบบมากเพราะจะได้ค่า  $V_2' = 0$  สถานะ open-circuit ไม่สามารถจำลองระบบได้ง่ายเหมือนสถานะ short-circuit เพราะสถานะ open-circuit ที่ด้านขดลวด 2 จะทำให้  $i_2'$  เป็น 0 ซึ่งจากสมการที่ผ่านมาจะได้  $V'_{2oc} = \frac{d\Psi_m}{dt}$  เพื่อหลีกเลี่ยงการนำเอาค่าของ  $\Psi_m$  มาใช้ เราจึงหาค่าของแรงดันป้อนเข้าทางด้านขดลวด 2 จากค่าของ  $\frac{d\Psi_m}{dt}$  ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ได้ในสถานะที่  $i_2' = 0$  คือ

$$V'_{2oc} = \frac{d\Psi_m}{dt} = \frac{X_{m1}}{X_{l1} + X_{m1}} \frac{d\Psi}{dt} = \frac{X_{m1}}{X_{l1} + X_{m1}} (v_1 - i_1 r_1) \omega b \quad (36)$$

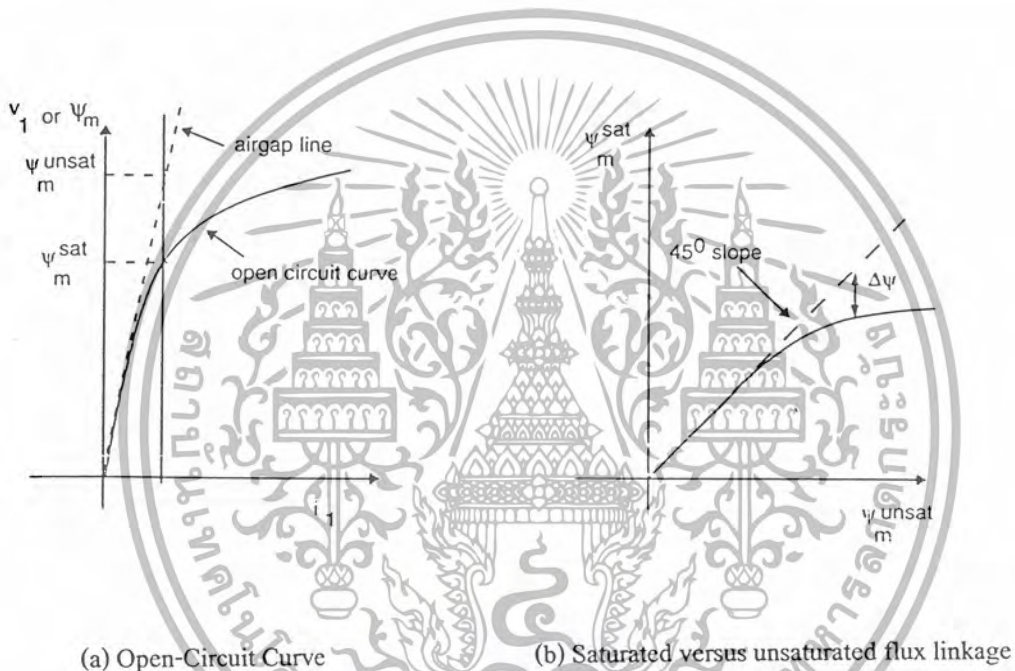


รูปที่ 3.4 แสดงการจำลองระบบของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด

(กรณีเป็นเชิงเส้น)

### 3.5 การรวมค่าการอิ่มตัวของแกนเหล็กกับการจำลองหม้อแปลง

การอิ่มตัวของแกนเหล็กเป็นตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อค่าความเหนี่ยวนำร่วมกัน และค่าความเหนี่ยวนำที่รั่วไหล (มีผลน้อยกว่ามาก) แม้ว่าจะมีขนาดเล็กมากแต่ผลของการอิ่มตัวที่มีต่อตัวต้านทานก็ยังต้องการคำอธิบายที่มากขึ้นกว่าในปัจจุบัน ในการจำลองระบบหลายๆแบบผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็กอาจจะประมาณได้ว่าเป็นการจำกัดขอบเขตของทางเดินของฟลักซ์ ดังนั้นพฤติกรรมของการอิ่มตัวของแกนเหล็กสามารถประมาณจากกราฟของเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลงขณะเปิดวงจรสามารถทำได้ โดยการพล็อตค่าของแรงดันที่ได้กับกระแสขณะไม่ต่อโหลดที่ขดลวด 1 เมื่อทางด้านทุติยภูมิได้ทำการเปิดวงจร ดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของการอิ่มตัว

เมื่อเราไม่คิดการสูญเสียในแกนเหล็ก กระแสขณะไม่มีโหลดก็คือ กระแสกระตุ้นแม่เหล็ก (Magnetizing,  $I_{mms}$ ) เมื่อมีแค่กระแสไม่จ่ายโหลดไหนในขดลวด 1 แรงดันที่ตกคร่อมค่าความต้านทาน ( $r_1 + j\omega L_1$ ) จึงมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับที่ตกคร่อม ตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่ ( $X_{m1} = \omega L_{m1}$ ) เมื่อด้านทุติยภูมิเปิดวงจรจะทำให้  $i_2$  เป็น 0 ดังนั้น  $V_{1rms} \approx I_{mms} + X_{m1}$  ในช่วงที่ยังไม่อิ่มตัวอัตราส่วนของ  $V_{1rms} / I_{mms}$  จะยังคงที่แต่ค่าของแรงดันจะเพิ่มในช่วงเหนื่อจากช่วงโค้งของกราฟขณะเปิดวงจรซึ่งช่วงนี้ค่าอัตราส่วนจะลดลงเรื่อยๆอย่างรวดเร็ว ซึ่งวิธีนี้เราจะใช้ในการคำนวณเมื่อรวมผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็กเข้ามาด้วย คือใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องร่วมกันที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวมาพิจารณาเมื่อค่าของฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องนั้นถูกทำเป็น State variables แล้ว แต่ก่อนที่จะไปพูดถึงวิธีการสร้างและใช้งานโมเดล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของหม้อแปลง เราจะมาดูกันที่การแปลงตัวแปรในสมการที่ผ่านมาก่อนเพื่อให้สามารถแยกแยะได้ถูกระหว่างค่าของฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องร่วมกันทั้งที่อิ่มตัว และ ยังไม่อิ่มตัว

จากสมการที่ 27 เราจะได้รูปแบบของสมการใหม่ดังนี้

$$\Psi_m^{\text{unsat}} = \omega b L_{m1}^{\text{unsat}} (i_1 + i'_2) = X_{m1}^{\text{unsat}} (i_1 + i'_2) \quad (37)$$

ในทางเดียวกันกับเทอมของฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องที่อิ่มตัว เราจะเขียนค่าสมการของกระแสที่ไหลในขดลวดได้ใหม่ดังนี้

$$i_1 = \frac{\Psi_1 - \Psi_m^{\text{sat}}}{X_{l1}} \quad (38)$$

$$i'_2 = \frac{\Psi'_2 - \Psi_m^{\text{sat}}}{X'_{l2}} \quad (39)$$

ดังนั้นเทอมของ  $\Psi_m^{\text{unsat}}$  ข้างต้น จะสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\Psi_m^{\text{unsat}}}{X_{m1}^{\text{unsat}}} = \frac{\Psi_1 - \Psi_m^{\text{sat}}}{X_{l1}} + \frac{\Psi'_2 - \Psi_m^{\text{sat}}}{X'_{l2}} \quad (40)$$

กำหนดให้ค่าของ  $\Psi_1$  และ  $\Psi'_2$  ในสมการข้างต้น เป็นค่าที่อิ่มตัวแล้ว แทนที่ค่าของ  $\Psi_m^{\text{sat}}$  ด้วย

$\Psi_m^{\text{sat}} + \Delta\Psi$  แล้วรวมสมการให้อยู่ในรูปของ  $\Psi_m^{\text{sat}}$  ได้ดังนี้

$$\Psi_m^{\text{sat}} = X_m^{\text{sat}} \left( \frac{\Psi_1 + \Psi'_2 - \Delta\Psi}{X_{l1} + X'_{l2}} \right) \quad (41)$$

โดยค่าของ  $X_m$  ในกรณีที่ไม่อิ่มตัวคือ

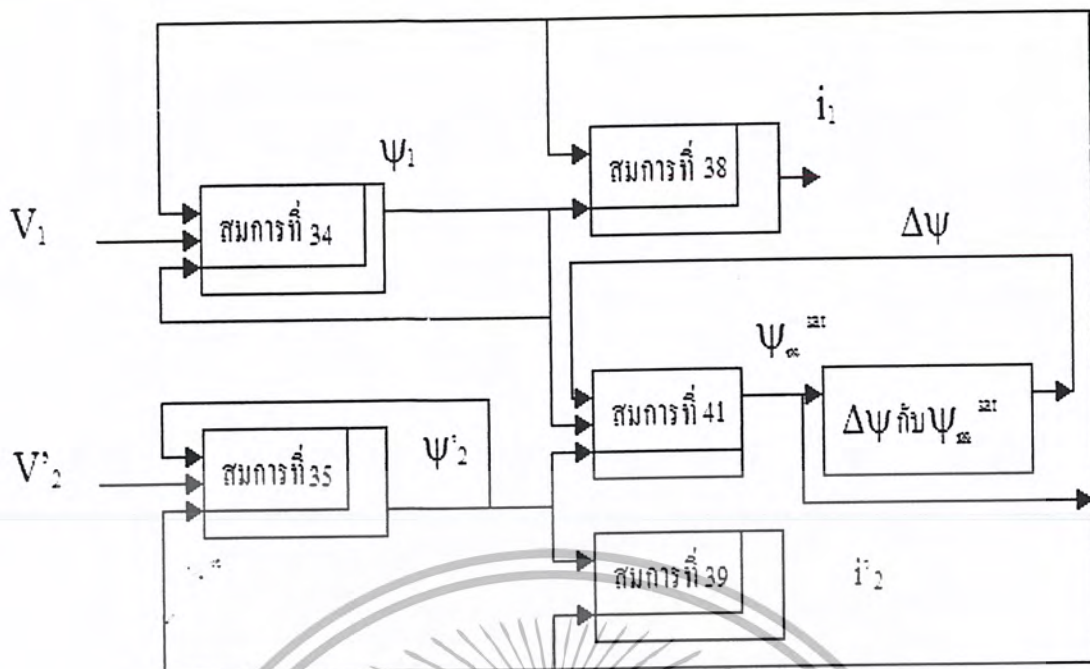
$$\frac{1}{X_m} = \frac{1}{X_{m1}^{\text{unsat}}} + \frac{1}{X_{l1}} + \frac{1}{X'_{l2}} \quad (42)$$

การเปรียบเทียบสมการข้างต้นในสภาวะอิ่มตัว กับสมการในสภาวะที่ยังไม่อิ่มตัวหรือในช่วงที่ยังเป็นเชิงเส้น อยู่ นั้น จะแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการอิ่มตัวของฟลักซ์ที่ใช้ร่วมกัน เราจำเป็นต้องประมาณค่าของ  $\Delta\Psi$  ที่อยู่ด้านขวามือของสมการ  $\Psi_m^{\text{sat}}$  ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ

$\Delta\Psi$  กับ  $\Psi_m^{\text{sat}}$  การคำนวณค่าของฟลักซ์ที่ใช้ร่วมกันที่อิ่มตัวได้แสดงไว้ดังรูป 3.6 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับในรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นสภาวะอิ่มตัวจะเห็นได้ว่ามีเทอมที่ต่างกันอยู่ คือ เทอมสุดท้ายในสมการ

$\Psi_m^{\text{sat}}$  ซึ่งโมเดลที่ได้เพิ่มขึ้นมาเพื่อคำนวณหาค่า  $\Delta\Psi$  จากค่าของ  $\Psi_m^{\text{sat}}$  โดยที่รูปของ  $\Delta\Psi$  ก็คือรูป

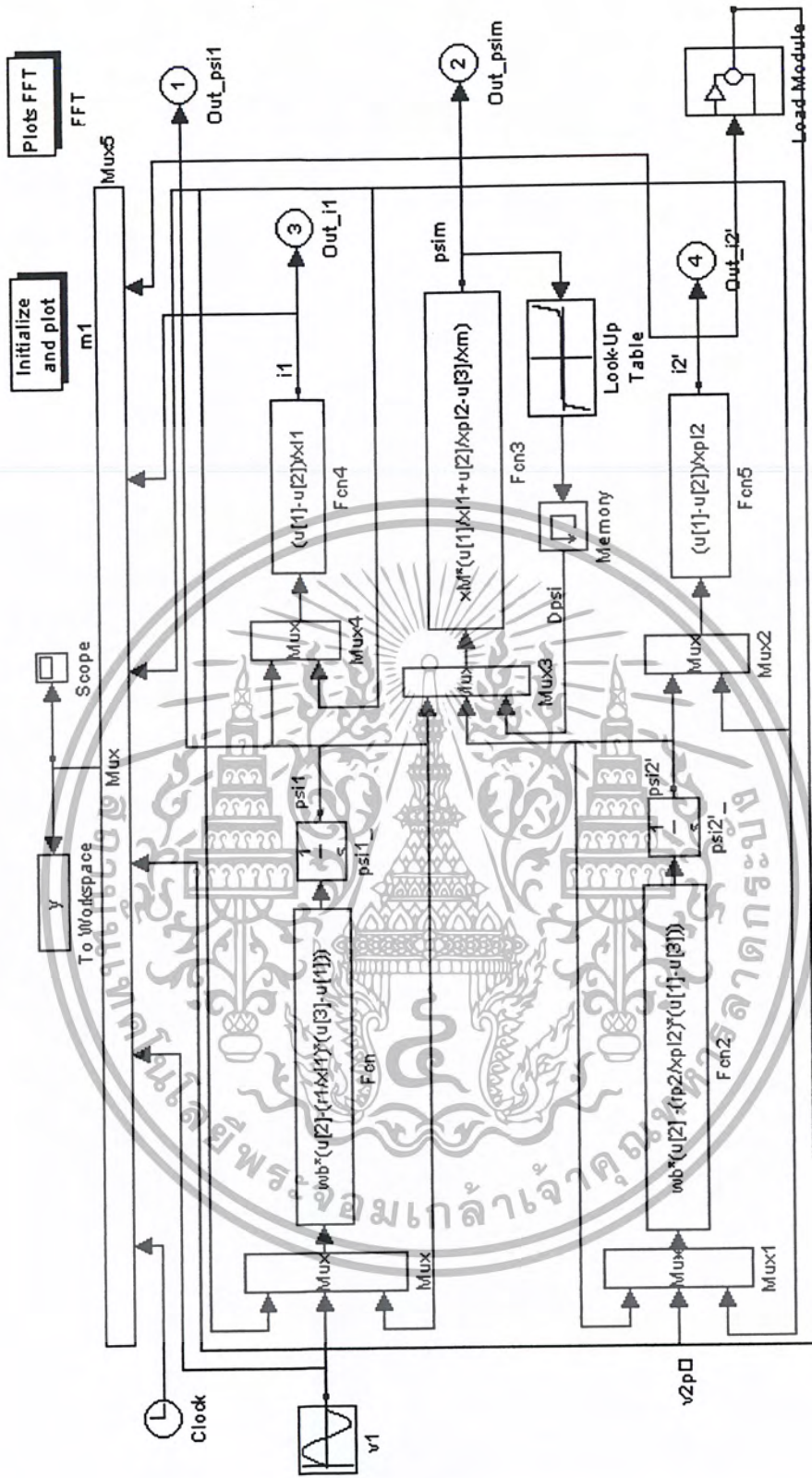
การคำนวณทางคณิตศาสตร์นั่นเอง



รูปที่ 3.6 แสดงการทำงานของตัวแปรในการจำลองระบบของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด  
(กรณีที่มีการอิ่มตัวของฟลักซ์เกี่ยวข้อง)

ในการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์ ค่าปัจจุบันของ  $\Delta\psi$  สามารถประมาณได้โดยการใช้ a look-up table ที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะใช้วิธีการ interpolation หรือคือวิธีการประมาณค่าฟังก์ชันตามปกติของช่วงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ  $\Delta\psi$  กับ  $\psi_m^{sat}$  ในการใช้งาน Simulink ( การจำลองระบบ ) ตารางความสัมพันธ์ระหว่างค่าของของ  $\Delta\psi$  กับ  $\psi_m^{sat}$  สามารถถูกคำนวณโดยใช้โมเดลของ look-up table ที่มีอยู่ใน Nonlinear block library ในโปรแกรม MATLAB ส่วนค่าของอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากโมเดล look-up table จะได้รับจากอะเรย์ที่มีค่าไม่แน่นอนของค่าอินพุตที่มีความยาวของอะเรย์เท่ากัน

จากรูปที่ 3.4 เราสามารถนำความสัมพันธ์ของสมการและวิธีคำนวณหาค่าของ  $\Delta\psi$  จากรูป 3.6 มาสร้างเป็นระบบจำลองของหม้อแปลงที่จะนำไปใช้ในการทดลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB ได้ ดังแสดงตามรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการจำลองระบบของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด  
(กรณีที่มีการอิมิตัวของฟลักซ์ที่เกี่ยวข้อง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่าของสมการในระบบจำลองจะเป็นดังนี้

สมการที่ 34.)  $\psi_1 = \int \{ \omega b v_1 - \omega b r_1 (\psi_1 - \psi_m) / X_{l1} \} dt$   
 โดยที่  $\psi_1$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับเวลาของขดลวดปฐมภูมิ  
 $\omega b$  คือ ความถี่พื้นฐาน  
 $v_1$  คือ ค่าศักดาไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ  
 $r_1$  คือ ค่าความต้านทานของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ  
 $\psi_m$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับเวลาของขดลวดทั้ง 2 ด้าน  
 $X_{l1}$  คือ ค่า Leakage reactance ของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

สมการที่ 35.)  $\psi'_2 = \int \{ \omega b v'_2 - \omega b r'_2 (\psi'_2 - \psi_m) / X'_{l2} \} dt$   
 โดยที่  $\psi'_2$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับเวลาของขดลวดทุติยภูมิ  
 ที่ถูกทรานสเฟอร์มายังด้านปฐมภูมิ

$\omega b$  คือ ความถี่พื้นฐาน  
 $v'_2$  คือ ค่าศักดาไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ถูกทรานสเฟอร์มายังด้านปฐมภูมิ  
 $r'_2$  คือ ค่าความต้านทานของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ  
 ที่ถูกทรานสเฟอร์มายังด้านปฐมภูมิ  
 $\psi_m$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับเวลาของขดลวดทั้ง 2 ด้าน  
 $X'_{l2}$  คือ ค่า Leakage Reactance ของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ  
 ที่ถูกทรานสเฟอร์มายังด้านปฐมภูมิ

สมการที่ 41.)  $\psi_m^{sat} = X_m \left( \psi_1 / X_{l1} + \psi'_2 / X'_{l2} - \frac{\Delta \psi}{X_{m1}^{unsat}} \right)$   
 โดยที่  $\psi_m^{sat}$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับเวลาของขดลวดทั้ง 2 ด้าน

$$X_m = 1 / \left\{ (1 / X_{m1}^{unsat}) + (1 / X_{l1}) + (1 / X'_{l2}) \right\}$$

$X_{m1}^{unsat}$  = ค่า Leakage Reactance ที่ใช้ร่วมกันของขดลวดทางด้านปฐมภูมิขณะที่ยังไม่อิ่มตัว

$$\psi_m^{unsat} = \psi_m^{sat} + \Delta \psi$$

สมการที่ 38.)  $I_1 = (\psi_1 - \psi_m^{sat}) / X_{l1}$

โดยที่  $I_1$  คือ ค่าของกระแสทางด้านปฐมภูมิ

$\psi_1$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับเวลาของขดลวดปฐมภูมิ

$\psi_m^{sat}$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับเวลาของขดลวดทั้ง 2 ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	$X_{l_1}$	คือ	ค่า Leakage Reactance ของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ
สมการที่ 39.)	$I'_2$	=	$(\Psi'_2 - \Psi_m) / X'_{l_2}$
โดยที่	$I'_2$	คือ	ค่าของกระแสทางด้านทุติยภูมิที่ถูกทรานสเฟอร์มายังด้านปฐมภูมิ
	$\Psi'_2$	คือ	เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับขดลวดต่อเวลาของขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ถูกทรานสเฟอร์มายังด้านปฐมภูมิ
	$\Psi_m^{sat}$	คือ	เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับขดลวดขณะอิ่มตัวต่อเวลาของขดลวดทั้ง 2 ด้าน
	$X'_{l_2}$	คือ	ค่า Leakage Reactance ของขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ถูกทรานสเฟอร์มายังด้านปฐมภูมิ

### 3.6 การจำลองระบบของโมเดลของหม้อแปลงโดยใช้ MATLAB

จากโมเดลหม้อแปลงที่ได้ในหัวข้อที่ผ่านมาเราจะนำมาใช้กับชุดคำสั่งที่ได้มาจากหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery ของ Chee-Mun Ong ดังนั้นเราจึงทำการสร้างระบบจำลองของหม้อแปลงขึ้นมาโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อนำไปทำการจำลองระบบเพื่อวิเคราะห์กราฟของกระแสที่เกิดขึ้น และจากที่โมเดลของเราเป็นโมเดลเฉพาะของหม้อแปลงเท่านั้น ยังไม่ได้รวมถึงการนำเอาโหลดต่างๆมาต่อเข้ากับหม้อแปลง ดังนั้นในการจำลองระบบของหม้อแปลงที่สร้างขึ้นมาระบุกำหนดให้ทางด้านทุติยภูมิของระบบเป็น open-circuit

ในขั้นต้นของการจำลองระบบของหม้อแปลง เราจะต้องทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้กับหม้อแปลง โดยจะกำหนดให้หม้อแปลงที่เรานำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้เป็นหม้อแปลงที่เหมือนกันกับหม้อแปลงในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery คือ เป็นหม้อแปลงเฟสเดียว 120/240 , 1.5KVA , 60Hz , pole-type และค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เรากำหนดให้กับหม้อแปลงเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} R_1 &= 0.25 \quad \Omega \\ R'_2 &= 0.134 \quad \Omega \\ X_{l_1} &= 0.056 \quad \Omega \\ X'_{l_2} &= 0.056 \quad \Omega \\ X_{m_1} &= 708.8 \quad \Omega \end{aligned}$$

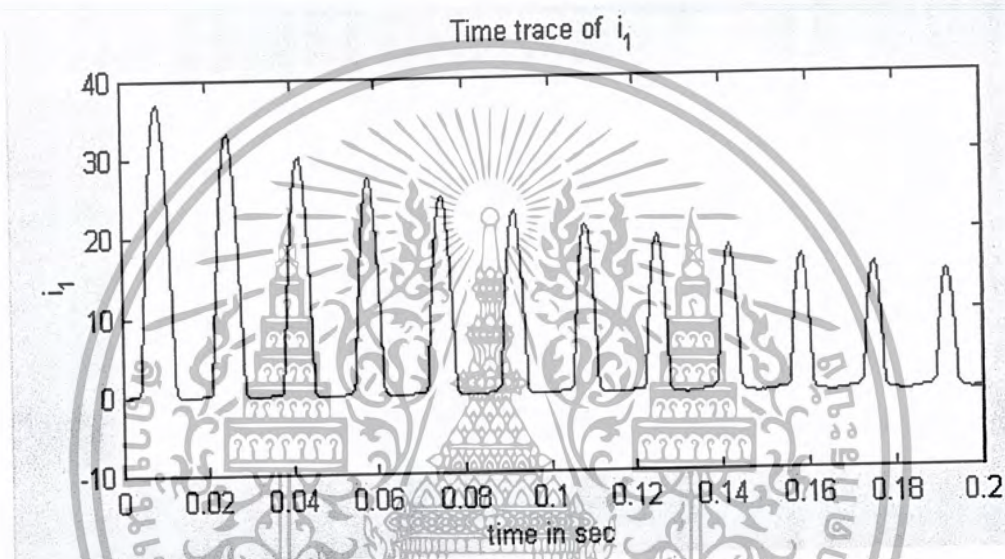
ต่อมาหลังจากได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้กับหม้อแปลงเป็นที่เรียบร้อยแล้วเราจะเริ่มทำการจำลองระบบของโมเดลของหม้อแปลงโดยจะเริ่มป้อนค่าแรงดันเป็น  $v_1 = (120\sqrt{2}) \sin(120\pi t + \theta)$  V ให้กับหม้อแปลงและกำหนดค่ามุมของแรงดันที่ป้อน ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้เริ่มต้นที่มุม  $\theta$  มีค่าเปลี่ยนไปตามที่เรากำหนด จากนั้นเราจะเริ่มทำการจำลองระบบของโมเดลของหม้อแปลงโดยให้ทางด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีนี้เป็นไปตาม ข้างต้นและทำการ พล็อตกราฟความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆเทียบกับ เวลา และทำการวิเคราะห์กราฟ

### 3.7 การวิเคราะห์กราฟของกระแสอินรัช

กระแสอินรัชที่เราจะพิจารณานี้เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่เราทำการ open-circuit ทางด้านทฤษฎี และแรงดันที่ป้อนเข้าถูกกำหนดให้เป็น Sine wave โดยในการเริ่มต้นพิจารณานั้นเราจะกำหนดให้ค่าของแรงดันที่เราป้อนเข้ามีค่ามูฟเฟสเป็นศูนย์ และเมื่อป้อนค่าตัวแปรทั้งหมดเรียบร้อยแล้วจึงเริ่มทำการจำลองระบบของโมเดลของหม้อแปลง จึงจะได้กราฟของกระแสอินรัชเทียบกับเวลา ดังรูป



รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างของผลที่ได้จากการจำลองระบบ

ซึ่งที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นเป็นเพียงการยกตัวอย่างการจำลองระบบของโมเดลของหม้อแปลงเพื่อให้เห็นภาพเท่านั้น ส่วนการทดลองจริงๆ และผลการทดลองนั้นจะนำเสนอในบทต่อไป

### 3.8 ระบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นโดยใช้ Toolbox ในโปรแกรม MATLAB

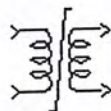
การสร้างโมเดลของหม้อแปลงโดยใช้ Toolbox คือการนำเอาหม้อแปลงที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB มาต่อเป็นวงจรให้เหมือนกับระบบของจริง และทดลองทำการจ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงเพื่อดูผลที่ออกมาโดยไม่จำเป็นต้องทดสอบกับหม้อแปลงของจริง

วิธีการสร้างระบบจำลองของหม้อแปลงของเราจะอ้างอิงค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้ตรงกับในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery และจะต้องเหมาะสมกับระบบจำลองที่มีในโปรแกรม MATLAB ด้วย

### 3.8.1 การใช้และป้อนค่าให้กับระบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆในโปรแกรม MATLAB

#### 3.8.1.1 หม้อแปลง (Transformer)

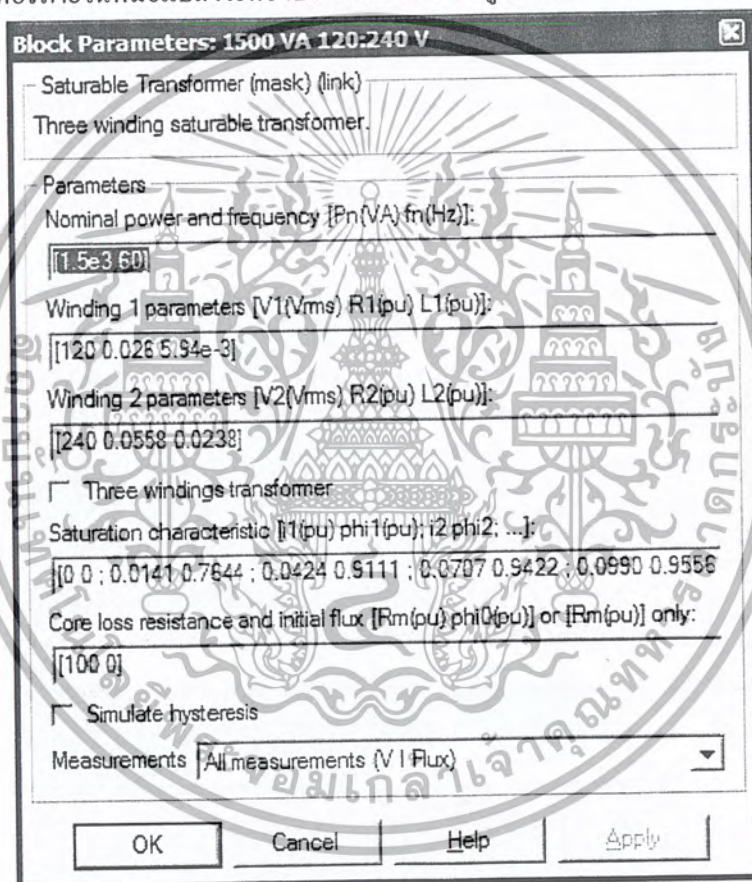
เนื่องจากการทดลองของเราจะศึกษาเกี่ยวกับกระแสอินรัชจึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงที่มีการอิ่มตัว เราจึงเลือกใช้หม้อแปลงแบบ Saturable Transformer ดังนี้



Saturable Transformer

#### รูปที่ 3.9 แสดงโมเดลของหม้อแปลงในโปรแกรม MATLAB

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ภายในหม้อแปลงจะต้องป้อนในตาราง ดังรูปที่ 3.10



#### รูปที่ 3.10 แสดงการป้อนค่าให้กับโมเดลของหม้อแปลง

ดังนั้นเราสามารถป้อนค่าของพารามิเตอร์ให้กับหม้อแปลงได้ดังนี้

ช่องของ Nominal power and frequency เราจะได้ค่าของ Nominal power เป็น 1.5 KVA และ frequency เป็น 20 Hz

ช่องของขดลวด 1 และ 2 จะต้องป้อนค่าของ R และ L เป็น per-unit แต่จากค่าที่เราได้จากในหนังสือยังไม่เป็น per-unit ดังนั้นเราจึงต้องแปลงให้อยู่ในรูปของ per-unit ก่อนดังนี้

$$\text{จาก } R_{\text{base}} = \frac{(V_n)^2}{P_n} = \frac{120^2}{1.5 \times 10^3} = 9.60$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{base} = \frac{R_{base}}{2\pi f_n} = \frac{9.6}{2\pi \times 60} = 0.0255$$

$$\text{จาก } R(\text{pu}) = \frac{R(\Omega)}{R_{base}}, \quad L(\text{pu}) = \frac{L(\text{H})}{L_{base}}$$

$$\therefore R(\text{pu}) = \frac{0.25}{9.60} = 0.026 \text{ p.u.}$$

แต่ยังไม่สามารถหาค่าของ  $L_1$  (pu) ได้ เพราะค่าจากหนังสือบอกมาเป็นค่าของ  $X_{L1}$  ดังนั้นต้องแปลงให้เป็น  $L_1$  ดังนี้

$$\text{จาก } X_{L1} = \omega L_1$$

$$L_1 = \frac{X_{L1}}{\omega} = \frac{0.056}{2\pi \times 60} = 1.485 \times 10^{-4}$$

$$\therefore L_1 (\text{p.u.}) = \frac{1.485 \times 10^{-4}}{0.0255} = 5.82 \times 10^{-3}$$

ทางด้านขดลวด 2 เนื่องจากในหนังสือได้ออกค่าของ  $r'_2$  และ  $X'_{L2}$  ซึ่งเป็นค่าที่ได้ทำการแปลงมาทางด้านขดลวด 1 แล้ว แต่ค่าในบล็อกของหม้อแปลงต้องการให้เราป้อนเป็นค่าของ  $r_2$  และ  $X_{L2}$  ซึ่งอยู่ทางด้านขดลวด 2 ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องแปลงกลับไปทางด้านขดลวด 2 ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จาก } \frac{r'_2}{r_2} &= \frac{a^2}{0.5^2} = \frac{V_1^2}{V_2^2} = \frac{0.5^2}{0.134^2} = 0.536 \\ \frac{X'_{L2}}{X_{L2}} &= \frac{a^2}{0.5^2} = \frac{V_1^2}{V_2^2} = \frac{0.5^2}{0.134^2} = 0.536 \end{aligned}$$

นำค่าของ  $r$  มาทำเป็น per-unit ได้ดังนี้

$$r_2 (\text{p.u.}) = \frac{0.536}{9.6} = 0.05584 \text{ p.u.}$$

หาค่าของ  $L$  (pu) ดังที่ผ่านมาในขดลวด 1 ดังนี้

$$X_{L2} = \frac{X'_{L2}}{a^2} = \frac{0.056}{0.5^2} = 0.224$$

ทำเป็น  $L_2$  จาก  $X_{L2} = \omega L_2$

$$L_2 = \frac{X_{L2}}{\omega} = \frac{0.224}{2\pi \times 60} = 5.94 \times 10^{-4}$$

$$\begin{aligned} \therefore L_2 (\text{p.u.}) &= \frac{5.94 \times 10^{-4}}{0.0255} \\ &= 0.0233 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

ดังนั้นในช่องของขดลวด 1 เราจะป้อนค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

$$V_1 (\text{Vrms}) = 120 \text{ V}, \quad R_1 (\text{p.u.}) = 0.026, \quad L_1 (\text{p.u.}) = 5.82 \times 10^{-3}$$

ช่องของขดลวด 2

$$V_2 (\text{Vrms}) = 240 \text{ V}, \quad R_2 (\text{p.u.}) = 0.05584, \quad L_2 (\text{p.u.}) = 0.0233$$

เนื่องจากโมเดลของเราเป็นหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด ดังนั้นเราจึงไม่จำเป็นต้องป้อนค่าลงไปในช่วงของขดลวด 3

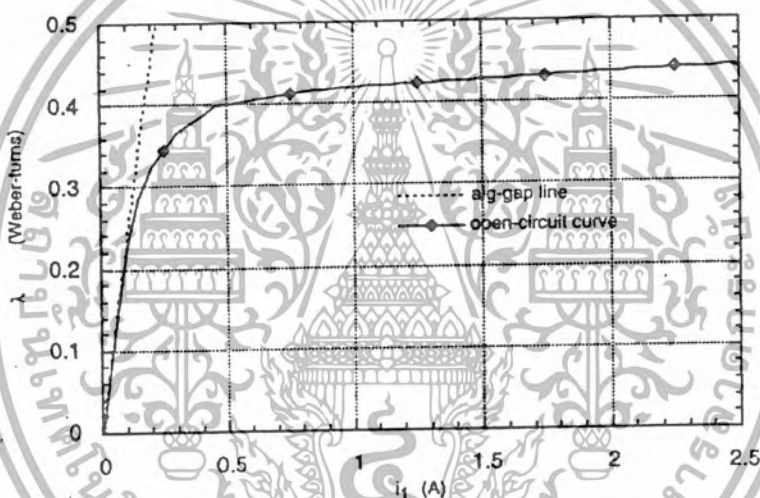
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องของ Saturation characteristic

เนื่องจากค่าที่เราต้องป้อนลงในช่องว่างเป็นค่าของ กระแสและฟลักซ์ที่เป็น per - unit ดังนั้นเรา จึงคิดแปลงค่าจากกราฟของเราออกมาเป็นค่า per - unit จากสูตรดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จาก } I_{\text{base}} &= \frac{P_n \sqrt{2}}{V_1} \\ &= \frac{1.5 \times 10^3 \sqrt{2}}{120} = 17.677 \text{ A} \\ \phi_{\text{base}} &= \frac{V_1 \sqrt{2}}{2\pi f_n} \\ &= \frac{120 \sqrt{2}}{2\pi \times 60} = 0.45 \end{aligned}$$

$$\text{จากสูตร } I_{\text{p.u.}} = \frac{I}{I_{\text{base}}}, \quad \phi_{\text{p.u.}} = \frac{\phi}{\phi_{\text{base}}}$$



รูปที่ 3.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ฟลักซ์ที่เกี่ยวข้อง กับ กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

จากกราฟในรูปที่ 3.11 เราจะทำการเลือกจุดที่จะนำมาคำนวณ 6 จุดเพื่อนำค่าไปใช้ในการทดลอง โดยที่ค่า จุดทั้ง 6 จุดที่ทำการเลือกมาแล้วจะแสดงอยู่ในตารางที่ 3.1

จุดที่	I (A)	$\lambda$ (Webber-turns)
1	0	0
2	0.25	0.3440
3	0.75	0.4100
4	1.25	0.4240
5	1.75	0.4300
6	2.25	0.4365

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าของ I กับ  $\lambda$  จากกราฟ

เมื่อกำหนดค่า  $I_{p.u.}$  จากสูตรข้างต้นโดยใช้ค่าตัวแปรที่มีจะได้ ดังตารางที่ 3.2

จุดที่	$I_{p.u.}$	$\lambda_{p.u.}$
1	0	0
2	0.0141	0.7644
3	0.0424	0.9111
4	0.0707	0.9422
5	0.0990	0.9556
6	0.1273	0.9700

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าของ  $I_{p.u.}$  กับ  $\lambda_{p.u.}$  จากกรคำนวณ

เพราะฉะนั้นเราจึงได้ค่าของ Saturation characteristic ที่จะป้อนในช่องว่าง ดังนี้

[0 0 ; 0.0141 0.7644 ; 0.0424 0.9111 ; 0.0707 0.9422 ; 0.0990 0.9556 ; 0.1273 0.9700]

ช่องของ Core loss resistance and initial flux

เนื่องจากหม้อแปลงจัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งจากการค้นคว้าพบว่าค่า

ประสิทธิภาพของหม้อแปลง (Triplex Transformer Efficient) จะมีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 92-98 เปอร์เซ็นต์ ในที่นี้เราจึงสมมติให้เป็น 98เปอร์เซ็นต์ และหม้อแปลงจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อ ค่าความสูญเสียในขดลวดเท่ากับค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ดังนั้นเราจึงกำหนดให้ค่าของความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าเท่ากับ

1% ของกำลังที่พิกัดซึ่งมีค่าเท่ากับ 15 W ดังนั้นจึงหาค่าของ  $R_c$  จากความสัมพันธ์

$$P = \frac{V^2}{R_c} \quad \text{จะได้เป็น } 15 = \frac{120^2}{R_c} \quad \text{ดังนั้นจะได้ค่าของ } R_c = 960 \quad \Omega \quad \text{จากที่ } R_{base} = 9.6 \quad \Omega$$

ดังนั้นจะได้ค่าของ  $R_{C(p.u.)} = \frac{960}{9.6} = 100 \quad (p.u.)$

ค่าของฟลักซ์ตกค้างที่เหลืออยู่ (initial flux) เราจะให้เป็น 0 เพราะถือว่าไม่มีฟลักซ์ตกค้างอยู่เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

∴ ค่าที่ป้อนในช่องว่างนี้คือ [100 0]

ช่องของ Measurements (อุปกรณ์การวัด)

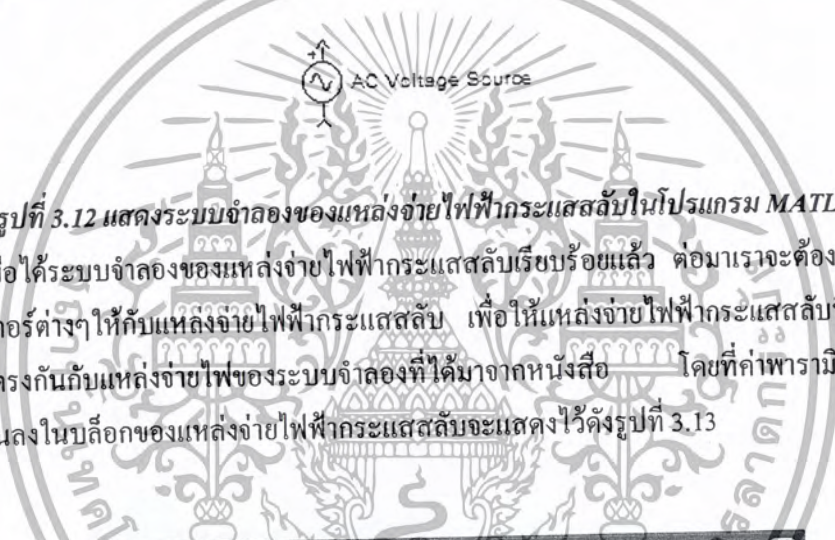
เนื่องจากการทดลองนี้ต้องการทดสอบค่าของกระแส และ แรงดันที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจึงเลือกไปที่

All Measurements (V, I, flux)

เมื่อเราป้อนค่าพารามิเตอร์และเลือกอุปกรณ์การวัดเรียบร้อยแล้ว เราจะได้ระบบจำลองของหม้อแปลงที่มีคุณสมบัติตรงตามระบบจำลองในหนังสือมา 1 ระบบ หลังจากนั้นก็จะมาพิจารณากันต่อไปว่าวงจรของเราต้องการอุปกรณ์ใดมาต่อเพิ่มอีกบ้าง

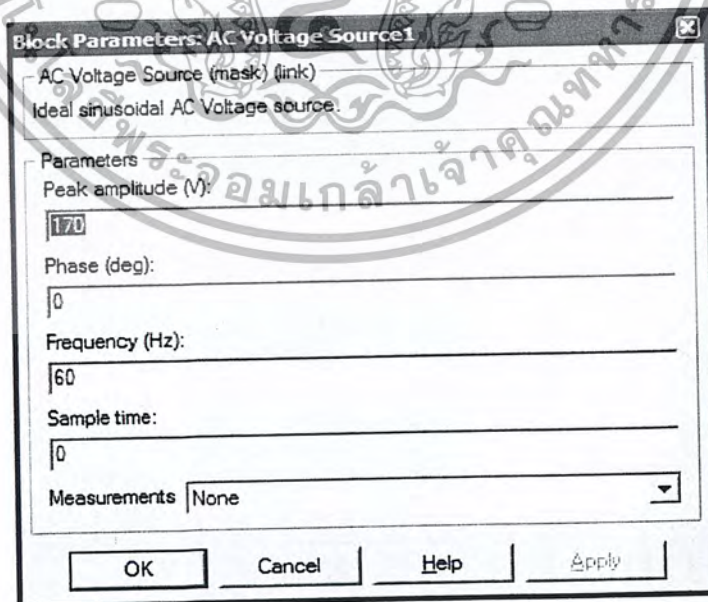
### 3.8.1.2 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( AC Voltage Source )

เนื่องจากหม้อแปลงที่สร้างขึ้นจะใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นเราจึงต้องมีแหล่งจ่ายแรงดันเพื่อป้อนแรงดันที่เราต้องการให้กับหม้อแปลง โดยระบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะมีรูปร่างดังนี้



รูปที่ 3.12 แสดงระบบจำลองของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับในโปรแกรม MATLAB

เมื่อได้ระบบจำลองของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเรียบร้อยแล้ว ต่อมาเราจะต้องทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อให้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่เราสร้างขึ้นมีคุณสมบัติตรงกันกับแหล่งจ่ายไฟของระบบจำลองที่ได้มาจากหนังสือ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่จะต้องป้อนลงในบล็อกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะแสดงไว้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงการป้อนค่าให้กับโมเดลของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องของ Peak amplitude (V)	ป้อนแรงดันเป็น	170
ช่องของ Phase (deg)	ป้อนเฟสเป็น	0
ช่องของ Frequency (Hz)	ป้อนความถี่เป็น	60
ช่องของ Sample time	ป้อน Sample time เป็น	0
ช่องของ Measurements	เลือกเป็น	None

### 3.8.1.3 กราวด์ ( Ground )

เนื่องจากขาทั้ง 2 ข้างทางด้านอินพุทของหม้อแปลง จำเป็นต้องต่อลงกราวด์ ดังนั้นเราจึงนำระบบจำลองของกราวด์ มาต่อเข้าไปเพื่อให้ครบวงจร โดยที่ระบบจำลองของกราวด์ที่เราจะนำมาใช้งาน มีรูปร่างดังนี้

รูปที่ 3.14 แสดงระบบจำลองของกราวด์ในโปรแกรม MATLAB

### 3.8.1.4 เบรกเกอร์ ( Breaker )

การที่เรานำเบรกเกอร์มาใช้ในวงจรก็เพราะเราต้องการเลือกมุมตัดสวิทช์ของแรงดันให้กับวงจร เพื่อใช้ในการทดลองหาค่าของมุมของแรงดันให้เกิดค่าของกระแสอินรัช น้อยที่สุด โดยที่เบรกเกอร์ที่เราจะนำมาใช้งานจะอยู่ใน Toolbox ของโปรแกรม MATLAB มีรูปร่างดังนี้



รูปที่ 3.15 แสดงระบบจำลองของเบรกเกอร์ในโปรแกรม MATLAB

และค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่จะทำการป้อนให้กับระบบจำลองของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ จะแสดงไว้ดังรูปที่

3.16

**Block Parameters: Breaker close after 2 cycles**

Breaker (mask) (link)

Implements a circuit breaker with internal resistance  $R_{on}$  ( $R_{on}$ , required by model, cannot be set to zero).  
First input (1) and output (2) are the two breaker terminals. 2nd input (c) is a Simulink logical signal controlling the breaker. When 2nd input becomes greater than zero the breaker closes instantaneously. When 2nd input becomes zero, the breaker opens at the next current zero-crossing.

Parameters

Breaker resistance  $R_{on}$  (Ohm):  
10e-3

Initial state ( 0 for 'open' , 1 for 'closed' ):  
0

Snubber resistance  $R_s$  (Ohms):  
100e6

Snubber capacitance  $C_s$  (F):  
inf

Switching times (s):  
[0/60]

Sample time of the internal timer  $T_s$ (s):  
0.01

External control of switching times

Measurements | None

OK Cancel Help Apply

รูปที่ 3.16 แสดงการป้อนค่าให้กับระบบจำลองของเบรกเกอร์

ที่ช่องของ Breaker resistance $R_{on}$ (ohm)	ป้อนเป็น	10e-3
ที่ช่องของ Initial state	ป้อนเป็น	0
ที่ช่องของ Snubber resistance $R_s$ (ohms)	ป้อนเป็น	100e 6
ที่ช่องของ Snubber capacitance $C_s$ (F)	ป้อนเป็น	inf
ที่ช่องของ Switching time (S)	ค่าของ Switching time	จะเป็นตัวกำหนดถึงมุมของการ

สับแรงดันให้กับแหล่งจ่าย โดยมีวิธีคำนวณมุมที่จะป้อนให้กับแหล่งจ่าย ดังนี้

เนื่องจากเราใช้ความถี่ที่ 60 Hz ดังนั้น 1 ลูกคลื่นของสัญญาณแรงดัน Sine wave จะใช้เวลาเดินทางทั้งหมด  $1/60$  วินาที แต่เราต้องการเป็นค่าของมุมจึงมาคูณที่ว่า 1 ลูกคลื่น คือมุมทั้งหมด  $360^\circ$  และสมมติเราต้องการมุมที่ป้อนให้กับวงจรเป็นเท่าไร ก็นำค่าของมุมที่เราต้องการหารด้วย  $360^\circ$  แล้วนำไปคูณกับ  $1/60$  เพื่อหาเป็นค่าของเวลาที่จะให้เบรกเกอร์ สับสวิทช์ทำงาน เช่น ถ้าเราต้องการป้อนมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเป็น  $90^\circ$  ก็ทำได้โดย นำ 90 หารด้วย 360 จะได้เท่ากับ 0.25 จากนั้นนำไปทำเป็นเวลาโดยคูณกับ 1/60 จะได้เป็น 0.25/60 วินาทีซึ่งจะเป็นค่าที่นำไปป้อนในช่องของ Switching time (S) เพื่อให้เบรกเกอร์เริ่มทำงาน ที่มุม  $90^\circ$

ที่ช่องของ Simple time of internal timer Ts(S)	ป้อนค่าเป็น	0.01
ที่ช่องของ Measurements	เลือกเป็น	None

### 3.8.1.5 มัลติมิเตอร์ (Multimeter)

จากที่บล็อกของหม้อแปลงเราได้เลือกค่าของ มัลติมิเตอร์ เป็น All measurements ดังนั้นเราจึงต้องมี มัลติมิเตอร์ ขึ้นมาเพื่อใช้วัดค่าของกระแส และ แรงดัน ที่เกิดขึ้น โดยที่ระบบจำลองของมัลติมิเตอร์ที่เราจะนำมาใช้งานมีรูปร่างดังนี้



รูปที่ 3.17 แสดงระบบจำลองของมัลติมิเตอร์ในโปรแกรม MATLAB

### 3.8.1.6 สโคป (Scope)

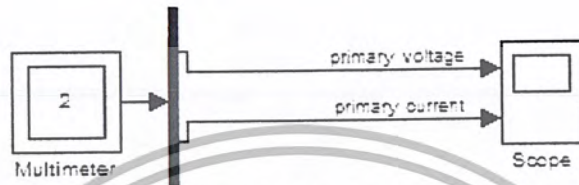
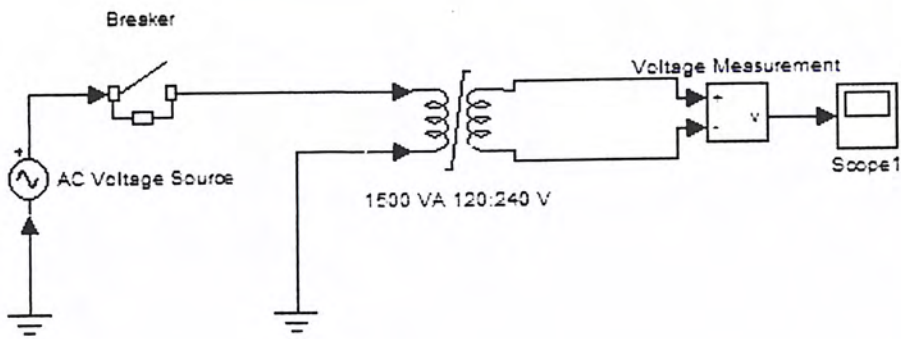
เมื่อเรามีเครื่องมือวัด (Multimeter) แล้วเราจะเป็นต้องมีสโคปเพื่อแสดงกราฟของพารามิเตอร์ต่างๆที่เราวัดได้ เทียบกับเวลาโดยนำมาต่อเข้ากับ เครื่องมือวัดโดยตรง โดย สโคป มีรูปร่าง ดังนี้



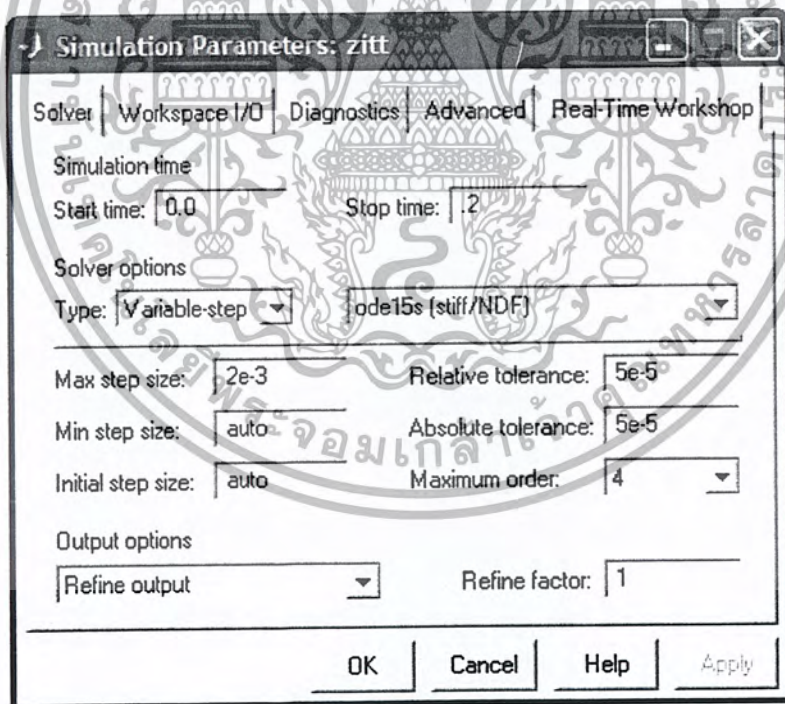
รูปที่ 3.18 แสดงระบบจำลองของสโคปในโปรแกรม MATLAB

## 3.9 แบบจำลองของหม้อแปลงที่สร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB

เมื่อเรารู้จักกับอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องการใช้ในการสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงเรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นเราจะทำการสร้างระบบจำลองของหม้อแปลง โดยการนำอุปกรณ์ที่มีทั้งหมดมาต่อรวมกันซึ่งจะได้เป็นระบบจำลองของหม้อแปลงที่เราต้องการเพื่อนำมาใช้ในการจำลองระบบดังนี้



รูปที่ 3.19 แสดงแบบจำลองระบบของหม้อแปลงที่สร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งก่อนที่เราจะสามารถจำลองระบบของโมเดลของหม้อแปลงอินนี้เพื่อคุณผลนั้น เราจำเป็นต้องตั้งค่าการจำลองระบบให้กับวงจรก่อน โดยเลือกไปที่ Simulation Parameters แล้วป้อนค่าดังนี้



รูปที่ 3.20 แสดงการป้อนค่าของ Simulation Parameters

- |                       |  |
|-----------------------|--|
| ที่ช่องของ Start time | ป้อนเป็น 0.0   |
| ที่ช่องของ Stop time  | ป้อนเป็น 0.2   |
| ที่ช่องของ Type       | ป้อนเป็น Variable-step ใช้วิธีของ ode15s (stiff/NDF) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ตั้งของ Max step size	ป้อนเป็น 2e-3
ที่ตั้งของ Min step size	ป้อนเป็น Auto
ที่ตั้งของ initial step size	ป้อนเป็น Auto
ที่ตั้งของ Relative tolerance	ป้อนเป็น 5e-5
ที่ตั้งของ Absolute tolerance	ป้อนเป็น 5e-5
ที่ตั้งของ Maximum order	ป้อนเป็น 4
ที่ตั้งของ Output option	ป้อนเป็น Refine output
ที่ตั้งของ Refine factor	ป้อนเป็น 1

เมื่อป้อนค่าของ Simulate Parameters เรียบร้อยแล้ว ตอนนี้ระบบจำลองของหม้อแปลงของเราที่พร้อมที่จะนำไปใช้งานได้ โดยเราจะเปลี่ยนแปลงค่าแค่เฉพาะที่บล็อกของ เซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อกำหนดค่าของมุมให้กับแรงดันป้อนเข้าเท่านั้น โดยผลของการจำลองระบบคือกราฟของกระแส และแรงดัน นั้น สามารถดูได้ที่ ระบบจำลองของสโคป ซึ่งผลการทดลองของการจำลองระบบของหม้อแปลง ทั้งจากระบบจำลองของหม้อแปลงที่ได้มาจากหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery และจากระบบจำลองของหม้อแปลงที่เราสร้างขึ้นมาเองโดยใช้โปรแกรม จะนำมาแสดงและเปรียบเทียบผลให้เห็นในบทถัดไป



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

จากบทที่ผ่านมาหลังจากเราได้ออกแบบระบบจำลองของหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรม MATLAB รวม ถึงระบบจำลองของหม้อแปลงที่ได้มาจากหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery ต่อจากนั้นในบทนี้เราก็จะทำการจำลองระบบเพื่อวิเคราะห์ผลของการจำลองระบบจากทั้ง 2 วิธี โดยเราจะวิเคราะห์ที่ค่าของแรงดันค่าเดียวกัน โดยจะเปลี่ยนค่าของมุมในการสับสวิทช์ไปเรื่อยๆ โดยในการทดลองของเราครั้งนี้จะทำการป้อนค่ามุมของแรงดันทั้งหมด 12 มุม ดังนี้

#### 4.1 มุมของแรงดัน(องศา) ที่ใช้ในการทดสอบ

- |                  |                  |                  |
|------------------|------------------|------------------|
| 1. มุม 0 องศา    | 2. มุม 30 องศา   | 3. มุม 45 องศา   |
| 4. มุม 60 องศา   | 5. มุม 90 องศา   | 6. มุม 120 องศา  |
| 7. มุม 150 องศา  | 8. มุม 180 องศา  | 9. มุม 225 องศา  |
| 10. มุม 270 องศา | 11. มุม 315 องศา | 12. มุม 360 องศา |

#### 4.2 มุมของแรงดันที่ป้อนให้กับแหล่งจ่ายแรงดันของทั้ง 2 ระบบ

โดยที่การป้อนมุมให้กับแบบจำลองทั้ง 2 แบบของเรานั้นจะแตกต่างกัน โดยที่ระบบจำลองของหม้อแปลงที่ได้มาจากหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery จะป้อนเป็นเรเดียน ซึ่งเมื่อทำการแปลงมุมจากองศาเป็นเรเดียนแล้วจะได้ทั้ง 12 มุม ดังนี้

##### 4.2.1 มุมของแรงดัน (เรเดียน) ที่ป้อนให้กับระบบจำลองที่ได้มาจากหนังสือ

- |                                 |                                 |                                |
|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1. มุม $0 \cdot \pi$ เรเดียน    | 2. มุม $\pi/6$ เรเดียน          | 3. มุม $\pi/4$ เรเดียน         |
| 4. มุม $\pi/3$ เรเดียน          | 5. มุม $\pi/2$ เรเดียน          | 6. มุม $2 \cdot \pi/3$ เรเดียน |
| 7. มุม $5 \cdot \pi/6$ เรเดียน  | 8. มุม $\pi$ เรเดียน            | 9. มุม $5 \cdot \pi/4$ เรเดียน |
| 10. มุม $3 \cdot \pi/2$ เรเดียน | 11. มุม $7 \cdot \pi/4$ เรเดียน | 12. มุม $2 \cdot \pi$ เรเดียน  |

โดยที่มุมที่ป้อนให้กับระบบจำลองของหม้อแปลงที่ได้มาจากหนังสือนี้จะถือว่าเป็นมุมสับสวิทช์เลย

##### 4.2.2 มุมของแรงดัน(องศา) ที่ควบคุมโดยเซอร์กิตเบรกเกอร์ป้อนเพื่อป้อนให้กับระบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB

###### 4.2.2.1 วิธีคำนวณหาค่าเวลาที่สั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงาน

ส่วนระบบจำลองของหม้อแปลงที่สร้างขึ้นมาใช้โปรแกรม MATLAB จะทำการป้อนมุมให้กับแหล่งจ่ายเป็น 0 องศา ตลอดแต่จะเลือกมุมที่ใช้โดยการสับสวิทช์ของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยที่การเลือกมุมสับสวิทช์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ มีหลักดังที่กล่าวไว้ในบทที่แล้วคือเนื่องจากเราใช้ความถี่ที่ 60Hz ดังนั้น 1 ลูกคลื่นของสัญญาณแรงดัน Sine wave จะใช้เวลาเดินทางทั้งหมด  $1/60$  วินาที แต่เราต้องการเป็นค่าของมุมจึงมาคูณที่ว่า 1 ลูกคลื่น คือมุมทั้งหมด  $360^\circ$  และสมมติเราต้องการมุมที่ป้อนให้กับวงจรเป็นมุมเท่าไร ก็นำค่าของมุมที่เราต้องการหารด้วย  $360^\circ$  แล้วนำไปคูณกับ  $1/60$  เพื่อหาเป็นค่าของเวลาที่จะให้

เบรกเกอร์ สับสวิทช์ทำงาน เช่น ถ้าเราต้องการป้อนมุมแรงดันเป็น  $90^\circ$  ก็ทำได้โดย นำ 90 หารด้วย 360 จะได้เท่ากับ 0.25 จากนั้นนำไปทำเป็นเวลาโดยคูณกับ  $1/60$  จะได้เป็น  $0.25/60$  ซึ่งจะเป็นค่าที่นำไปป้อนในช่องของ Switching time (S) เพื่อให้เบรกเกอร์เริ่มทำงาน ที่มุม  $90^\circ$  ดังนั้นเมื่อเราต้องการมุมที่ใช้ในการสับสวิทช์ทั้งหมด 12 มุม ข้างต้นเราก็สามารถนำค่าของมุมข้างต้นมาคำนวณโดยใช้วิธีดังที่ยกตัวอย่างเพื่อหาค่าของเวลาที่จะป้อนเพื่อให้ เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการสับสวิทช์ตามค่าของมุมของแรงดันที่ต้องการ โดยเมื่อคำนวณเรียบร้อยแล้วเราจะได้อ่านค่าของมุมที่ป้อนให้กับแหล่งจ่ายแรงดันของระบบจำลองของหม้อแปลงทั้ง 2 ระบบ และ ค่าของเวลาที่จะป้อนให้กับ เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ลำดับที่	มุมที่ใช้ (องศา)	มุมที่ใช้ (เรเดียน)	ค่าที่ป้อนให้เบรกเกอร์ (วินาที)
1	0	$0 * \pi$	0/60
2	30	$\pi/6$	0.084/60
3	45	$\pi/4$	0.125/60
4	60	$\pi/3$	0.167/60
5	90	$\pi/2$	0.250/60
6	120	$2 * \pi/3$	0.333/60
7	150	$5 * \pi/6$	0.417/60
8	180	$\pi$	0.500/60
9	225	$5 * \pi/4$	0.625/60
10	270	$3 * \pi/2$	0.750/60
11	315	$7 * \pi/4$	0.875/60
12	360	$2 * \pi$	1/60

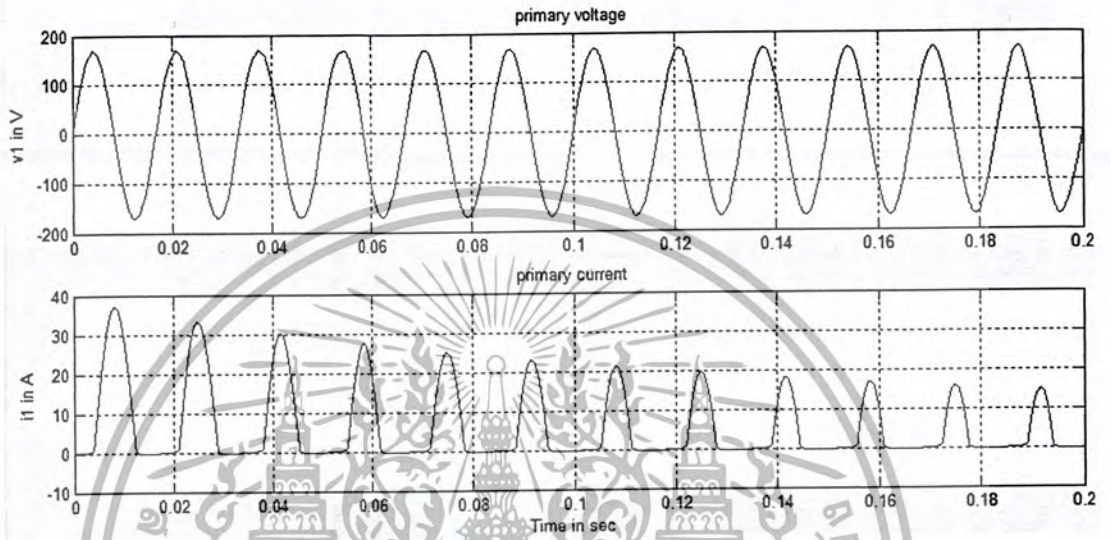
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่จะป้อนให้กับระบบจำลองของหม้อแปลงทั้ง 2 แบบ

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่จะนำไปป้อนให้กับระบบจำลองของหม้อแปลงที่สร้างขึ้นมาแล้ว หลังจากนั้นจึงจะนำค่าของพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณในช่องขวาสุดมาทำการทดลองป้อนให้กับ เซอร์กิตเบรกเกอร์ทีละค่า เพื่อควบคุมมุมของแรงดันที่จะจ่ายให้กับหม้อแปลงโดยแหล่งจ่ายแรงดันของหม้อแปลงเพื่อทำการวิเคราะห์ถึงขนาดของกระแสที่ได้จากกราฟ เพื่อคว่าที่มุมของแรงดันมุมใดมีผลให้เกิดขนาดของกระแสอินรัชน้อยที่สุด

#### 4.3 กราฟแสดงผลของค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นจากการจำลองระบบ

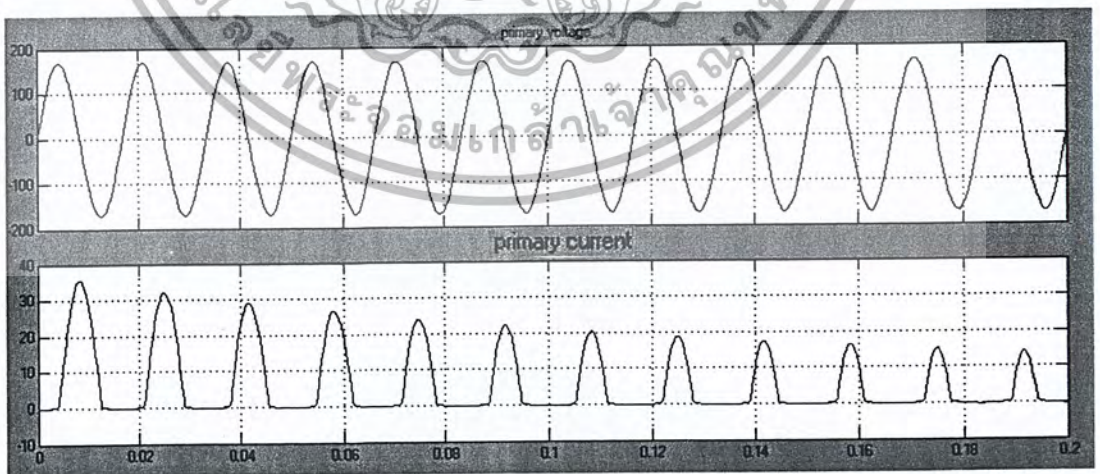
##### 1. ที่มุม 0 องศา

ผลที่ได้จากการนำเอาระบบจำลองของหม้อแปลงในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery มาทดลอง



รูปที่ 4.1 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 0 องศา

ผลของการจำลองระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB

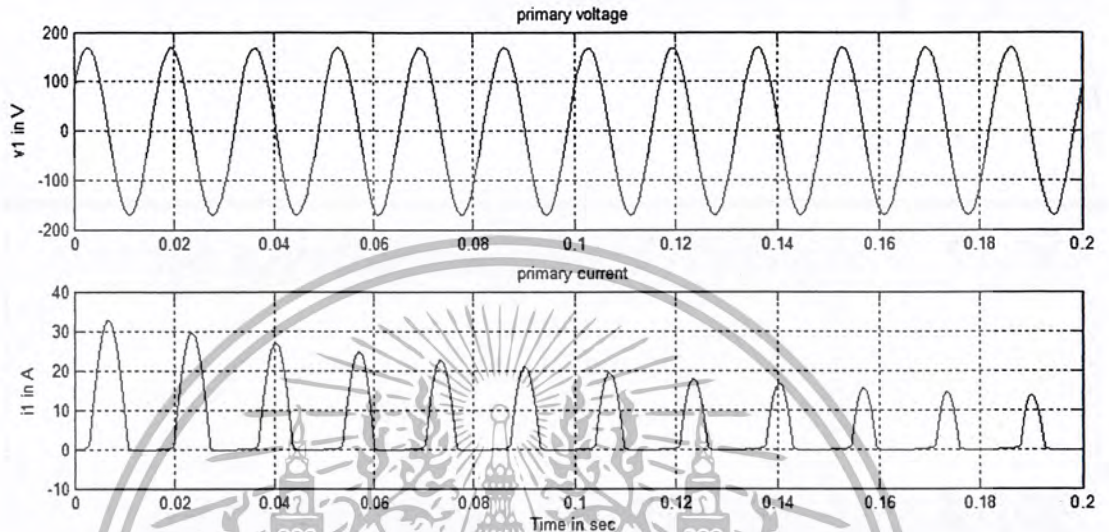


รูปที่ 4.2 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

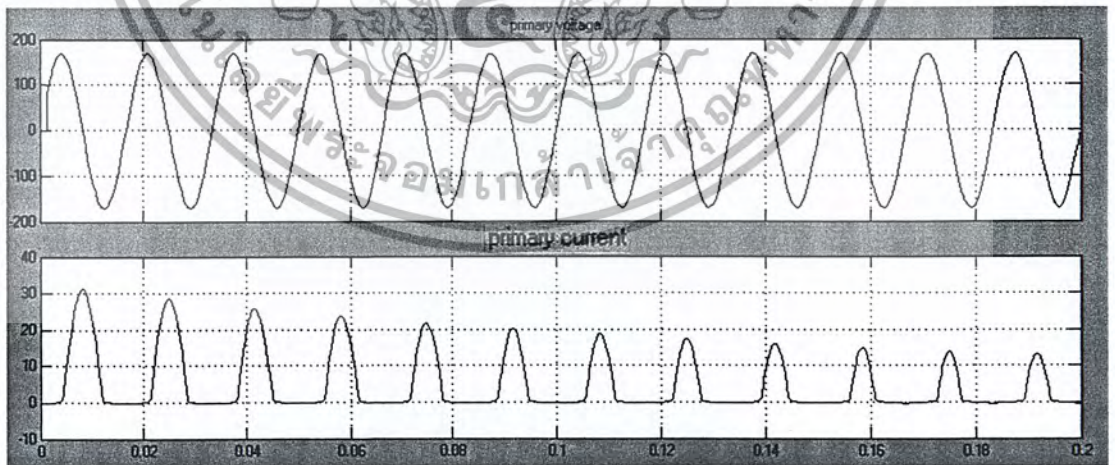
## 2. ที่มุม 30 องศา

ผลที่ได้จากการนำเอาระบบจำลองของหม้อแปลงในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery มาทดลอง



รูปที่ 4.3 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 30 องศา

ผลของการจำลองระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB

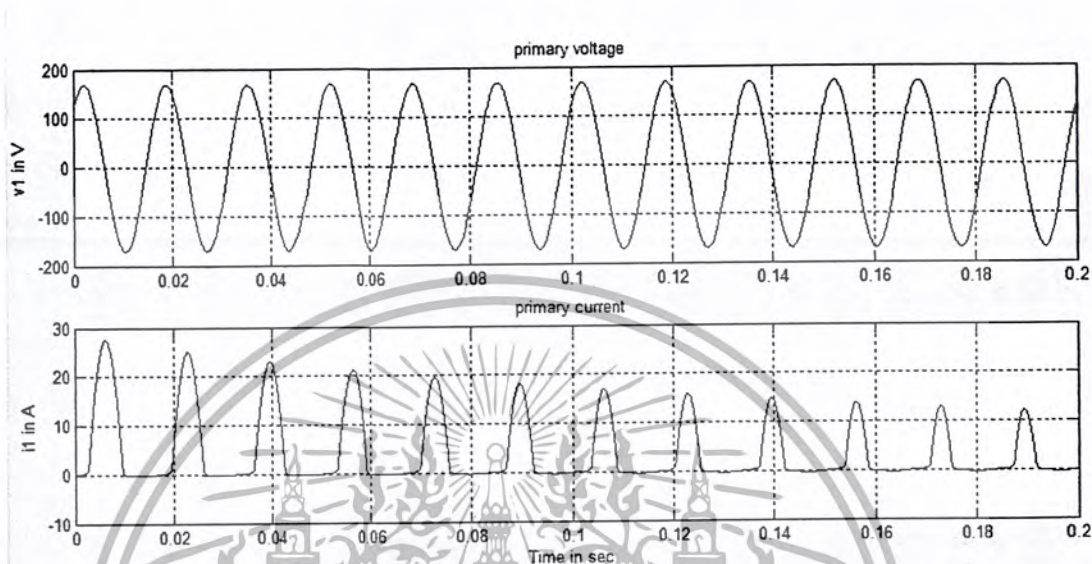


รูปที่ 4.4 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

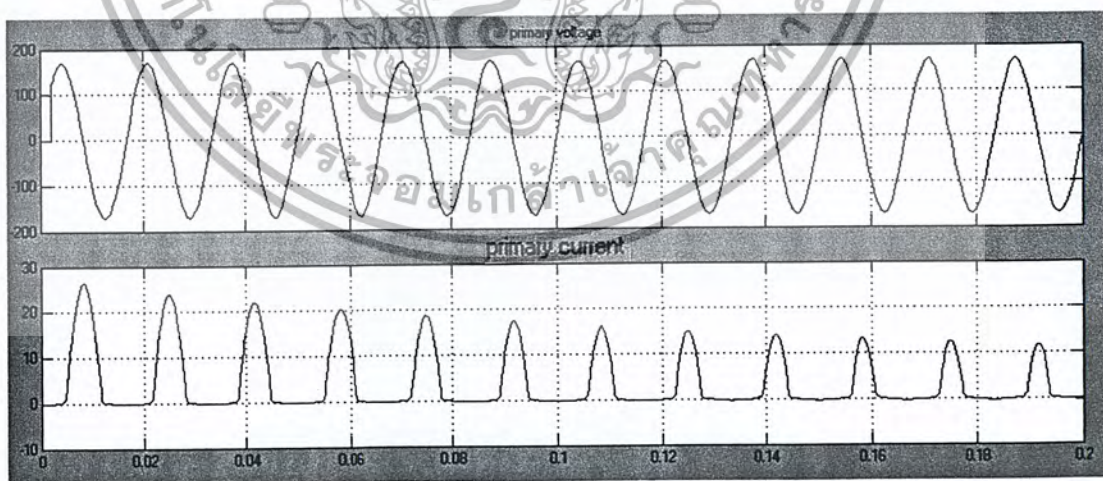
### 3. ที่มุม 45 องศา

ผลที่ได้จากการนำเอาระบบจำลองของหม้อแปลงในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery มาทดลอง



รูปที่ 4.5 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 45 องศา

ผลของการจำลองระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB

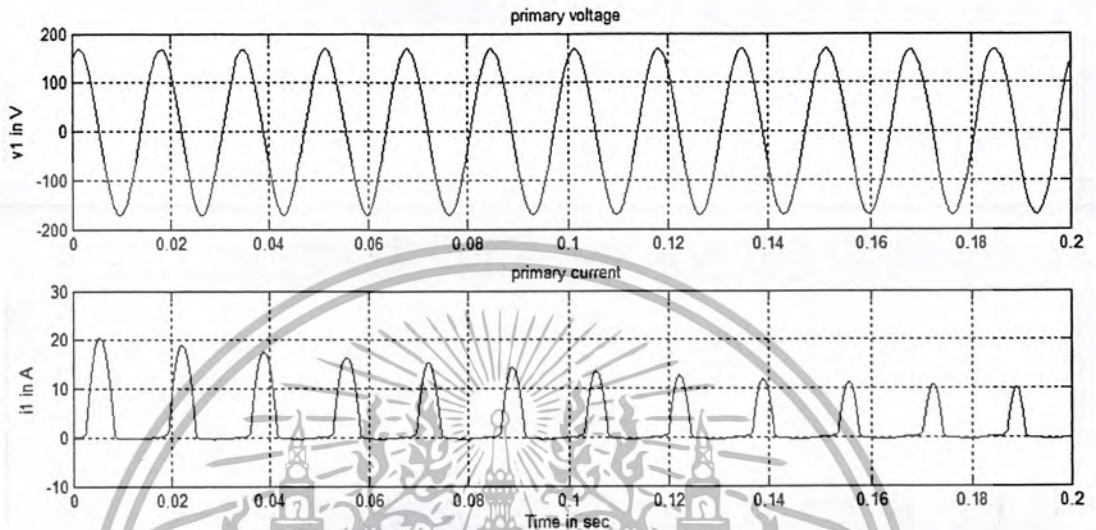


รูปที่ 4.6 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

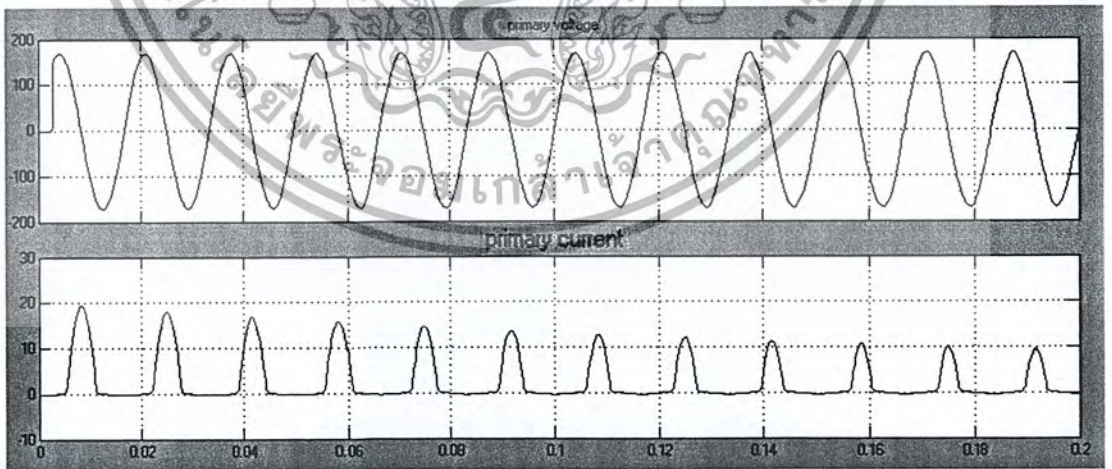
#### 4. ที่มุม 60 องศา

ผลที่ได้จากการนำเอาระบบจำลองของหม้อแปลงในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery มาทดลอง



รูปที่ 4.7 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 60 องศา

ผลของการจำลองระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB

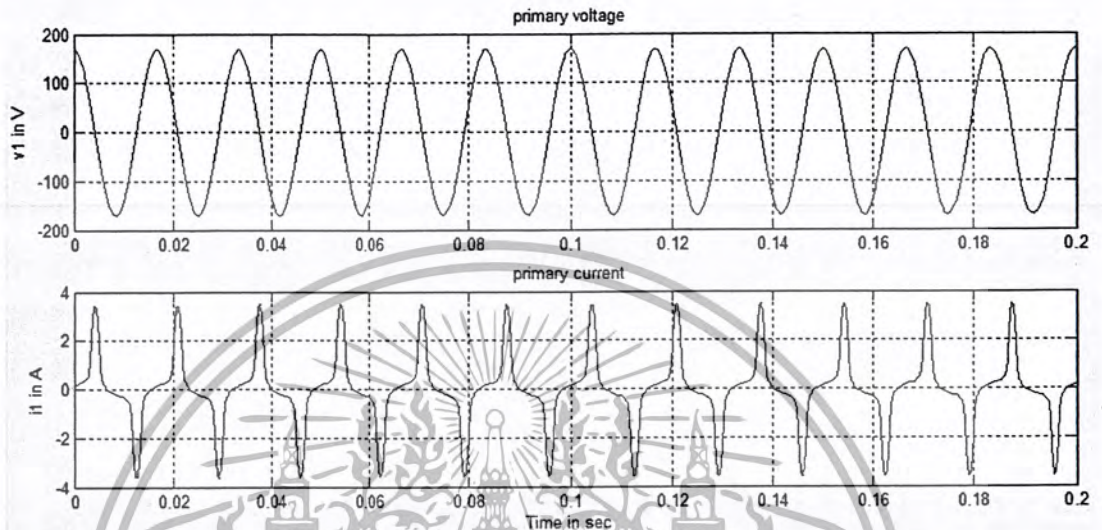


รูปที่ 4.8 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

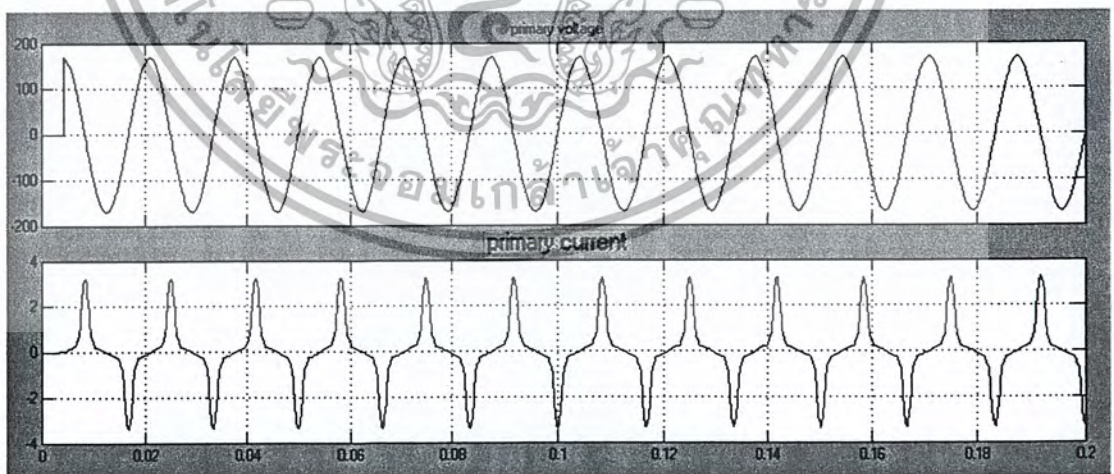
## 5. ทิมม 90 องศา

ผลที่ได้จากการนำเอาระบบจำลองของหม้อแปลงในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery มาทดลอง



รูปที่ 4.9 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 90 องศา

ผลของการจำลองระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB

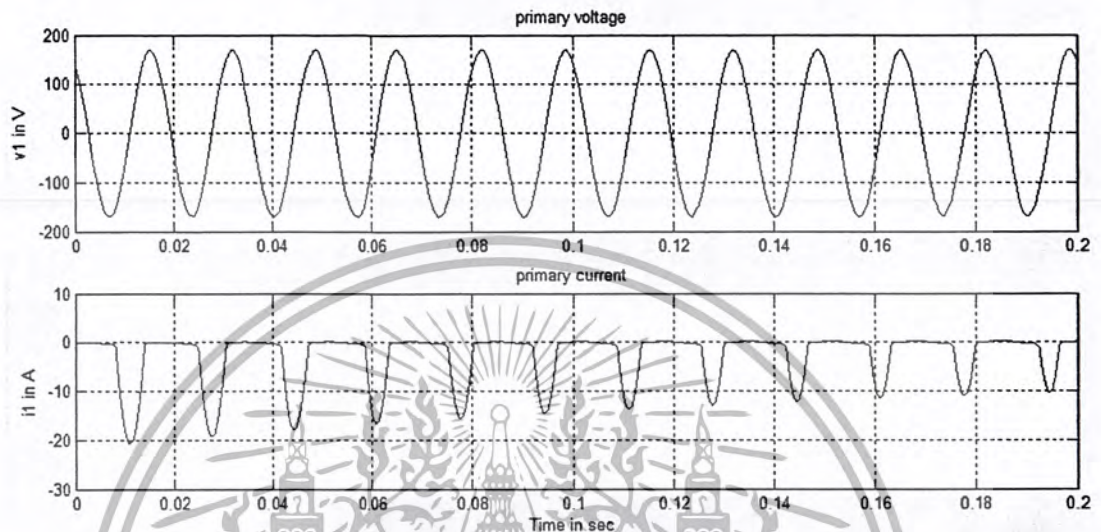


รูปที่ 4.10 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

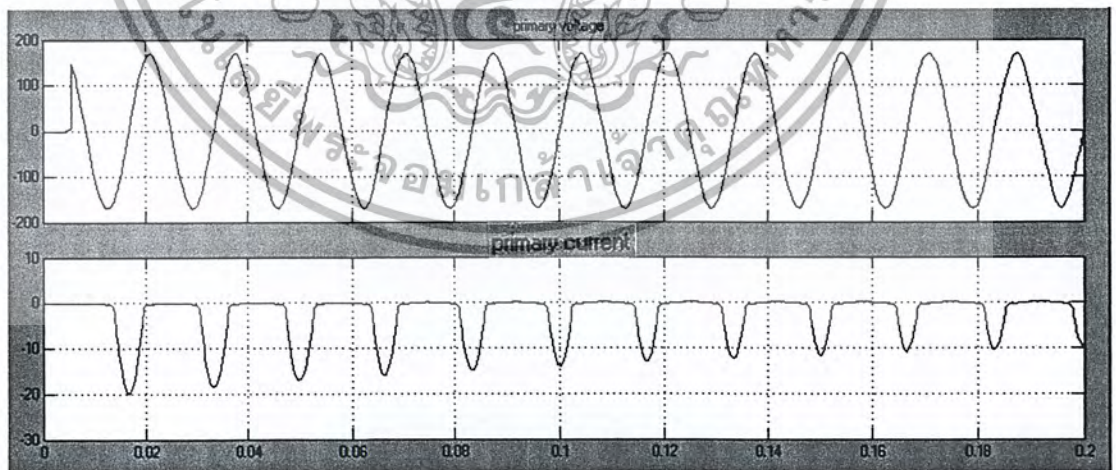
## 6. ที่มุม 120 องศา

ผลที่ได้จากการนำเอาระบบจำลองของหม้อแปลงในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery มาทดลอง



รูปที่ 4.11 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 120 องศา

ผลของการจำลองระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB

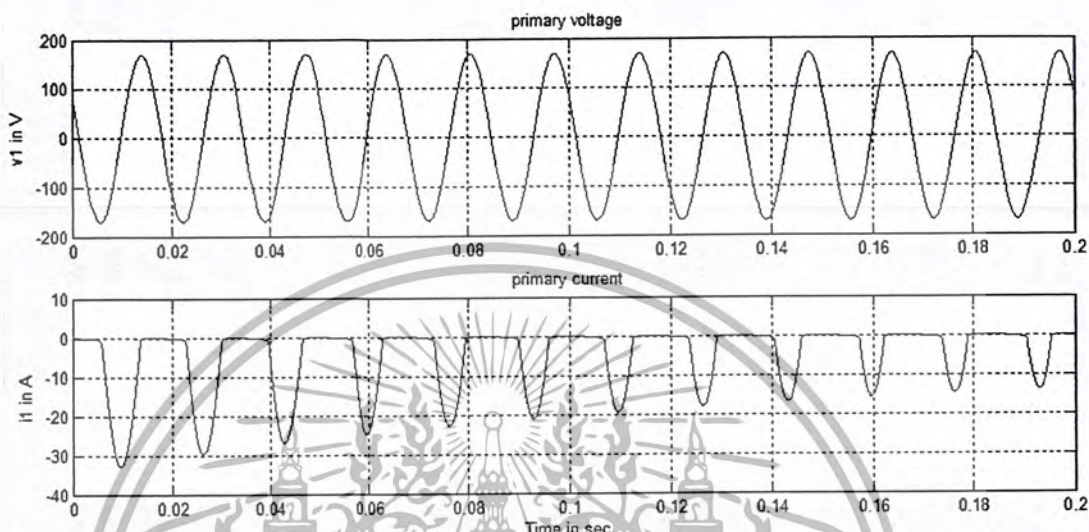


รูปที่ 4.12 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 120 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

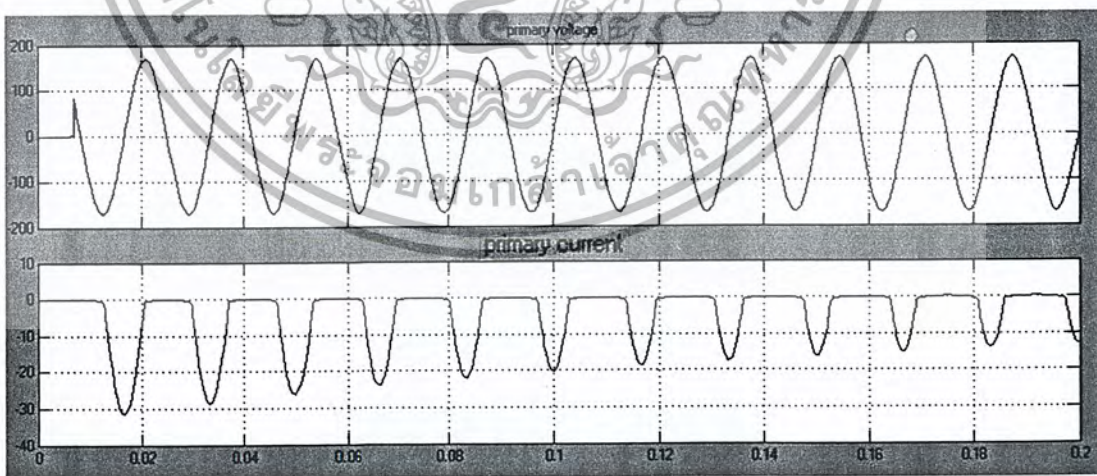
## 7. ทิ่มม 150 องศา

ผลที่ได้จากการนำเอาระบบจำลองของหม้อแปลงในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery มาทดลอง



รูปที่ 4.13 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 150 องศา

ผลของการจำลองระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB

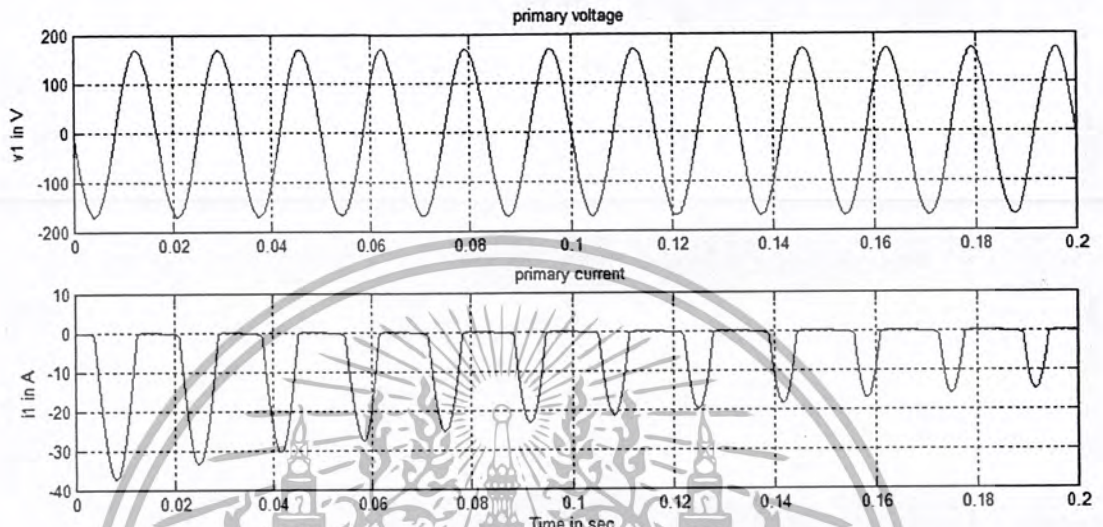


รูปที่ 4.14 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 150 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

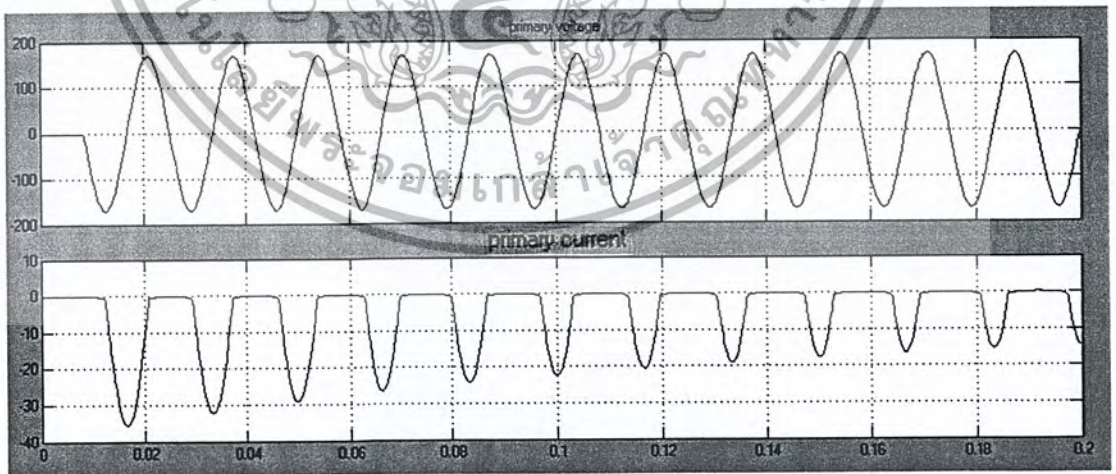
## 8. ที่มุม 180 องศา

ผลที่ได้จากการนำเอาระบบจำลองของหม้อแปลงในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery มาทดลอง



รูปที่ 4.15 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 180 องศา

ผลของการจำลองระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB

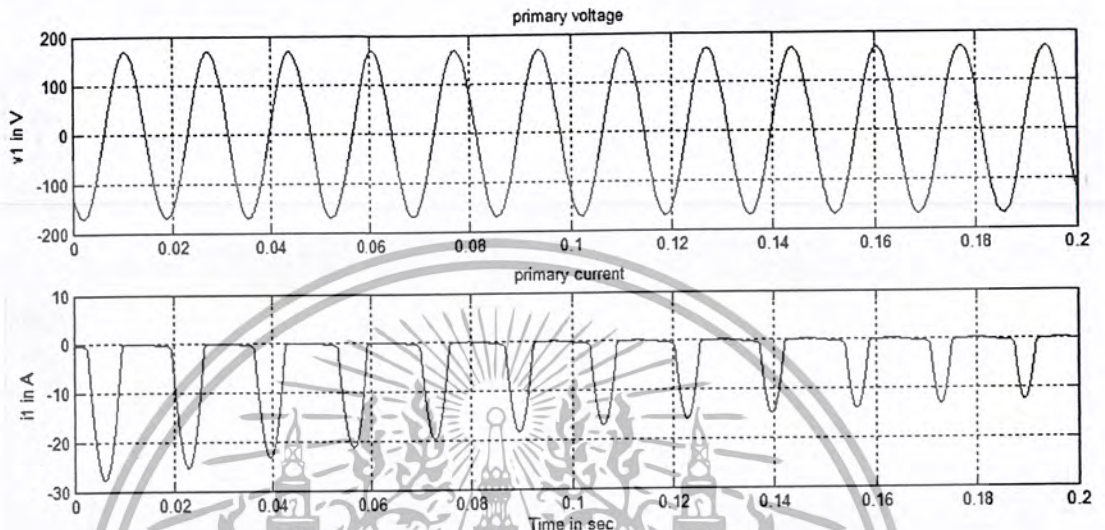


รูปที่ 4.16 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

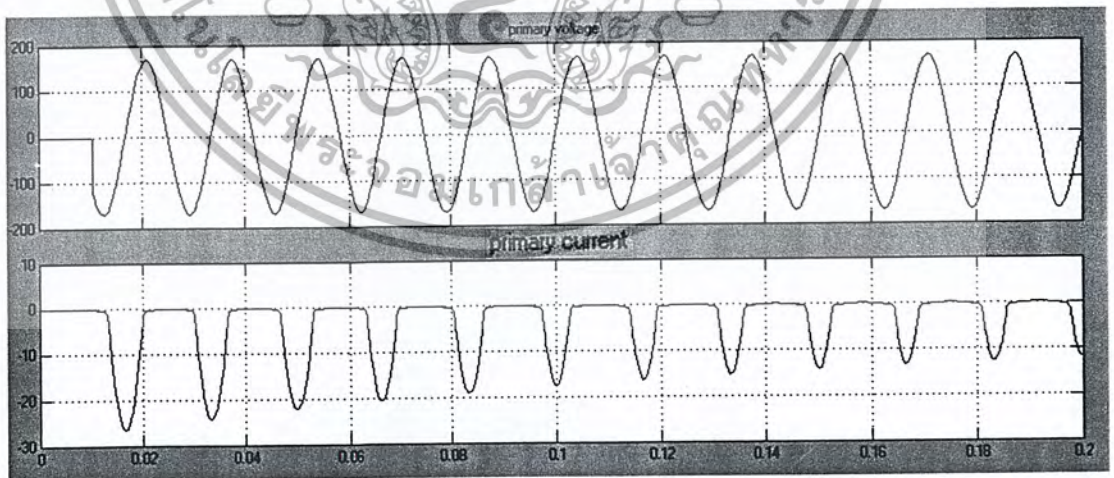
## 9. ที่มุม 225 องศา

ผลที่ได้จากการนำเอาระบบจำลองของหม้อแปลงในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery มาทดลอง



รูปที่ 4.17 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 225 องศา

ผลของการจำลองระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB

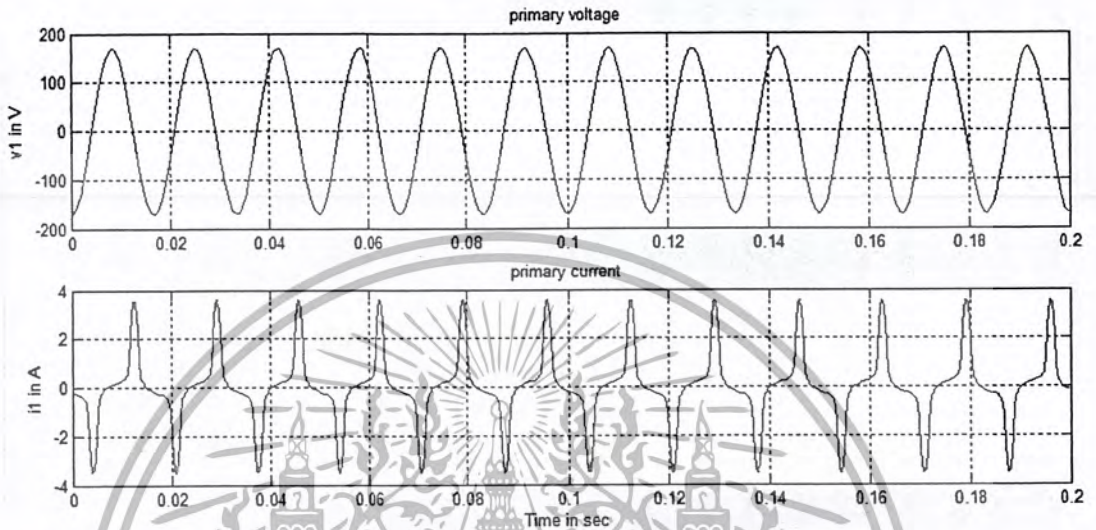


รูปที่ 4.18 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 225 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

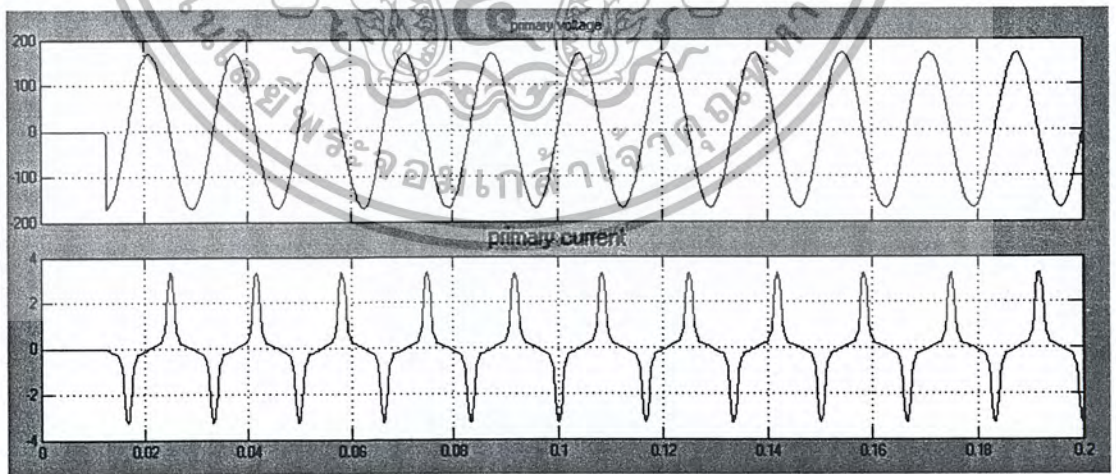
## 10. ทิมม 270 องศา

ผลที่ได้จากการนำเอาระบบจำลองของหม้อแปลงในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery มาทดลอง



รูปที่ 4.19 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 270 องศา

ผลของการจำลองระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB

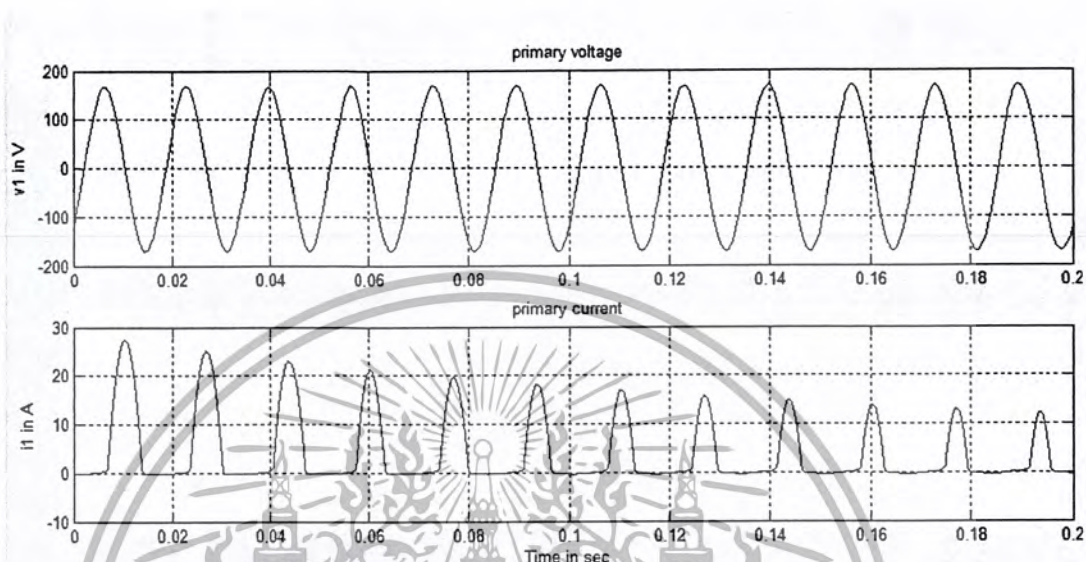


รูปที่ 4.20 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 270 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 11. ที่มุม 315 องศา

ผลที่ได้จากการนำเอาระบบจำลองของหม้อแปลงในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery มาทดลอง



รูปที่ 4.21 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 315 องศา

ผลของการจำลองระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB

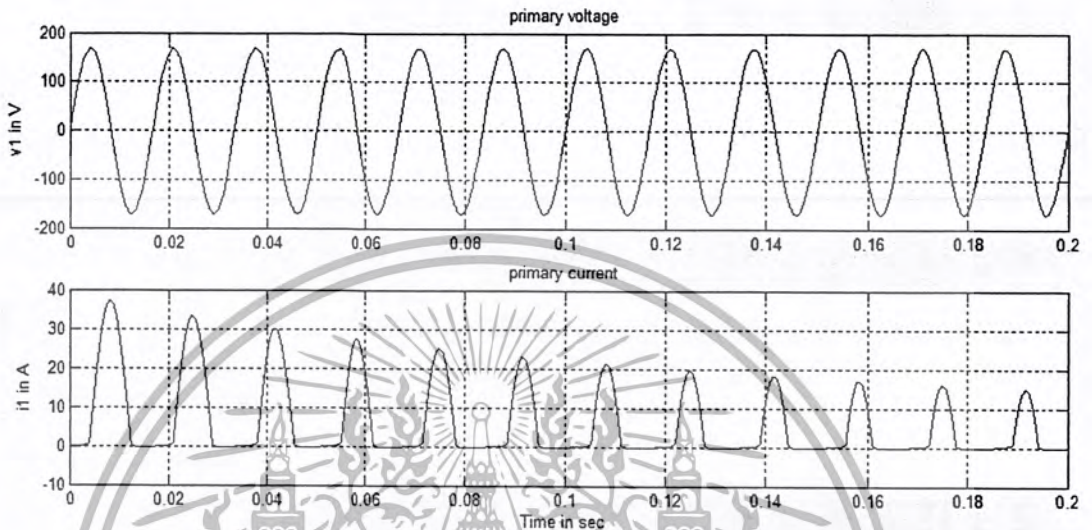


รูปที่ 4.22 แสดงค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุม 315 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 12. ที่มุม 360 องศา

ผลที่ได้จากการนำเอาระบบจำลองของหม้อแปลงในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery มาทดลอง



รูปที่ 4.23 แสดงค่ากระแสอินรัลที่เกิดขึ้นที่มุม 360 องศา

ผลของการจำลองระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB



รูปที่ 4.24 แสดงค่ากระแสอินรัลที่เกิดขึ้นที่มุม 360 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

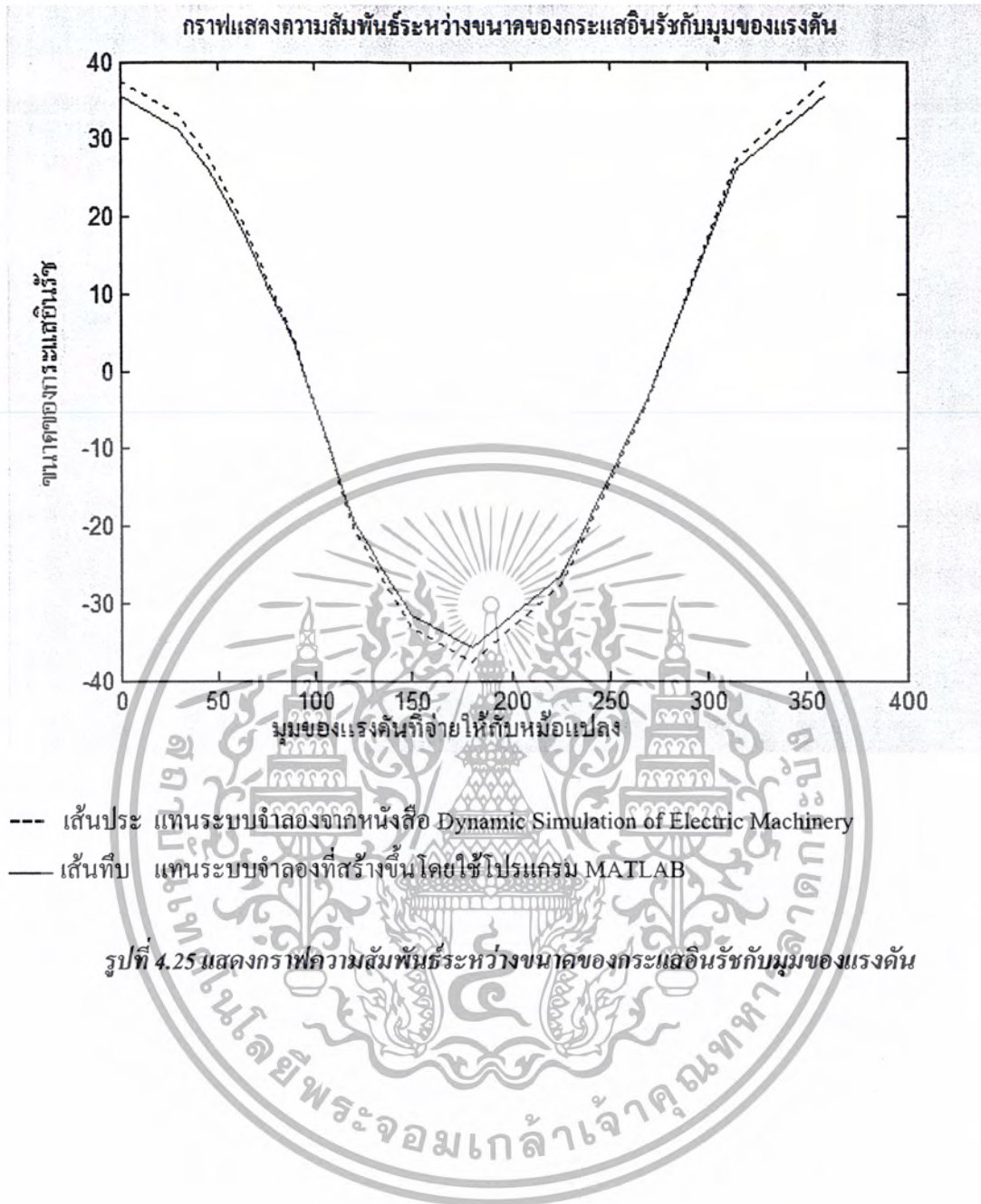
#### 4.4 ขนาดของกระแสทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการป้อนมุมของแรงดันที่กำหนด

จากกราฟแสดงผลการทดลองที่ได้ข้างต้น จะเห็นได้ว่าค่าของกระแสอินรัซที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปตามค่ามุมของแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลง โดยที่มุมที่มีขนาดของกระแสอินรัซสูงที่สุดคือมุม 0 องศา ส่วนมุมที่มีขนาดของกระแสอินรัซต่ำที่สุดคือมุม 90 องศา ซึ่งในบทความต่อไปจะอธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้ค่าของกระแสอินรัซเปลี่ยนแปลงตามค่ามุมของแรงดันที่มุมต่างๆ ส่วนขนาดของกระแสอินรัซที่ค่าของมุมต่างๆที่ได้จากการจำลองระบบทั้ง 2 ระบบจะได้ค่าดังตารางที่ 4.2

มุม (องศา)	ขนาดของกระแสอินรัซ (แอมแปร์)	
	ระบบจำลองจากหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery	ระบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้ โปรแกรม MATLAB
0	+37.50	+35.70
30	+33.00	+31.32
45	+28.00	+26.38
60	+20.70	+19.57
90	+3.60	+3.23
120	-20.70	-19.67
150	-33.00	-31.50
180	-37.50	-35.70
225	-27.60	+26.38
270	-3.60	-3.23
315	+27.60	+26.40
360	+37.50	+35.70

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของกระแสอินรัซที่ค่ามุมของแรงดันมุมต่างๆ

จากค่าในตารางที่ 4.2 เมื่อนำไปพล็อตกราฟเพื่อแสดงขนาดของกระแสอินรัซที่เปลี่ยนแปลงตามค่ามุมของแรงดันค่าต่างๆ และเพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของขนาดกระแสอินรัซที่ได้จากการจำลองระบบทั้ง 2 แบบจะได้ดังรูปที่ 4.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทวิจารณ์และสรุป

การทดลองครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับขนาดของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในขณะที่เราจ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งขนาดของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นนั้นจะมีผลทำให้ระบบป้องกันของหม้อแปลงทำงานผิดพลาดได้ ดังนั้นปริณูณานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการทดลองวิเคราะห์เกี่ยวกับมุมของแรงดันที่เราจ่ายให้กับหม้อแปลงว่ามีผลกับขนาดของกระแสอินรัชหรือไม่และมากน้อยแค่ไหน โดยที่การทดลองจะทำโดยการอ้างอิงเอาระบบจำลองของหม้อแปลงที่มีอยู่ในหนังสือ “ Dynamic Simulation of Electric Machinery ” ซึ่งเขียนโดย Chee-Mun Ong มาทำการจำลองระบบ (simulate) เพื่อนำเอาขนาดของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุมของแรงดันต่างๆ มาเปรียบเทียบกับขนาดของกระแสอินรัชที่ได้จากการจำลองระบบของหม้อแปลงที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB และจากนั้นจะทำการวิเคราะห์หามุมของแรงดันที่มีผลทำให้ค่าของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้ได้กำหนดให้ระบบจำลองของหม้อแปลงเป็น หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว ขนาดพิกัด 1.5 kVA, 120/240 V, 60-Hz, pole-type, เป็นหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด

$$\begin{aligned}r_1 &= 0.25 \text{ โอห์ม} & r_2 &= 0.134 \text{ โอห์ม} \\x_{11} &= 0.056 \text{ โอห์ม} & x_{22} &= 0.056 \text{ โอห์ม} \\x_{m1} &= 708.8 \text{ โอห์ม}\end{aligned}$$

เพื่อต้องการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสูงสุดของกระแสอินรัชกับมุมแรงดันที่สับสวิชต์เซอร์กิตเบรกเกอร์ของหม้อแปลง โดยสมมติให้หม้อแปลงไฟฟ้าก่อนการทดลองไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างเหลืออยู่ในแกนเหล็กเลย การทดลองจะให้วงจรหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิเปิดวงจร(open-circuit) หรือ no-load ต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ  $v = (120\sqrt{2})(\sin \omega t)$  V แล้วนำ สโคป (scope) มาวัดขนาดและแสดงรูปคลื่นของกระแสที่เกิดขึ้น โดยจะเปลี่ยนมุมของแรงดันทั้งหมด 12 มุม

ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ขนาดของกระแสอินรัชและลักษณะรูปคลื่นกระแสอินรัชที่ได้จากระบบจำลองทั้ง 2 ระบบมีความใกล้เคียงกันอย่างมาก ไม่ว่าจะเปลี่ยนมุมของแรงดันไปเท่าไรก็ตาม ดังแสดงให้เห็นในรูปกราฟในบทที่ผ่านมา แต่จากการที่ระบบจำลองของหม้อแปลงที่มีอยู่ในหนังสือ Dynamic Simulation of Electric Machinery ไม่ได้พิจารณา hysteresis loop ในแกนเหล็ก ทำให้กระแสอินรัชที่ได้มีขนาดมากกว่าขนาดของกระแสอินรัชที่ได้จากระบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งพิจารณา hysteresis loop ด้วย แต่ก็มีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะกระแสกระตุ้นที่เข้าหม้อแปลงจะเป็นกระแสอินรัชเพียงอย่างเดียว แต่ระบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นกระแสกระตุ้นจะถูกแบ่งเป็นกระแสกระตุ้นกับกระแสเนื่องมาจาก hysteresis โดยที่ขนาดของกระแสอินรัชจะเปลี่ยนไปตามมุมของแรงดันที่สับสวิชต์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังนี้

เมื่อสับสวิตช์ เซอร์คิตเบรกเกอร์ที่มุมแรงดันศูนย์จะทำให้เกิดค่ากระแสอินรัชสูงสุด ซึ่งตรงกับทฤษฎีที่กล่าวไว้ว่า ถ้าสับสวิตช์เปิดวงจรที่มุมของแรงดันเป็น 0 (voltage zero) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 แรงดันจะเป็นบวกลบในช่วงครึ่งคาบเวลาแรก ดังนั้นปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นตลอดเวลาถึงค่าสูงสุดเป็นสองเท่าของค่าขดปกติ ( $2\phi$ ) และจะส่งผลให้แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวทำให้สามารถเหนี่ยวนำได้น้อยลงส่งผลให้เกิดกระแสอินรัชขนาดสูงขึ้น หลังจากนั้นในอีกครึ่งคาบเวลาต่อมาผลจากการสูญเสีย (loss) จะลดขนาดของรูปคลื่นของเส้นแรงแม่เหล็กลงอย่างรวดเร็วและจะสมมาตรตามแนวแกนเวลา ขณะที่ถ้าสับสวิตช์ เซอร์คิตเบรกเกอร์ที่มุมแรงดัน 90 องศาจะไม่ทำให้เกิดกระแสอินรัชเลย ซึ่งตรงกับทฤษฎีที่กล่าวไว้ว่า ถ้าตอนเริ่มคั้นให้แกนเหล็กถูกกำจัดค่าของเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ทั้งหมดออกไป (unmagnetized) จนหมด นั่นคือไม่มีเส้นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างอยู่ จากนั้นทำการสับสวิตช์เปิดวงจรที่ค่าของแรงดันสูงสุด (voltage peak) เพื่อให้เกิดค่า e.m.f (electro motive force) จึงต้องการอัตราการเปลี่ยนเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปในทิศทางเดียวกันกับแรงดันจนมีค่าสูงสุดเป็น  $\phi_m$  ดังแสดงในรูปที่ 2.1 กระแสกระตุ้นที่เกิดขึ้นจะเป็นค่ากระแสขนาดปกติ นั่นคือไม่เกิดกระแสอินรัชนั่นเอง

จะเห็นได้ว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับทฤษฎี ซึ่งพอจะสรุปได้ว่าที่มุมแรงดัน 90 องศาจะมีผลทำให้ค่าของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นถ้าเราสามารถกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันทำการจ่ายแรงดันที่มุม 90 องศาได้ก็จะทำให้ระบบมีความมั่นคงมากยิ่งขึ้น เนื่องจากระบบป้องกันสามารถทำการแยกแยะระหว่างกระแสอินรัชกับกระแสฟอลต์ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะช่วยลดอัตราการสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้นได้

## 5.2 แนวทางการพัฒนา

การทดลองนี้ได้ทดลองกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าพิกัดต่างๆตามที่กำหนดมาเท่านั้น ดังนั้นต่อไปอาจทำการทดลองกับหม้อแปลงขนาดอื่นๆที่มีพิกัดต่างจากนี้ เพื่อดูผลที่ได้ว่าตรงกันหรือไม่ และควรพัฒนาถึงการวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นด้วย และพิจารณาถึงผลกระทบกับหม้อแปลงตัวอื่นๆที่อาจจะต่ออยู่ในระบบด้วย รวมถึงขยายขอบเขตการวิเคราะห์โดยพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยภายนอก เช่น ไฟฟ้า เป็นต้น

## บรรณานุกรม

- [1] Chee-Mun Ong : “ Dynamic Simulation of Electric Machinery ”, Prentice Hall PTR, 1998, 85-121 pp.
- [2] วรรัตน์ ภัทรอมรกุล , รศ. คร. มนัส สังวรศิลป์ : “ คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์ ”, สำนักพิมพ์ Info press , เมษายน 2543, 379-419 pp.
- [3] พิชิต ถ้ายอง : “ เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 ”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พฤศจิกายน 2537, 57-105 pp.
- [4] รัชชชัย อัดถวิบุรย์กุล : “ หม้อแปลงไฟฟ้า ”, เจริญรุ่งเรืองการพิมพ์, 2538, 1-90 pp.
- [5] เกียรติไกร กิตติวราวุฒิ : “ การศึกษาและวิเคราะห์กระแสอินรัชของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ด ”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546, 1-25pp.
- [6] George McPherson & Robert D. Laramore : “ AN INTRODUCTION TO ELECTRICAL MACHINES AND TRANSFORMERS ”, John Wiley & Sons, Inc., 1990, 186-190 pp.
- [7] P.C. SEN: “ PRINCIPLES OF ELECTRICAL MACHINES AND ELECTRONICS ”, John Wiley & Sons, Inc., 1989, 26-27 pp.
- [8] VINCENT DEL TORO: “ BASIC ELECTRIC MACHINES ”, Prentice-Hall Inc., 1990, 62-65 pp.
- [9] WILLIAM M. FLANAGAN: “ HANDBOOK OF TRANSFORMER DESIGN AND APPLICATIONS ”, McGraw-Hill, Inc., 1993, 3.5-3.6 pp.
- [10] THEODORE WILDE: “ ELECTRICAL MACHINES, DRIVES AND POWER SYSTEMS ”, Sperika Enterprises Ltd., 1991, 203-204 pp.
- [11] J.R. COGDELL: “ FOUNDATIONS OF ELECTRIC POWER ”, Prentice Hall, Inc., 1999, 102-104 pp.
- [12] Irving M. Gottlieb: “ Practical transformer Handbook ”, Newnes, 62-63 pp.