

การศึกษากระแสอินrushในหม้อแปลงหนึ่งเฟส

STUDY OF INRUSH CURRENT IN SINGLE PHASE TRANSFORMERS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

การศึกษากระแสอินrushในหม้อแปลงหนึ่งเฟส

STUDY OF INRUSH CURRENT IN SINGLE PHASE TRANSFORMERS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# STUDY OF INRUSH CURRENT IN SINGLE PHASE TRANSFORMERS



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACUALTY OF ENGINEERING  
KINGMONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การศึกษากระแสอินrush ในหม้อแปลงหนึ่งเฟส

STUDY OF INRUSH CURRENT IN SINGLE PHASE TRANSFORMERS



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ธีรพล

โพธิ์พงษ์วิวัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษากระแสอินรัชในหม้อแปลงหนึ่งเฟส

ผู้จัดทำ

1. นางสาวกรรณก กั้นศิริ
2. นายชลมารค เมืองศรี
3. นายทรงพล ยินดีสุข
4. นางสาวรัตนา สืบสอน



  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. ชีรพล โปธ์พงษ์วิวัฒน์)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. วรชาติ สุวรรณงาม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษากระแสอินรีชในหม้อแปลงหนึ่งเฟส

นางสาวกรรณก กั้นศิริ

นายชลมารค เมืองศรี

นายทรงพล ยินดีสุข

นางสาวรัตนา สืบสอน

ดร. อีรพล โพธิ์พงศวิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดกระแสอินรีชในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสขณะไร้ภาระเนื่องจากกระแสอินรีชดังกล่าวทำให้ระบบป้องกันของระบบไฟฟ้าทำงานผิดพลาด เพื่อที่จะลดความผิดพลาดของระบบป้องกันและยืดอายุของฉนวนภายในหม้อแปลงโครงการนี้ได้มีการออกแบบและสร้างสวิตช์ขึ้นเพื่อให้สามารถเลือกมุมองแรงดันไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมสวิตช์ ในการทดลองได้เลือก IGBT มาใช้เป็นสวิตช์ของวงจร เมื่อรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันถูกตรวจจับโดยอุปกรณ์เซนเซอร์แรงดัน จากนั้นรูปคลื่นแรงดันที่ได้จะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลแล้วจึงส่งสัญญาณที่ได้ไปควบคุมสวิตช์โดยใช้ฮอสซิลโลสโคปในการสังเกตลักษณะรูปคลื่นของกระแสอินรีชที่มุมต่างๆของแรงดันซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ได้ว่าแต่ละมุมนั้นมีผลต่อการเกิดกระแสอินรีชอย่างไร

## Study of inrush current in single phase transformers

Miss Kornkanok      Kansiri

Mr Chonlamark      Muangsri

Mr Songpon      Yindeesuk

Miss Rattana      Suebson

Advisor : Dr. Teeraphon      Phophongviwat

Co-Advisor :Asst.Prof.Dr.Warachart Suwan-ngam

### ABSTRACT

This project shows a study of inrush current in single phase transformer. Incidence of inrush current make mistake to power system protection. An amplitude of the inrush current depends on maximum flux density (B), angle of voltage, and residual flux. In experiments, three different region (low, linear and saturate) of flux densities were tested in 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, and 315° degree of voltage also in case of with/without residual flux. Anti series parallel switch is designed, which is controlled by microcontroller UNO R3, for triggering the angle of voltage that supply to 1 kVA single phase transformer core. The results show that the maximum inrush current arise when the core is energized at 0 degree and the minimum happen when 90° degree was triggered to energize the core. In case of residual flux, the inrush current is higher when it is energized while the core has residual flux than without residual flux.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้จะไม่สามารถลุล่วงไปได้ด้วยดีหากไม่ได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร.ธีรพล โพธิ์พงศ์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ช่วย คำปรึกษาแนะนำในสิ่งที่เป็นประโยชน์และช่วยตรวจเล่มปริญญานิพนธ์คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งใจเป็น อย่างมากและขอขอบคุณอาจารย์ทั้งสามเป็นอย่างยิ่งขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ในการทดลองตลอดมาและขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ของคณะผู้จัดทำ เพื่อนๆ พี่ๆ ที่คอยอำนวยความสะดวกและช่วยเหลือในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	II
ABSTRACT	III
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญรูปภาพ	VIII
สารบัญตาราง	XIV
คำอธิบายสัญลักษณ์	XV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 ขั้นตอนและวิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.3 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 กระแสอินrushในหม้อแปลงไฟฟ้า	4
2.1 บทนำ	4
2.2 กระแสอินrush (Magnetizing Inrush Current)	4
2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสอินrush	8
2.2.2 กระแสอินrushที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกทำการจ่ายไฟ (Initial Inrush)	8
2.3 องค์ประกอบฮามอนิกสีนรูปคลื่นกระแสอินrush	12
2.4 การเหนี่ยวนำของฟาราเดย์	13
2.5 กฎของเลนซ์	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6	เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของแม่เหล็ก	14
<b>บทที่ 3</b>	<b>หลักการทํางานและการออกแบบวงจร</b>	<b>15</b>
3.1	บทนำ	15
3.2	การออกแบบและการสร้างวงจร	15
3.2.1	วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า	15
3.2.2	วงจรกำลัง	16
3.2.3	วงจรควบคุม	18
<b>บทที่ 4</b>	<b>การศึกษาคุณลักษณะของขนาดของรูปคลื่นสัญญาณกระแสอินรัช</b>	<b>22</b>
4.1	บทนำ	22
4.2	โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า	23
4.2.1	การทดสอบเปิดวงจร ( Open circuit )	23
4.2.2	การทดสอบลัดวงจร ( Short circuit )	24
4.2.3	วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm)	25
4.3	การใช้ Oscilloscope ในการศึกษาขนาดและลักษณะรูปคลื่นของกระแสอินรัช	28
4.3.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	29
4.4	ผลการทดลอง	31
4.5	ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยโปรแกรม MATLAB SIMULINK	55
	ศึกษาลักษณะกระแสอินรัชเมื่อเปลี่ยนลักษณะ B – H curve	
4.5.1	ค่าพารามิเตอร์ใน Block parameter of saturable transformer	56
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง</b>	<b>62</b>
5.1	บทนำ	62
5.2	สรุปผลการทดลอง	62

5.3	วิจารณ์ผลการทดลอง	64
5.4	ข้อเสนอแนะ	64
	<b>บรรณานุกรม</b>	67
	<b>ภาคผนวก</b>	68
	ภาคผนวก ก. รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	69
	ภาคผนวก ข. การสร้างสวิตช์เพื่อใช้เลือกมุมแรงดันไฟฟ้า	73
	ภาคผนวก ค. บทความวิชาการ	78



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นแม่เหล็กกับฟลักซ์แม่เหล็ก	5
2.2 ค่าฟลักซ์แม่เหล็กในสภาวะคงตัว (steady state) และค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด	5
2.3 รูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น	6
2.4 กระแสอินรัชไม่ถูกยกขึ้น (Offset) เนื่องจากผลของแกนเหล็กอิ่มตัว	7
2.5 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟเข้า ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก	9
2.6 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายไฟเข้า ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด	9
2.7 รูปกระแสอินรัชที่ถูกกระตุ้นโดยแม่เหล็กทั่วไป	11
2.8 แสดงรูปคลื่นกระแสอินรัชทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในขดหนึ่งของการต่อแบบเดลต้าหรือด้านทุติยภูมิของการต่อขดลวดแบบเดลต้าในหม้อแปลงกระแส	12
2.9 ทิศของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามกฎของเลนซ์	14
3.1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า	16
3.2 ไดอะแกรมวงจรสวิตช์	16
3.3 ชิ้นงานวงวงจรสวิตช์	17
3.4 อุปกรณ์ป้องกัน	18
3.5 วงจรปรับสภาพสัญญาณแรงดัน และกระแสไฟฟ้า	18
3.6 รูปไมโครคอนโทรลเลอร์	19
3.7 วงจรขับเคลื่อน	20
3.8 ชิ้นงานวงจรที่ใช้ในการทดลอง	21
4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส	23
4.2 ไดอะแกรมของ genetic algorithm	25
4.3 ผลจาก Simulation จากวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)	27
4.4 การต่อออสซิลโลสโคปเข้ากับวงจรกำลัง	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5	กระบวนการทดลองโดยใช้ชุดสวิตช์เลือกมุมของแรงดัน	30
4.6	สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 0 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	31
4.7	สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 45 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	32
4.8	สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 90 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	32
4.9	สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 135 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	32
4.10	สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 180 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	33
4.11	สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 225 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	33
4.12	สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 270 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	33
4.13	สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 315 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	34
4.14	สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 0 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	35
4.15	สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 45 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	36
4.16	สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 90 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	36
4.17	สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 135 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	36
4.18	สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 180 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.19	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 225 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	37
4.20	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 270 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	37
4.21	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 315 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	38
4.22	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 0 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	39
4.23	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 45 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	40
4.24	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 90 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	40
4.25	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 135 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	40
4.26	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 180 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	41
4.27	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 225 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	41
4.28	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 270 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	41
4.29	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 315 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	42
4.30	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 0 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	43
4.31	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดันที่มุม 45 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.32	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 90 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	44
4.33	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 135 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	44
4.34	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 180 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	45
4.35	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 225 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	45
4.36	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 270 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	45
4.37	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.45$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 315 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	46
4.38	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 0 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	47
4.39	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 45 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	48
4.40	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 90 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	48
4.41	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 135 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	48
4.42	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 180 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	49
4.43	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 225 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	49
4.44	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 270 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.45	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=0.91$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 315 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	50
4.46	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 0 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	51
4.47	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 45 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	52
4.48	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 90 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	52
4.49	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 135 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	52
4.50	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 180 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	53
4.51	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 225 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	53
4.52	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 270 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	53
4.53	สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.25$ T และสวิตช์แรงดัน ที่มุม 315 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	54
4.54	Block Parameter of Simulink	55
4.55	B-H curve แบบที่ 1 ความชันช่วง linear pointมีค่ามากความชันช่วงsaturationมีค่าน้อย	56
4.56	B-H curve แบบที่ 2 ความชันช่วงlinear pointมีค่ามากความชันช่วงsaturationมีค่ามาก	56
4.57	B-H curve แบบที่ 3 ความชันช่วงlinear pointมีค่าน้อยความชันช่วง saturation มีค่าน้อย	57
4.58	B-H curve แบบที่ 4 ความชันช่วง linear pointมีค่าน้อยความชันช่วง saturation มีค่ามาก	57
4.59	ลักษณะกระแสอินรีชของกราฟ B-H curve แบบที่1เมื่อหม้อแปลงกระตุ้นถูกที่ $B=1.25$ T แรงดันที่มุม 0 องศา	58
4.60	กระแสอินรีชในสภาวะคงตัวของกราฟ B-H แบบที่1เมื่อหม้อแปลงกระตุ้น $B=1.25$ T ที่มุม 0 องศา	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.61 ลักษณะกระแสอินรีชของกราฟ B-H curve แบบที่2เมื่อหม้อแปลงกระตุ้นถูกที่ B=1.25 T แรงดันที่มูม 0 องศา	59
4.62 กระแสอินรีชในสภาวะคงตัวของกราฟ B-H แบบที่2เมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้น B=1.25 T ที่มูม 0 องศา	59
4.63 ลักษณะกระแสอินรีชของกราฟ B-H curve แบบที่3เมื่อหม้อแปลงกระตุ้นถูกที่ B=1.25 T แรงดันที่มูม 0 องศา	60
4.64 กระแสอินรีชในสภาวะคงตัวของกราฟ B-H แบบที่3เมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้น B=1.25 T ที่มูม 0 องศา	60
4.65 ลักษณะกระแสอินรีชของกราฟ B-H curve แบบที่4เมื่อหม้อแปลงกระตุ้นถูกที่ B=1.25 T แรงดันที่มูม 0 องศา	61
5.1 ตำแหน่งของการสวิตช์มูมแรงดันที่ทำให้เกิดค่ากระแสอินรีชสูงสุดและต่ำสุด	63
5.2 ทิศทางของรูปคลื่นกระแสอินรีชแปรตามทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็ก	63
5.3 สัญญาณ Orthogonal signal generator ก่อนการทำ Phase lock loopสามารถเลือก มูมของแรงดันได้หลังจากการทำ PLL ซึ่งมูมของแรงดันที่ได้ จะเป็นมูม radian	65
5.4 ไดอะแกรมการทำงานของ Phase lock loop	66
ข.1 วงจรจกรกำลังที่ต่อเข้ากับโพลตหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ	74
ข.2 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้า	75
ข.3 วงจรขับเคลื่อน	76
ข.4 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino UNOR3	76
ข.5 วงจรปรับสภาพสัญญาณแรงดัน และกระแสไฟฟ้า	77

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ	3
4.1 ผลที่ได้จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า	25
4.2 ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)	28
4.3 ค่าของกระแสอินรีชที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้า และมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) = 0.45 T	31
4.4 ค่าของกระแสอินรีชที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) = 0.91 T	35
4.5 ค่าของกระแสอินรีชที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) = 1.25 T	39
4.6 ค่าของกระแสอินรีชที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) = 0.45 T	43
4.7 ค่าของกระแสอินรีชที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) = 0.91 T	47
4.8 ค่าของกระแสอินรีชที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) = 1.25 T	51
4.9 แสดงค่าของกระแสอินรีชที่สภาวะสูงสุด,สภาวะคงตัวและเวลาที่เข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.25 T และสวิตซ์ที่มุม 0 องศา	57

## คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$\bar{A}$	พื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์ไหลผ่าน	ตารางเมตร
$\bar{B}$	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	เทสลา
$I$	กระแสที่ไหลในหม้อแปลง	แอมแปร์
$I_c$	กระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก	แอมแปร์
$I_m$	กระแสที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กในหม้อแปลง	แอมแปร์
$I_{meal}$	กระแสของวงจรที่วัดได้จากการจ่าย ภาระโหลด	แอมแปร์
$I_{cal1}$	กระแสของวงจรที่คำนวณได้จากวงจรสมมูล ของหม้อแปลงไฟฟ้า	แอมแปร์
$i_0$	ค่ากระแสกระตุ้นชั่วขณะ	แอมแปร์
$N$	จำนวนรอบของหม้อแปลง	รอบ
$N_1$	จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อ แปลงไฟฟ้า	รอบ
$P$	กำลังไฟฟ้าจริง	วัตต์
$R_c$	ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก	โอห์ม
$R_{eq}$	ค่าความต้านทานทั้งหมดของหม้อแปลง	โอห์ม
$R_1$	ค่าความต้านทานขดลวดด้านปฐมภูมิของ หม้อแปลงไฟฟ้า	โอห์ม
$R_2$	ค่าความต้านทานขดลวดด้านทุติภูมิของหม้อ แปลงไฟฟ้า	โอห์ม
$V_{emf}$	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	โวลต์
$V_p$	ค่าสูงสุดของแรงดัน	โวลต์
$X_{eq}$	ค่าความต้านทานรวมเสมือนทั้งหมดของ หม้อแปลง	โอห์ม
$X_m$	ค่าความต้านทานเสมือนของหม้อแปลง	โอห์ม
$X_1$	ค่าความต้านทานเสมือนขดลวดด้านปฐมภูมิ ของหม้อแปลงไฟฟ้า	โอห์ม
$X_2$	ค่าความต้านทานเสมือนขดลวดด้านทุติภูมิ	โอห์ม

	ของหม้อแปลงไฟฟ้า	
$\theta_s$	มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสวิตซ์ชิ่ง	องศา
$\theta$	มุมระหว่างกระแสและแรงดัน	องศา
$\phi_B$	ค่าฟลักซ์ในหม้อแปลง	เวเบอร์
$\phi_m$	ค่าฟลักซ์แม่เหล็กชั่วขณะ ณ เวลา t	เวเบอร์
$ \phi_R $	ค่าขนาดฟลักซ์ตกค้าง	เวเบอร์



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้ามีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมากทุกๆภาคส่วน ไม่ว่าจะเป็น ภาคเศรษฐกิจ ธุรกิจ การคมนาคม โดยเฉพาะภาคครัวเรือน ความต่อเนื่องของการใช้พลังงานจึงเป็นสิ่งสำคัญแต่อย่างไรก็ตามความผิดปกติในระบบไฟฟ้า (fault) เป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ส่งผลให้ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากเพื่อให้ระบบไฟฟ้าสามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง จึงต้องมีระบบป้องกันที่มีประสิทธิภาพสูงโดยทำหน้าที่ตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ถ้าระบบมีความผิดปกติก็จะตัดแยกระบบที่ผิดปกติออก แต่ถ้าระบบไม่มีความผิดปกติจะต้องไม่สั่งให้ตัดวงจร

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้าทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าและปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้สามารถส่งจ่ายพลังงานได้อย่างเหมาะสมกับความต้องการระบบป้องกันของหม้อแปลงจึงมีความสำคัญในการตัดแยกหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบเมื่อเกิด fault และช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับตัวหม้อแปลงกระแสอินรัช (Inrush current) เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ ซึ่งเกิดขึ้นขณะระบบทำการจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าโดยกระแสขนาดสูงจะไหลเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้านานปฐมภูมิ(primary) เพียงด้านเดียวทำให้ขนาดของกระแสระหว่างขดลวดทั้งสองขดมีความแตกต่างกันคล้ายกรณีเกิด(fault) จึงทำให้ระบบป้องกันของหม้อแปลงเกิดความเข้าใจผิดทำให้ระบบป้องกันทำงานผิดพลาด

ดังนั้นปริญญาโทฉบับนี้ จึงศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์กระแสอินรัช (Inrush current) โดยพิจารณาจากระบบที่มีหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส แบบไม่มีกระแสไหล โดยใช้ microcontroller ควบคุมสวิตช์เพื่อช่วยในการจ่ายแรงดันที่มุ่มต่างๆทำให้สามารถควบคุมและหลีกเลี่ยงการเกิดกระแสอินรัชในหม้อแปลงรวมถึงลดความผิดพลาดของการทำงานในระบบป้องกันได้

### วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระแสอินรัชหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส
2. เพื่อใช้เป็นการทดลองสำหรับห้องปฏิบัติการในอนาคต

### ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง 1 เฟส (20 KVA) ซึ่งด้านปฐมภูมิไม่ได้ทำการต่อภาระทางไฟฟ้า
2. ออกแบบและสร้างสวิตช์แบบ Anti series parallel ซึ่งทำจาก IGBT ขนาด 60 A และ fast recovery diode ขนาด 80 A เพื่อทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าและใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม

### 1.2 ขั้นตอนและวิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ทำการศึกษาพฤติกรรมของกระแสอินรัช transformer 1 เฟส
2. กระแสอินรัชการใช้งาน microcontroller (UNOR3) ศึกษาการทำงานของสวิตช์และอุปกรณ์ที่ใช้ทำสวิตช์
3. ทำการออกแบบและสร้างวงจรสวิตช์ ตามที่ได้ออกแบบไว้และเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้ในการควบคุม
4. ทำการทดลองและใช้ oscilloscope ในการดูลักษณะของกระแสอินรัช
5. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์และเตรียมการนำเสนอ
6. สรุปลงและนำเสนอโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ดำเนินงาน	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. การศึกษาพฤติกรรมของกระแสอินรัซ transformer 1เฟส การหลีกเลี่ยงและการควบคุมกระแสอินรัซ การใช้งาน microcontroller (UNOR3) ศึกษาการทำงานของ สวิตช์ และอุปกรณ์ที่ใช้ทำ สวิตช์								
2. ทำการออกแบบวงจรสวิตช์								
3. สร้างวงจร สวิตช์ตามที่ได้ออกแบบไว้								
4. เขียนโปรแกรมการควบคุม สวิตช์โดยใช้ microcontroller								
5. ทำการทดลองและใช้ oscilloscope ในการดูลักษณะของกระแสอินรัซ								
6. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์และเตรียมการนำเสนอ								
7. สรุปและนำเสนอโครงการ								

### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจลักษณะพฤติกรรมของกระแสอินรัซหม้อแปลงไฟฟ้า
2. สามารถประยุกต์ใช้วงจรควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมและหลีกเลี่ยงการเกิดกระแสอินรัซหม้อแปลงได้
3. สามารถใช้เป็นงานทดลองในห้องปฏิบัติการในอนาคตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

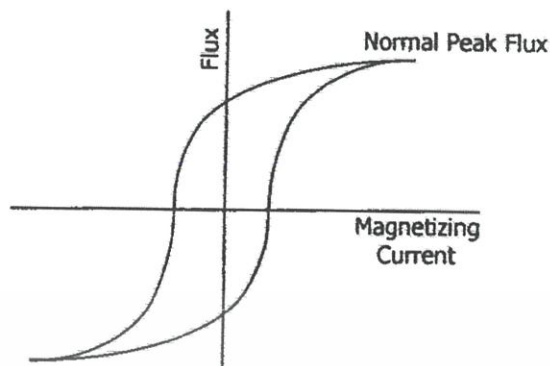
### กระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 2.1 บทนำ

สำหรับปริญญาโทฉบับนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายไฟเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นก่อนที่จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้วงจรควบคุมการการสวิตช์หม้อแปลงไฟฟ้าที่มุมต่างๆของแรงดันเพื่อศึกษาคุณลักษณะของกระแสอินรัชจึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดกระแสกระตุ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายไฟ (Inrush Current) ซึ่งในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับลักษณะของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า

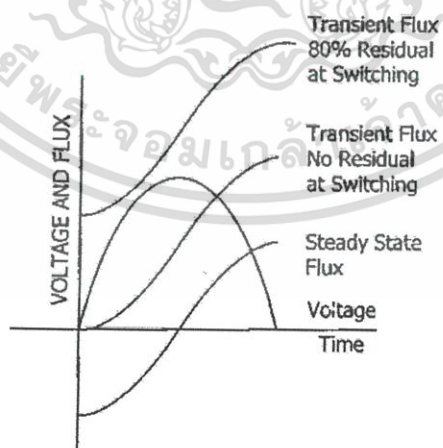
#### 2.2 กระแสอินรัช (Magnetizing Inrush Current)

ปรากฏการณ์ที่มีกระแสทรานเซียนต์พุ่งเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิในช่วงแรกขณะที่หม้อแปลงเริ่มมีการจ่ายไฟ (Energizing) และยังคงสภาพของขนาดกระแสที่พุ่งเข้าดังกล่าวในช่วงเวลาตั้งแต่ 100ms ไปจนถึงหลายวินาที นั้นเรียกว่ากระแสอินรัช ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ไม่ใช่ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง แต่เนื่องจากมีลักษณะการเกิดกระแสระหว่างขดลวดทั้งสองของหม้อแปลงคล้ายการเกิดฟลลต์จึงอาจทำให้ระบบไฟฟ้าทำงานผิดพลาดได้ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดดังกล่าว ในการออกแบบระบบป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้า จำเป็นจะต้องศึกษาลักษณะเฉพาะของกระแสอินรัช เพื่อนำไปพัฒนาระบบป้องกันให้ทำงานขณะเกิดฟลลต์ภายในโซนป้องกัน แต่จะต้องไม่ทำงานตลอดช่วงเวลาที่เกิดสภาวะทรานเซียนต์ของกระแสอินรัช



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นแม่เหล็กกับฟลักซ์แม่เหล็ก

เมื่อพิจารณาตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ที่ถูกจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับคงที่ สังเกตได้ว่าขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวข้องกับวงจรแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจะเริ่มต้นจากค่ายอด (peak) สูงสุดทางด้านลบและเพิ่มไปจนถึงค่ายอดที่เท่ากันของด้านบวกภายในช่วงเวลาครึ่งไซเคิลของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ซึ่งถือเป็นการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น โดยมีขนาดเป็นสองเท่าของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด จากกราฟฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัวใน รูปที่ 2.2 สังเกตได้ว่าที่ตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นในช่วงครึ่งไซเคิลแรก จะมีค่าแกว่งไปมาทั้งในซีกลบและซีกบวก แต่ถ้าฟลักซ์แม่เหล็กเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์ขณะสับสวิตช์นั้น ค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าประมาณสองเท่าของค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในสภาวะคงตัว (Steady state)



รูปที่ 2.2 ค่าฟลักซ์แม่เหล็กในสภาวะคงตัว (steady state) และค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคำอธิบายข้างต้นแสดงให้เห็นว่าในตัวเหนี่ยวนำที่มีลักษณะเชิงเส้น เช่น ตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนอากาศ กระแสจะไหลเพิ่มสูงขึ้นจนมีขนาดเป็นสองเท่าของค่ากระแสในสภาวะคงตัวอย่างใดก็ตามขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนเหล็ก ซึ่งโดยปกติจะมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดอยู่ใกล้กับจุดอิ่มตัว (Saturation) ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กถึงสองเท่าย่อมทำให้เกิดการอิ่มตัวอย่างมากในแกนเหล็ก และจะทำให้กระแสกระตุ้นมีขนาดสูงขึ้นอย่างมาก จนอาจมีค่ามากกว่ากระแสพิกัด โดยเรียกกระแสกระตุ้นนี้ว่า กระแสอินรัช

นอกจากนี้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างยังสามารถทำให้ ขนาดของกระแสอินรัชมีค่าสูงขึ้น โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.2 แทนที่ค่าฟลักซ์แม่เหล็กเริ่มต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ ให้สมมุติว่ามีค่าของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างเริ่มต้นค่าหนึ่งและอยู่ในทิศเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กโดยกำหนดให้อัตราเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กเท่าเดิม จะพบว่าช่วงครึ่งไซเคิลแรกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ได้ใหม่จะมีค่าสูงถึง 2.8 เท่าของค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในสภาวะคงตัวเมื่อกำหนดให้ค่าฟลักซ์ตกค้างมีค่าประมาณ 80 % ของค่าสูงสุดในสภาวะคงตัว



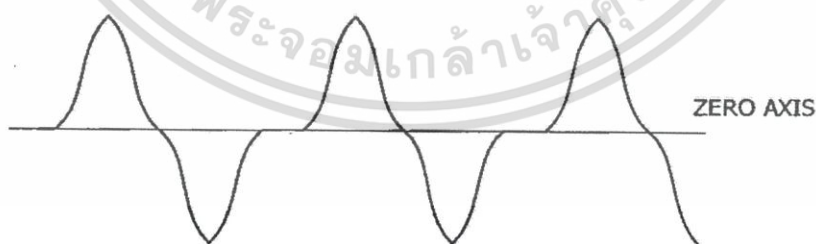
รูปที่ 2.3 รูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น

ค่าความหนาแน่นสูงของฟลักซ์ที่อยู่ในแกนเหล็กดังแสดงข้างต้นนั้นมีความสูงเกินกว่าย่านทำงานปกติ ที่กำหนดให้อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความซึมซาบแม่เหล็กในแกนเหล็กมีค่าคงที่ และค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ของขดลวดมีค่าต่ำลงจนใกล้เคียงค่าของชนิดตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนอากาศ ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นพบว่ากระแสจะเริ่มต้นจากศูนย์ และเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงแรก ค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นพอประมาณ ต่อมาเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กมีค่ามากเกินย่านการทำงานปกติและเข้าสู่ช่วงสนามแม่เหล็กอิ่มตัวสูงตามคุณลักษณะการกระตุ้นแม่เหล็ก (The Magnetizing Characteristic) ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จะลดลงและกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าสูงสุดในช่วงครึ่งไซเคิลแรกของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอาจจะมีค่าสูงถึง 500 เท่าของกระแสในสภาวะคงตัว ต่อมาเมื่อผ่านช่วงฟลักซ์สูงสุด ณ ตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ในช่วงครึ่งไซเคิลหลังนี้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านลบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กลดลงไปยังตำแหน่งเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง โดยกระแสอินรัชจะลดลงจนเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.3 รูปคลื่นอินรัชที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะซ้ำๆกัน โดยรูปคลื่นนี้จะค่อยๆ เข้าสู่สภาวะคงตัวโดยอาศัย ค่าความสูญเสียในวงจรไฟฟ้าที่เกิดจากความต้านทานระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า เท่านั้น สำหรับค่าคงที่ (Time Constant) ของกระแสทรานเซียนต์นี้อาจเริ่มต้นจาก 0.1 วินาที สำหรับหม้อแปลงขนาดประมาณ 100kVA ไปจนถึง 1 วินาที สำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามจาก คุณลักษณะการกระตุ้นแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear) และไม่เป็นฟังก์ชัน Exponential ที่ชัดเจน จึงทำให้สามารถเห็นผลของกระแสอินรัชนานถึง 30 นาทีหลังการสับเซอร์กิตเบรกเกอร์

สำหรับสวิตช์ซึ่งที่ตำแหน่งอื่นๆบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ได้ค่ากระแสทรานเซียนต์ที่ต่ำลงไป และถ้าตำแหน่งการสวิตช์ซึ่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้านั้นทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในสภาวะคงตัวก่อนการสวิตช์ซึ่ง จะทำให้ไม่เกิดผลของกระแสอินรัชเกิดขึ้น โดยกระแสอินรัชที่ได้จะมีลักษณะเหมือนกับกระแสขณะไม่มีโหลดทันที

ในกรณีของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟสตำแหน่งการสับสวิตช์ซึ่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีความแตกต่างกัน ดังนั้นรูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นก็จะมีลักษณะแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้รูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นยังได้รับผลกระทบจากฟลักซ์แม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง ระหว่างที่เฟสหนึ่งทำการสวิตช์ซึ่ง ตำแหน่งที่ไม่เกิดผลของกระแสอินรัช ก็จะได้รับผลของกระแสอินรัชจากเฟสอื่น ดังนั้นในกรณีนี้ถึงแม้ว่ารูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นจะไม่ถูกยกจากแกนนอน แต่จะมีความบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระแสอินรัชไม่ถูกยกขึ้น (Offset) เนื่องจากผลของแกนเหล็กอิ่มตัว

จากลักษณะการเกิดของกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเริ่มจ่ายไฟ ซึ่งเกิดขึ้นจากผลของฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวในแกนเหล็ก ส่งผลให้เกิดกระแสกระตุ้นแม่เหล็กสูงมากไหลเข้าหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

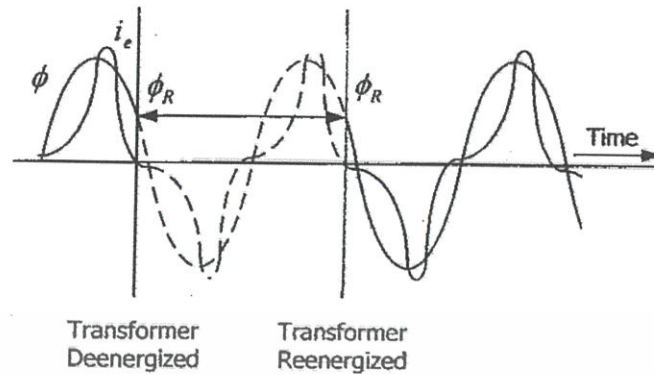
ซึ่งอาจมีค่าสูง 8 ถึง 10 เท่าของกระแสพิกัดหม้อแปลง โดยลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับฟอลต์ (fault) ภายในโซนป้องกันของหม้อแปลงที่มีผลต่างระหว่างกระแสไหลเข้ากับกระแสไหลออก ซึ่งสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและคาบ (Duration) ของกระแสอินรัชได้ดังนี้

### 2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสอินรัช

1. ขนาดพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ขนาดพิกัดของระบบไฟฟ้า
3. ค่าความต้านทานในระบบไฟฟ้าระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า
4. ชนิดของแกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าความเข้มในการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก (Saturation density)
5. ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงไฟฟ้า (Residual Flux)
6. วิธีการจ่ายไฟ

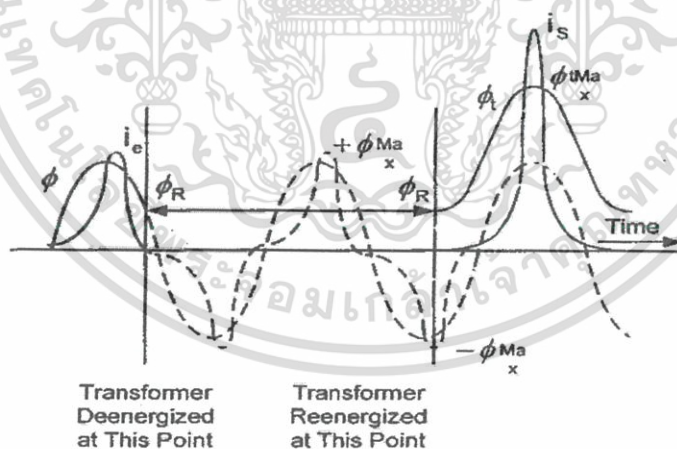
### 2.2.2 กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกทำการจ่ายไฟ (Initial Inrush)

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าถูกปลดออกจากระบบไฟฟ้า กระแสกระตุ้นแม่เหล็กจะลดลงเป็นศูนย์ ส่วนฟลักซ์แม่เหล็กจะลดลงตาม Hysteresis Loop จนเหลือค่าฟลักซ์เท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง  $\phi_R$  ดังแสดงในรูป 2.5 เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟอีกครั้ง ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ค่าฟลักซ์แม่เหล็กมีความต่อเนื่องจากตำแหน่งที่ปลดหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบจะไม่ปรากฏกระแสกระตุ้นแม่เหล็กทรานเซียนต์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในทางปฏิบัติแทบเป็นไปไม่ได้ที่จะควบคุมการสวิตชิ่ง ดังนั้นกระแสทรานเซียนต์อินรัชจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้



รูปที่ 2.5 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟซ้ำ ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก

ในรูปที่ 2.6 หม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟอีกครั้ง ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่ำสุด  $\phi_{\max}$  ซึ่ง ณ ตำแหน่งดังกล่าว ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง (Residual Flux) ก่อนการปลดวงจรมีค่าเป็นบวก ประมาณ 50 % แต่เนื่องจากคุณสมบัติของฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทันทีทันใด ดังนั้นรูปคลื่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น จะเริ่มจากค่าฟลักซ์ตกค้างแม่เหล็ก และค่อยๆ เพิ่มขึ้นเป็นไปตามเส้นกราฟ  $\phi$



รูปที่ 2.6 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายไฟซ้ำ ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดัน , ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสกระตุ้นแม่เหล็กแสดงไว้  
ในสมการที่ 2.1

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

$V_p$  คือ ค่าสูงสุดของแรงดัน

$\theta$  คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสวิตซ์ซึ่ง

$i_0$  คือ ค่ากระแสกระตุ้นชั่วขณะ

$\phi_t$  คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กชั่วขณะ ณ เวลา t

$R_1$  คือ ค่าความต้านทานขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

$N_1$  คือ จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

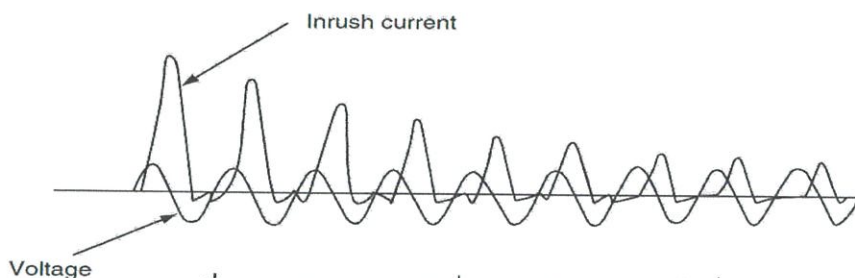
เส้นกราฟ  $\phi_t$  ที่เกิดขึ้นมีความบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นไซน์ปกติ เป็นผลเนื่องมาจากคุณลักษณะของสภาพ  
การอิ่มตัวในวงจรแม่เหล็ก (The magnetic circuit's saturation characteristic)

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

ค่าความเข้มข้นการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก (Economical saturation density) จะออกแบบเพื่อไว้ไม่  
มากนัก ดังนั้นค่ายอดของฟลักซ์แม่เหล็ก  $\phi_t$  จะเกิดการอิ่มตัวด้วยฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (Super  
saturation) ในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งผลที่ได้จะทำให้เกิดกระแสกระตุ้นแม่เหล็กที่สูงมาก ดังรูปที่ 2.6

ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง  $\phi_R$  คือค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่ยังคงตกค้างอยู่ในแกนเหล็ก  
หลังจากปลดไฟออกจากหม้อแปลงไฟฟ้าโดยกระแสจะไหลต่อไปอีกหลังจากแรงดันไฟฟ้าถูกปลดออก  
ค่าฟลักซ์จะค่อยๆลดลงตาม hysteresis loop จนเหลือค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง  $\phi_R$  เมื่อกระแส  
มีค่าเป็นศูนย์ ในหม้อแปลง 3 เฟส ค่าฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสมีมุมต่างกัน  $120^\circ$  โดยถ้าเฟสหนึ่งมีค่า  
เท่ากับ  $+\phi_R$  อีก 2 เฟสที่เหลือจะมีค่าเท่ากับ  $-\phi_R$  โดยผลลัพธ์ของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นจะเป็นผลมา  
จากค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ณ ตำแหน่งแรงดันที่ทำการสวิตซ์ซึ่งรวมกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นซึ่งอาจจะ  
เป็นค่าบวกหรือค่าลบก็ได้รูปคลื่นของกระแสอินรัชทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.7 ในช่วง 2-3 ไซเคิลแรกขนาด  
ของกระแสอินรัชจะลดลงอย่างรวดเร็วและหลังจากนั้นจะลดลงอย่างช้าๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 รูปกระแสอินรัชที่ถูกกระตุ้นโดยแม่เหล็กทั่วไป

ค่าคงที่เวลา (Time Constant) เท่ากับอัตราส่วนระหว่างความเหนี่ยวนำกับความต้านทาน ( $L/R$ ) แต่สำหรับในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) สามารถเปลี่ยนตามค่าความอิ่มตัวแม่เหล็กในแกนเหล็กของหม้อแปลง (Transformer saturation) โดยระหว่าง 2-3 ไซเคิลแรก ค่าความอิ่มตัวของแม่เหล็กจะสูง ซึ่งเป็นผลให้ค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) มีค่าต่ำต่อมาเมื่อวงจรมีความต้านทาน (Loss damp) เกิดขึ้น ทำให้ค่าความอิ่มตัวของแม่เหล็กลดลงมีผลทำให้ค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น

ค่าความต้านทานระหว่างแหล่งกำเนิดกับตัวหม้อแปลงเป็นอีกปัจจัยหลักในการกำหนดอัตราการลดลงของรูปคลื่นกระแส โดยหม้อแปลงที่อยู่ใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีช่วงในการเกิดกระแสอินรัชที่ยาวนานกว่าเนื่องจากค่าความต้านทานต่ำ ซึ่งคล้ายกันกับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่จะมีช่วงในการเกิดกระแสอินรัชที่ยาวนาน เนื่องจากมีค่าความเหนี่ยวนำสูง ตรงข้ามกันถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ไกลออกไป กระแสอินรัชที่เกิดจะไม่นานเนื่องจากค่าความต้านทานในสายส่งจะช่วยให้อินรัชที่เกิดขึ้นลดลงอย่างรวดเร็ว

นอกเหนือจากเงื่อนไขดังกล่าวของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวรูปคลื่นกระแสอินรัชในขดลวดที่ต่อแบบเดลต้าของหม้อแปลงชนิด 3 เฟสยังได้รับผลกระทบจากจำนวนของแกนเหล็กและผลรวมเวกเตอร์ของกระแสในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า 120 องศาต่อมาถ้ารูปคลื่นของกระแสอินรัชหลายเฟสหรือเฟสเดียวในขดลวดแบบเดลต้า ซึ่งได้รับผลกระทบจากธรรมชาติของกระแสในสายส่ง ที่เกิดจากการรวมกันของเวกเตอร์กระแสระหว่างเฟส หากมีแกนเหล็กแกนเดียวที่อิ่มตัวธรรมชาติของกระแสในสายส่งจะทำให้รูปคลื่นเกิดการแกว่งไปมาและบิดเบี้ยวจากรูปคลื่นปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงรูปคลื่นกระแสอินรัชทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในขดหนึ่งของการต่อแบบเดลต้า หรือด้านทุติยภูมิของการต่อขดลวดแบบเดลต้าในหม้อแปลงกระแส

### 2.3 องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ในรูปคลื่นกระแสอินรัช (Harmonics content of inrush waveform)

รูปคลื่นของกระแสกระตุ้นแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วยสัดส่วนของฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆ ซึ่งมีจำนวนมากขึ้นตามปริมาณความหนาแน่นสูงสุดของฟลักซ์แม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดอิ่มตัวของแกนเหล็ก เมื่อรูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นมีลักษณะสมมาตรกับแกนนอน องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจะมีเพียงองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์เฉพาะลำดับที่เป็นเลขคี่เท่านั้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นคุณสมบัติทั่วไปที่เกิดขึ้นเมื่อรูปคลื่นกระแสสลับไหลผ่านอิมพีแดนซ์ที่ไม่มีคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้า (Directional Polarizing) โดยขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในสภาวะอิ่มตัว กระแสไฟฟ้าที่ไหลในหม้อแปลงจะประกอบด้วยองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3, ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 และองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ลำดับที่สูงขึ้นอีกเล็กน้อย ซึ่งความสัมพันธ์ของจำนวนองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ที่มากขึ้นจะสัมพันธ์กับสภาพความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กโดยตรง เช่น ถ้าระดับความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น จะทำให้จำนวนองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆ เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากจำนวนองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ที่เพิ่มมากขึ้นแล้ว ขนาดขององค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 จะมีค่าสูงมากขึ้น จนมีค่ามากกว่าขนาดขององค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 และถ้าความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นไปอีก อาจจะทำให้ขนาดขององค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 7 สูงกว่าขนาดขององค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 ได้ แต่อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวยังไม่ได้ถูกทดสอบกับหม้อแปลงในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในขณะที่หม้อแปลงถูกจ่ายไฟ รูปคลื่นของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีลักษณะไม่สมมาตรกับแกนนอน แต่เมื่อตัดการพิจารณาเกี่ยวกับขนาดของกระแสที่ลดลงจะพบว่ารูปคลื่นที่เกิดขึ้นมีลักษณะสมมาตรกันระหว่างช่วงขาขึ้นกับขาลงโดยรูปคลื่นดังกล่าวจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ทั้งที่เป็นลำดับคู่คี่ ซึ่งเมื่อทำการแยกองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ของกระแสอินรัช

พบว่าในช่วงแรกจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 และ 3 เป็นหลักในส่วน องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆ ที่สูงขึ้นจะลดน้อยลง และเมื่อเข้าสู่ภาวะคงตัวอัตราส่วนของ องค์ประกอบฮาร์มอนิก จะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความอิมิตัวของสนามแม่เหล็กที่ลดลงดังนั้น สัญญาณทรานเซียนต์ในกระแสอินรัชก็จะลดลงด้วยซึ่งถ้ากระแสอินรัชมีขนาดลดลงจะไม่แสดงผลของ รูปคลื่นที่ถูกยก (Offset) ดังรูปที่ 2.8 อย่างไรก็ตามรูปคลื่นดังกล่าวยังมีลักษณะไม่สมมาตรกับแกนนอน เนื่องจากผลรวมของฟลักซ์แม่เหล็กในหม้อแปลง

## 2.4 การเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday 's law)

ไมเคิลฟาราเดย์ (Faraday, 1791-1867) ทำการทดลองศึกษาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก พบว่าการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของขดลวด จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า ทำให้มีกระแสไฟฟ้าในขดลวด โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านหน้าตัด (A) ของลวดตัวนำวงปิด สมการได้ดังนี้

$$V_{emf} = \left| \frac{d\phi_B}{dt} \right| \quad (2.3)$$

ฟลักซ์แม่เหล็กหาได้จาก

$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot \vec{A} \quad (2.4)$$

ถ้าพันขดลวดจำนวน N รอบ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นหาได้จาก

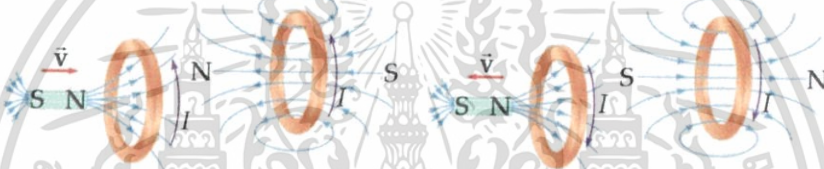
$$V_{emf} = N \left| \frac{d\phi_B}{dt} \right| \quad (2.5)$$

ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านวงปิด แม้ว่าสนามแม่เหล็กที่ผ่านวงปิดจะมีขนาดลดลงก็ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงปิดได้เช่นกัน

2.5 กฎของเลนซ์ (Lenz's law)

$$V_{emf} = -N \left| \frac{d\phi_B}{dt} \right| \tag{2.6}$$

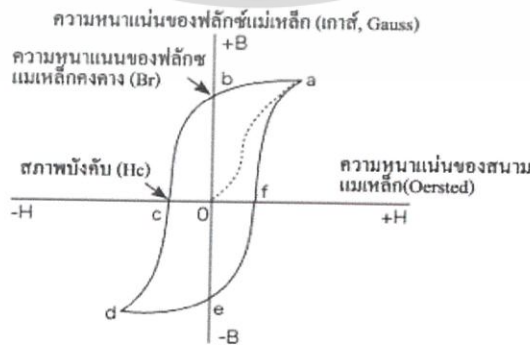
ไฮน์ริช เลนซ์ (Lenz, 1804-1865) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน อธิบายทิศทางและการเกิดกระแสไฟฟ้าเนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากกฎของฟาราเดย์ โดยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นเพื่อรักษาฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านวงจรให้คงตัว (เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายนอก ดังรูปที่ 2.9 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจรมีทิศทางจะสร้างสนามแม่เหล็กให้มีทิศต่อต้านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก จากผลลัพธ์นี้จึงเขียนกฎของฟาราเดย์ได้เป็น



รูปที่ 2.9 ทิศของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามกฎของเลนซ์

2.6 เส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็ก (Magnetic hysteresis curve)

คือ เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กกับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก B ในสสารที่มีการทำให้มีสภาวะเป็นแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กดังกล่าว ตลอดจนการทำให้มีสภาวะเป็นแม่เหล็ก J ในที่นี้จะอธิบายความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (Br) สภาพบังคับ (Coercivity) แรงบังคับ (Coercive Force) ที่เกี่ยวข้องกับเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็ก โดยใช้ภาพ



รูปที่ 2.1 เส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### หลักการงานและการออกแบบวงจร

#### 3.1 บทนำ

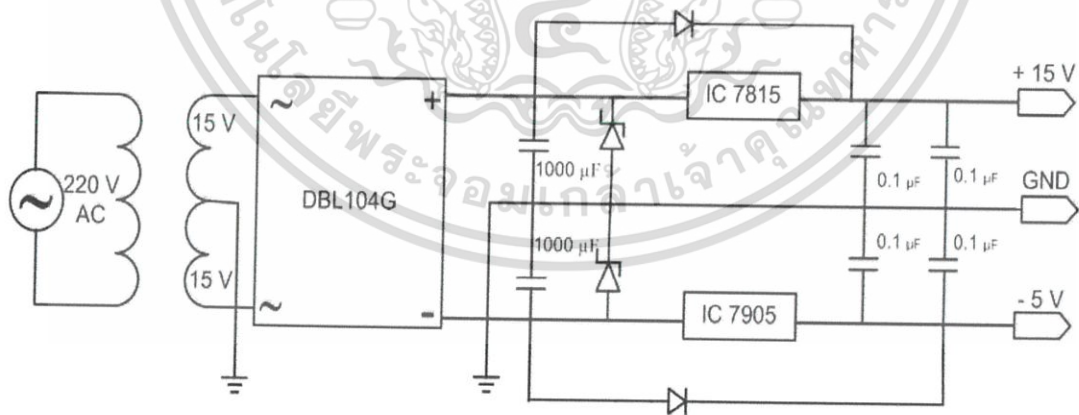
ในบทนี้กล่าวถึงการจำลองและออกแบบวงจรควบคุมการสวิตช์หม้อแปลงไฟฟ้าที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้า ในส่วนแรกจะกล่าวถึงการจำลองการทำงานทางคอมพิวเตอร์โดยโปรแกรม MATLAB ส่วนที่สองเป็นการออกแบบและการสร้างวงจรควบคุมการสวิตช์หม้อแปลงไฟฟ้าที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้า แบ่งเป็น 3 วงจรหลักๆ คือ วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า วงจรควบคุม และวงจรสวิตช์

#### 3.2 การออกแบบและการสร้างวงจร

##### 3.2.1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

วงจรควบคุมที่ใช้ในการควบคุมการขับสวิตช์ที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้าต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อจ่ายไฟเลี้ยงแก่วงจรให้สามารถทำงานได้ โดยวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าประกอบด้วย วงจรรักษาระดับแรงดัน (voltage regulator) และหม้อแปลงไฟฟ้า

วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ทำหน้าที่ในการรักษาระดับแรงดันกระแสตรงให้มีค่าเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ โดยใช้ไอซี 7815 สำหรับแรงดันไฟบวกและ 7905 สำหรับแรงดันไฟลบ



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



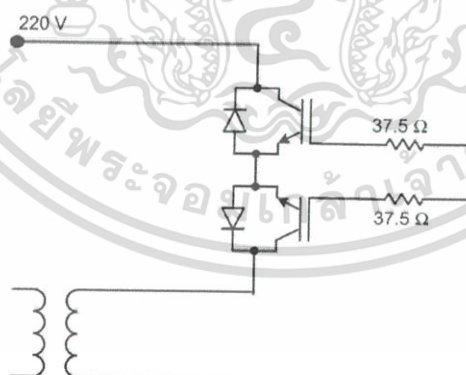
(ข)

รูปที่ 3.1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

(ก) ไดอะแกรมของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า (ข) ชิ้นงานวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า

## 3.2.2 วงจรกำลัง

## 3.2.2.1 วงจรสวิตช์ (anti series parallel switch)



รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมวงจรสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานวงจรสวิตช์

วงจรสวิตช์ทำหน้าที่ตัดต่อวงจรไฟฟ้าระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยขาเกตของ IGBT จะต่อเข้ากับขา 6 และขา 7 ของตัวเกตไดรฟ์เพื่อนำโวลต์ที่ป้อนเป็นสัญญาณให้วงจรสวิตช์ที่มมต่างๆของแรงดันไฟฟ้าโดยวงจรสวิตช์ประกอบด้วย IGBT 1 ตัว ขนานกับไดโอดแบบฟื้นตัวเร็ว (Fast recovery diode) 2 ชุดมาอนุกรมกัน แต่ละชุดจะทำงานครึ่งไซเคิลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 3.2.2.2 อุปกรณ์ป้องกัน

อุปกรณ์ป้องกันเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นในการทำการทดลองโดยอุปกรณ์ป้องกันทำหน้าที่ตัดต่อ ระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับหม้อแปลง โดยอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ คือเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 40 A ซึ่งต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อความปลอดภัยของผู้ทำการทดลอง



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ป้องกัน

### 3.2.3 วงจรควบคุม

#### 3.2.3.1 วงจรปรับสภาพสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า

วงจรปรับสภาพสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าทำหน้าที่วัดค่าสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบ โดยมีค่าพิกัดที่สามารถวัดได้อยู่ที่ 500 V และ 50 A ตามลำดับ ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งวงจรมีหน้าที่ช่วยปรับสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์

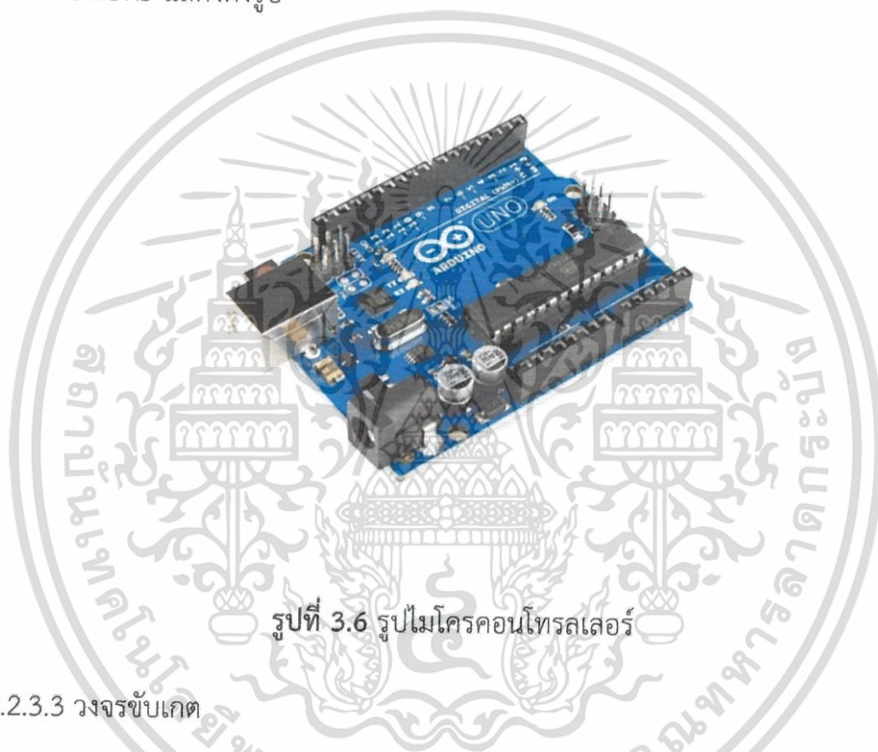


รูปที่ 3.5 วงจรปรับสภาพสัญญาณแรงดัน และกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่ส่งเลือกมุมแรงดันไฟฟ้าก่อนเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวควบคุมการสวิตช์ของ IGBT ในวงจรสวิตช์ โดยในการขับสวิตช์ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะประมวลผลและส่งสัญญาณออกมาขับสวิตช์ ซึ่งมีแรงดันอยู่ระหว่าง 0 V ถึง 5 V แต่สวิตช์จะทำงานเมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้า 7 V ขึ้นไปจึงต้องมีวงจรช่วยขับเกตโดยใช้ไอซี HCPL 3120 ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้คือรุ่น ARDUINO UNOR3 แสดงดังรูป



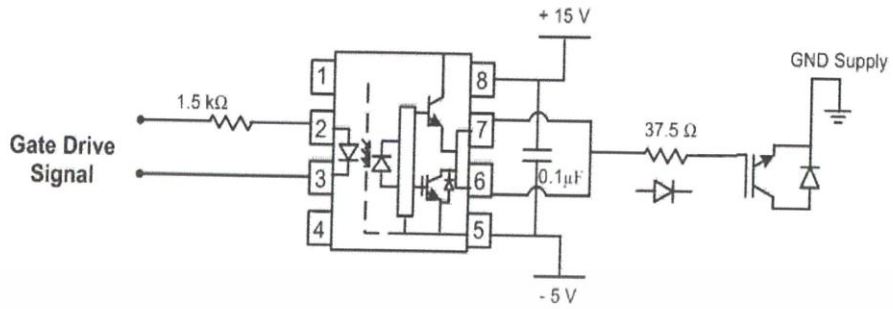
รูปที่ 3.6 รูปไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3.2.3.3 วงจรขับเกต

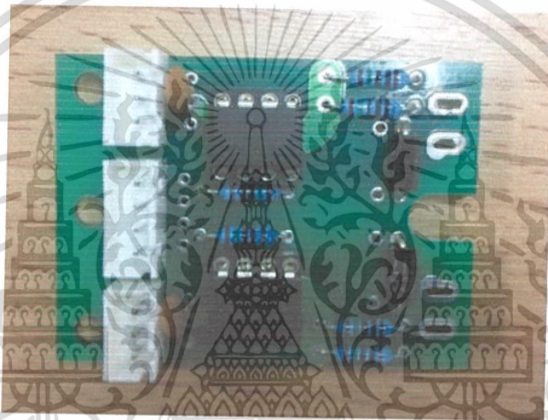
วงจรขับเกต ทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดสูงขึ้นและแยกกราวด์ระหว่างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณกับวงจรสวิตช์เพื่อป้องกันการลัดวงจรในการขับสวิตช์ไมโครคอนโทรลเลอร์จะประมวลผลและส่งสัญญาณออกมาขับสวิตช์ ซึ่งมีแรงดันอยู่ระหว่าง 0 V ถึง 5 V แต่สวิตช์ต้องการแรงดัน 7 V ขึ้นไป จึงต้องมีวงจรในการช่วยขับเกต

ในปริณญาณิพนธ์นี้ใช้ HCPL 3120 เป็นตัวขับเกต โดยไอซีตัวนี้จะทำหน้าที่แยกไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรถูกกำเนิดออกจากกัน เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับไมโครคอนโทรลเลอร์หากมีความผิดพลาดของวงจรถูกกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

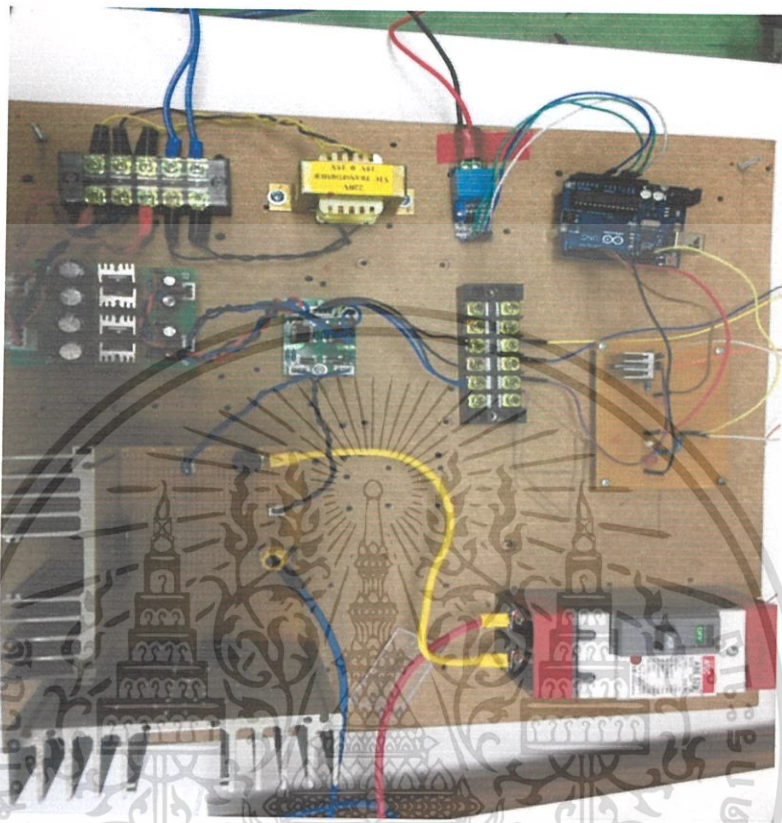
รูปที่ 3.7 วงจรชาร์จแบตเตอรี่

(ก) ไดอะแกรมวงจรชาร์จแบตเตอรี่

(ข) รูปชิ้นงานวงจรชาร์จแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3.4 แผงวงจรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานวงจรที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

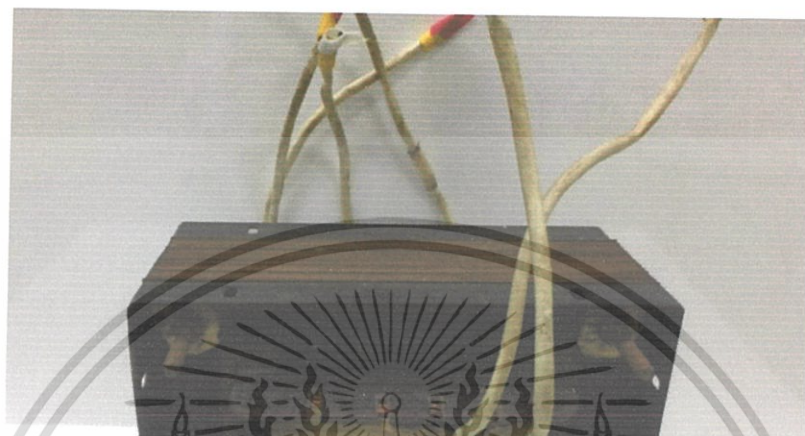
## บทที่ 4

### การศึกษาคุณลักษณะของขนาดของรูปคลื่นสัญญาณกระแสอินรัช

#### 4.1 บทนำ

พฤติกรรมของความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุแม่เหล็กซึ่งเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างหม้อแปลง จะส่งผลให้ขนาดของกระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลง มีโอกาสเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันเรียกว่ากระแสอินรัชซึ่งจะสร้างความเสียหายให้กับระบบไฟฟ้าและทำให้ระบบป้องกันทำงานผิดพลาดได้ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องศึกษาพฤติกรรมของกระแสอินรัชดังกล่าวและนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ว่าเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่รวมถึงสามารถนำความรู้ไปพัฒนาระบบป้องกันได้อีกด้วยซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงการหาค่าพารามิเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้า, ผลการทดลองลักษณะรูปคลื่นและขนาดของกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสที่มุมต่างๆ ทั้งหมด 8 มุม โดยในการทดลองนั้นแบ่งเป็นกรณีที่มีฟลักซ์ตกค้างภายในแกนเหล็กและกรณีที่ไม่มีฟลักซ์ตกค้างในแกนเหล็ก จากนั้นเลือกจุดดำเนินการในแต่ละช่วงของกราฟ B-H curve ซึ่งมีความแตกต่างกัน ได้แก่ จุดที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ในช่วงเชิงเส้นจุดที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่วง Knee Point และช่วงที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่วงแกนเหล็กอิ่มตัว และ ทดลองการจำลองทางคอมพิวเตอร์ศึกษาลักษณะกระแสอินรัชเมื่อเปลี่ยนลักษณะ B-H curve

## 4.2 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองพิกัด 875 VA ,8.75 A ,100 V โดยพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบประมาณสามารถหาได้จากการทดสอบเปิดวงจร (Open circuit) และการทดสอบลัดวงจร (Short circuit) ดังนี้

### 4.2.1 การทดสอบเปิดวงจร ( Open circuit )

การทดสอบแบบนี้ทำโดยจ่ายแรงดันเข้าทางขดลวดด้านแรงดันต่ำ โดยเปิดวงจรทางด้านขดลวดแรงดันสูง จากนั้นวัดค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าเพื่อหาค่า  $R_c$ ,  $X_m$  จากสมการ

$$\cos \theta = \frac{P}{VI} \quad (4.1)$$

$$I_c = I \cos \theta \quad (4.2)$$

$$I_m = I \sin \theta \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_c = \frac{V}{I_c} \quad (4.4)$$

$$X_m = \frac{V}{I_m} \quad (4.5)$$

จากการ Open circuit test ของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ข้อมูลดังนี้

$P = 20.5 \text{ W}$  ,  $I = 2.65 \text{ A}$  ,  $V = 78 \text{ V}$  นำค่าเหล่านี้ไปแทนสมการที่ 2.7 – 2.10 จะได้ค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

$$R_c = 296.78 \ \Omega$$

$$X_m = 29.56 \ \Omega$$

#### 4.2.2 การทดสอบลัดวงจร ( Short circuit )

การทดสอบแบบนี้จ่ายแรงดันเข้าทางขดลวดแรงดันสูง โดยลัดวงจรขดลวดด้านแรงดันต่ำ แล้ววัดค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้าเพื่อหาค่า  $R_{eq}$  ,  $X_{eq}$

$$R_{eq} = \frac{P}{I^2} \quad (4.6)$$

$$X_{eq} = \sqrt{\left(\frac{V}{I}\right)^2 - (R_{eq})^2} \quad (4.7)$$

จากการ Short circuit test ของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ข้อมูลดังนี้

$P = 42.04 \text{ W}$  ,  $I = 8.75 \text{ A}$  ,  $V = 10.6 \text{ V}$  นำค่าเหล่านี้ไปแทนสมการที่ 2.11 – 2.12 จะได้ค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

$$R_{eq} = 0.54 \ \Omega$$

$$X_{eq} = 1.07 \ \Omega$$

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่าแสดงดังตารางที่ 4.1

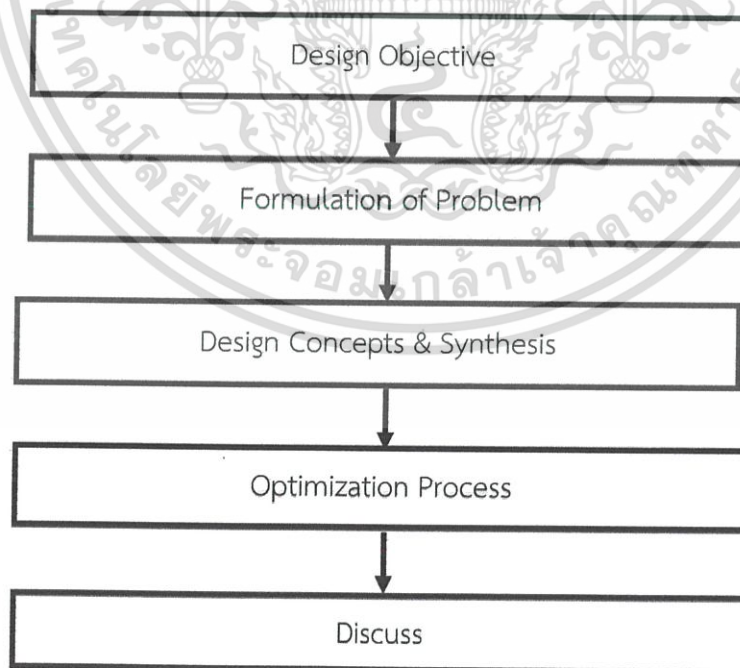
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่า

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ ( $\Omega$ )
$R_c$	296.78
$X_m$	29.56
$R_{eq}$	0.54
$X_{eq}$	1.07

แต่เนื่องจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 4.1 อาจจะไม่แม่นยำ วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) จึงถูกนำมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 4.2.3 วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm)

เป็นเทคนิคสำหรับการค้นหาผลเฉลย (solutions) หรือคำตอบโดยประมาณของปัญหา เป็นการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด (optimal solution)



รูปที่ 4.2 ไตอะแกรมของ genetic algorithm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งเป็นรูปแบบฟังก์ชันสำหรับหาค่าน้อยที่สุดดังนี้

Objective function

$$I = \left| \left| \frac{I_{mea1}}{I_{cal1}} \right|^2 - 1 \right| + \left| \left| \frac{I_{mea2}}{I_{cal2}} \right|^2 - 1 \right| + \left| \left| \frac{I_{mea3}}{I_{cal3}} \right|^2 - 1 \right| \quad (4.8)$$

ค่าของพารามิเตอร์ถูกกำหนดด้วยช่วงของคำตอบซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัวในวงจรมูลของหม้อแปลงตามสมการ linear constraint ดังนี้

Linear constraint

$$0.55 - R_1 - R_2 = 0 \quad (4.9)$$

$$1.06 - X_1 - X_2 = 0 \quad (4.10)$$

$$R_1 - R_2 = 0 \quad (4.11)$$

$$X_1 - X_2 = 0 \quad (4.12)$$

$$|I_{cal1}| = 2.73 \quad (4.13)$$

$$|I_{cal2}| = 3.48 \quad (4.14)$$

$$|I_{cal3}| = 4.41 \quad (4.15)$$

Constraint

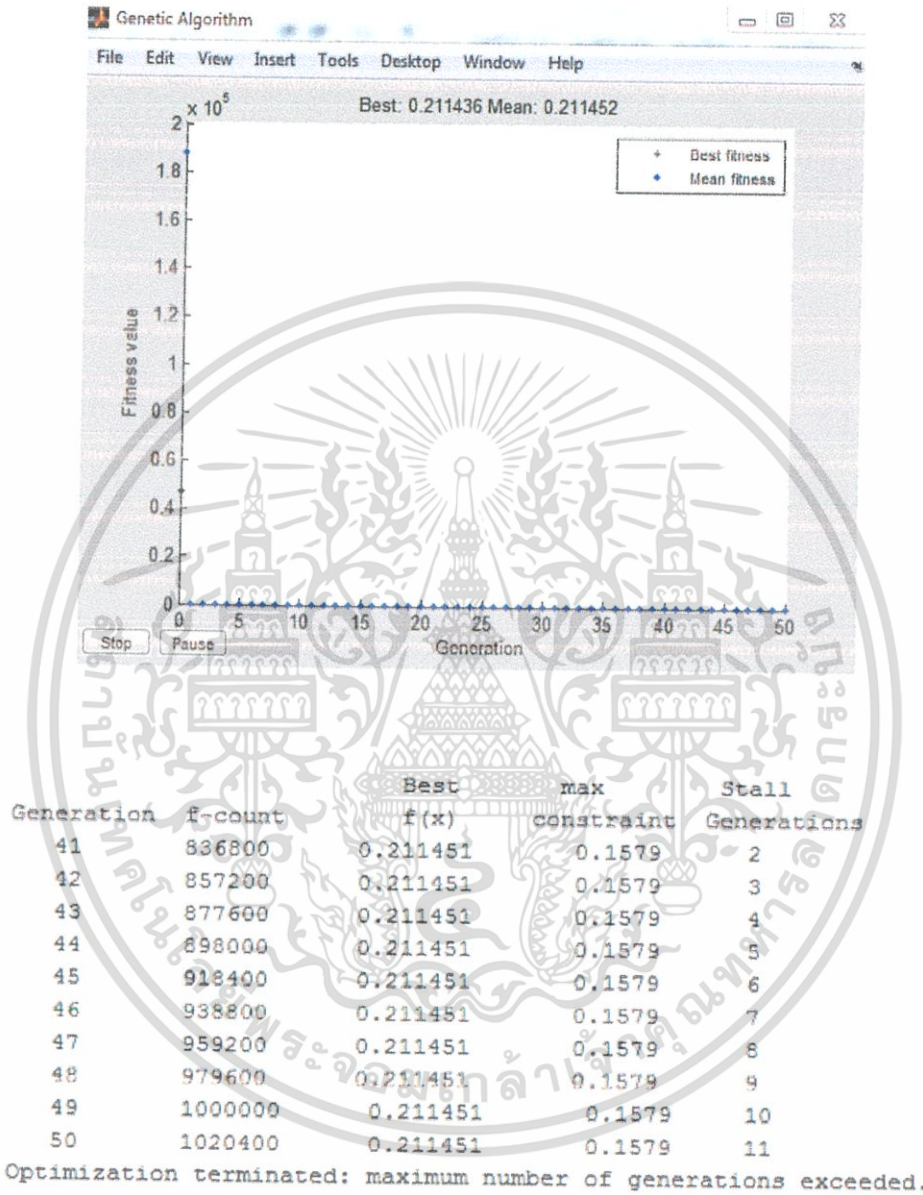
$$I_{mea1}, I_{mea2}, I_{mea3}, V_{mea1}, V_{mea2}, V_{mea3}$$

ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง

$$R_1, X_1, R_2, X_2, X_m, R_c$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการหาค่าพารามิเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้า



y =

0.2661    0.5249    0.2708    0.5339    27.3253

fval =

0.2115

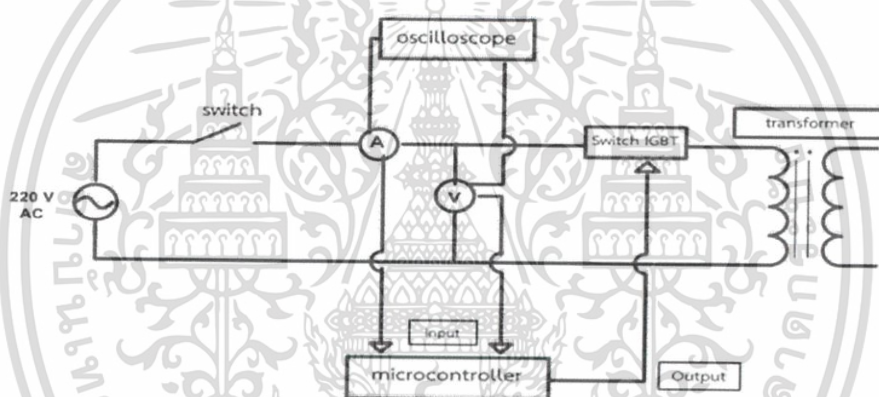
รูปที่ 4.3 ผลจาก Simulation จากวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ ( $\Omega$ )
$R_c$	296.78
$X_m$	27.32
$R_{eq}$	0.536
$X_{eq}$	1.06

#### 4.3 การใช้ Oscilloscope ในการศึกษาขนาดและลักษณะรูปคลื่นของกระแสอินรัช



รูปที่ 4.4 การต่อออสซิลโลสโคปเข้ากับวงจรกำลัง

ในการทดลองจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ไม่มีฟลักซ์ตกค้างและกรณีที่มีฟลักซ์ตกค้าง โดยจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ แล้วเปิดวงจรด้านทุติยภูมิ จากนั้นใช้ออสซิลโลสโคปตรวจจับรูปคลื่นสัญญาณและบันทึกลักษณะการเกิดและขนาดกระแสอินรัชโดยจะเปลี่ยนค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 3 ค่าและเปลี่ยนมุมแรงดันไฟฟ้า 8 มุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการเลือกมุมของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการ simulation ในโปรแกรม MATLAB จากนั้นทำการวิเคราะห์หามุมแรงดันไฟฟ้าและเปรียบเทียบกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่างกัน โดยหม้อแปลงดังกล่าวมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่างกันตามลักษณะของ B-H curve ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่จุด linear :  $B = 0.45 \text{ T}$
- ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่จุด Knee point :  $B = 0.91 \text{ T}$
- ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่จุด Saturated :  $B = 1.25 \text{ T}$

โดยค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก จะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของแรงดัน ที่จ่ายให้กับหม้อแปลง

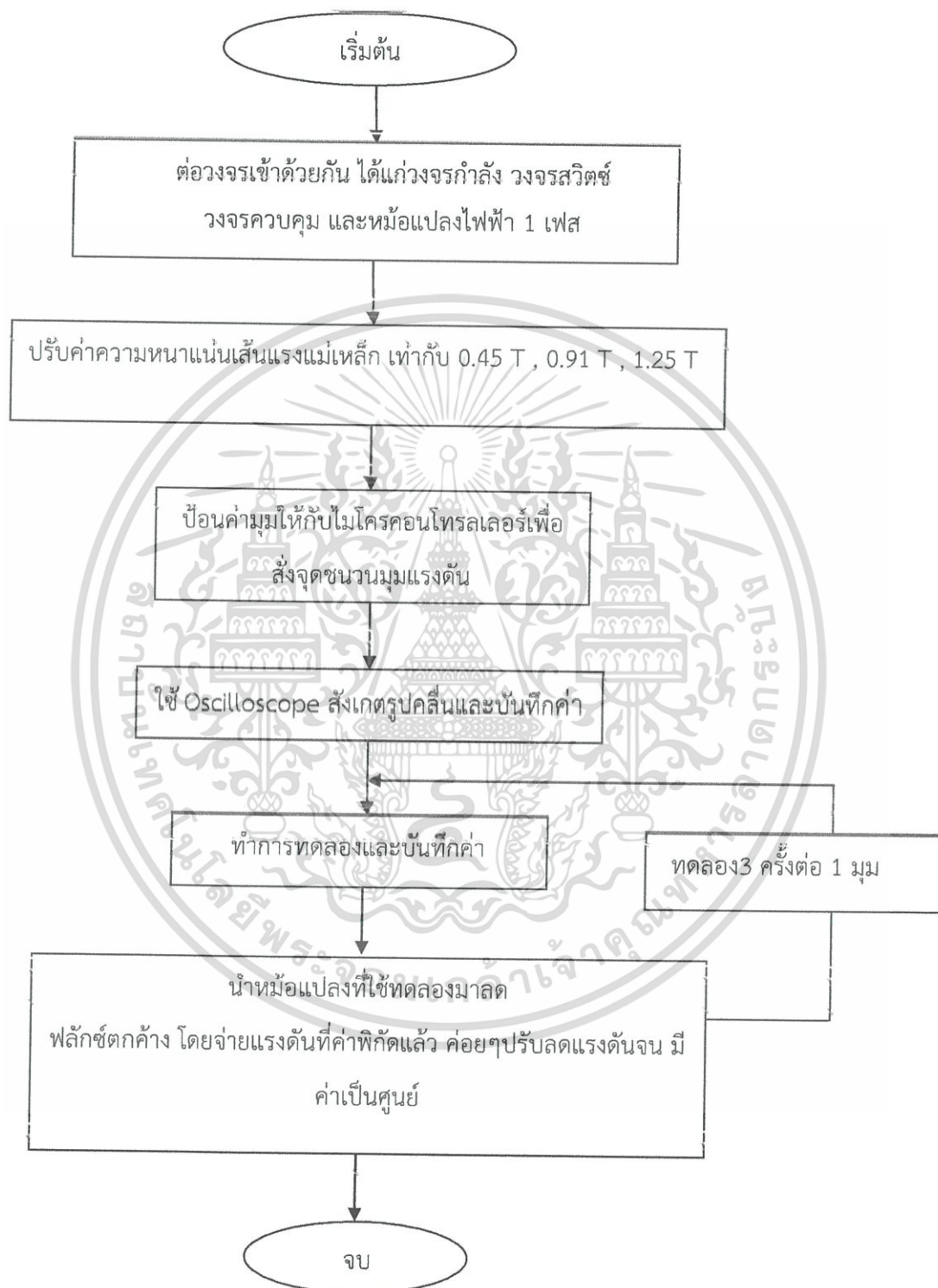
#### 4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. Oscilloscope 1 เครื่อง
2. สายโพรบแรงดัน 1 เส้น
3. โพรบวัดกระแส 1 เส้น
4. วงจรไฟเลี้ยง 1 ชุด
5. หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ขนาด 875 VA 1 เครื่อง
6. ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 1 ชุด
7. เซอร์กิตเบรกเกอร์ 20 A 1 ชุด
8. แหล่งจ่ายแรงดันปรับค่าได้ 20 KVA 1 เครื่อง
9. สายไฟ

#### 4.4 ขั้นตอนการทดลอง

ทดลองการเลือกสวิตช์มุมของแรงดันไฟฟ้าด้วยชุดสวิตช์ โดยเชื่อมต่อวงจรทั้งหมดเข้าด้วยกัน ได้แก่ วงจรสวิตช์ วงจรควบคุม และหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ปรับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการเลือกเป็นจุดดำเนินการ โดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลง ซึ่ง ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก  $0.45 \text{ T}$ ,  $0.91 \text{ T}$  และ  $1.25 \text{ T}$  สามารถคำนวณได้เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ  $28 \text{ v}$ ,  $57 \text{ v}$  และ  $78 \text{ v}$  ตามลำดับ เริ่มจากการป้อนค่ามุมของแรงดันที่ต้องการให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์รับค่าและประมวลผลและเลือกสวิตช์มุมของแรงดัน ผลที่ได้จะถูกบันทึกโดย oscilloscope จากนั้นนำหม้อแปลงที่ใช้มาลดปริมาณฟลักซ์ตกค้างโดยป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ค่าพิกัดและค่อยๆปรับลดระดับแรงดันแล้วจึงนำหม้อแปลงมาทดลองใหม่ซ้ำอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กระบวนการทดลองโดยใช้ชุดสวิตซ์เลือกมุมของแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

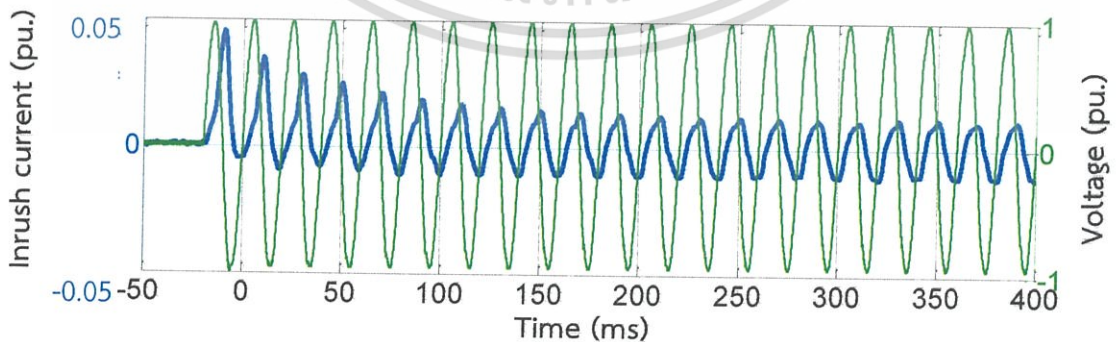
4.4 ผลการทดลอง

จากการทดลองเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์เปิดสวิตช์ กระแสจะไหลเข้าสู่หม้อแปลงซึ่งขณะนั้นหม้อแปลงไม่มีฟลักซ์ตกค้าง เมื่อป้อนค่ามุมต่าง ๆ ที่กำหนดได้แก่ 0 , 45 , 90 , 135 , 180 , 225 270 และ 315 จากนั้นกำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 0.45 T ได้ค่ากระแสอินรัชตามตารางที่ 4.3

กรณีที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ไม่มีฟลักซ์ตกค้าง

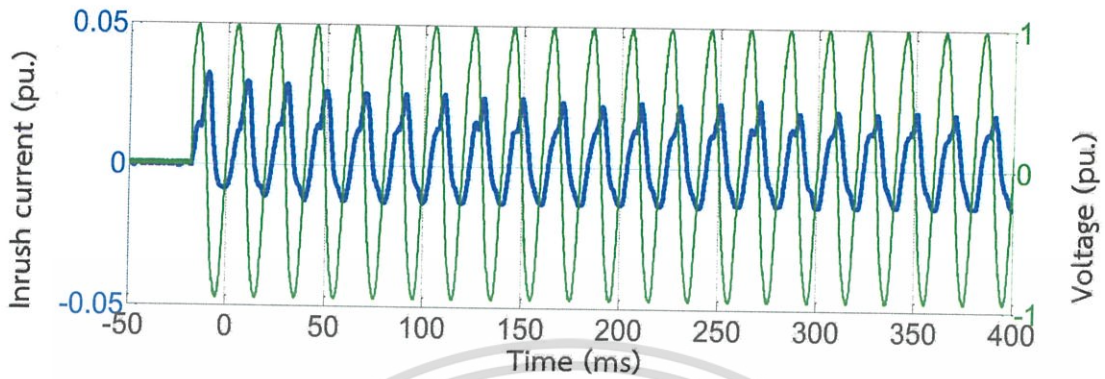
ตารางที่ 4.3 ค่าของกระแสอินรัชที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้า และมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) = 0.45 T

ครั้งที่ทำการทดลอง	มุมสวิตช์แรงดันไฟฟ้า (องศา)							
	0	45	90	135	180	225	270	315
1	0.76	1.76	0.48	-5.2	-0.76	-6.4	0.2	0.8
2	0.76	1.36	0.4	-5.2	-1.32	-6.8	0.24	0.64
3	0.76	0.96	0.36	-5.2	-1.2	-5.6	0.2	0.72

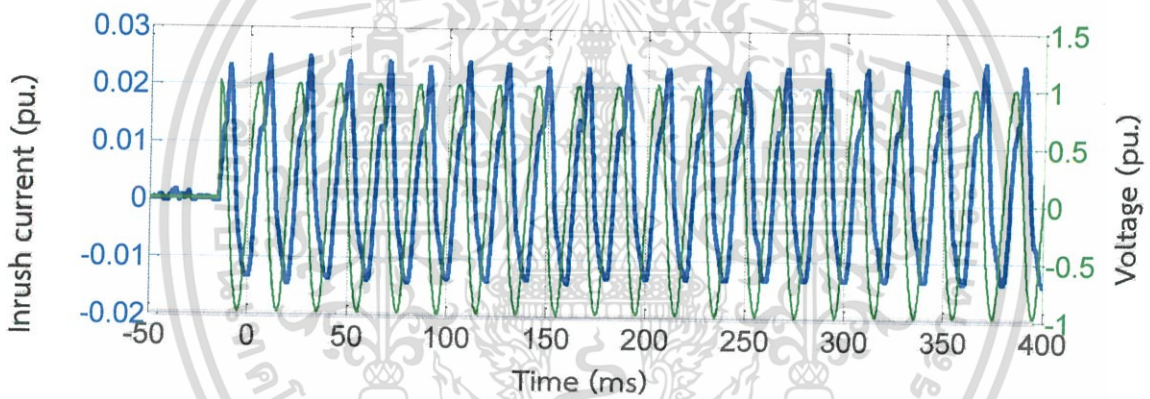


รูปที่ 4.6 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=0.45 T และสวิตช์แรงดันที่มุม 0 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

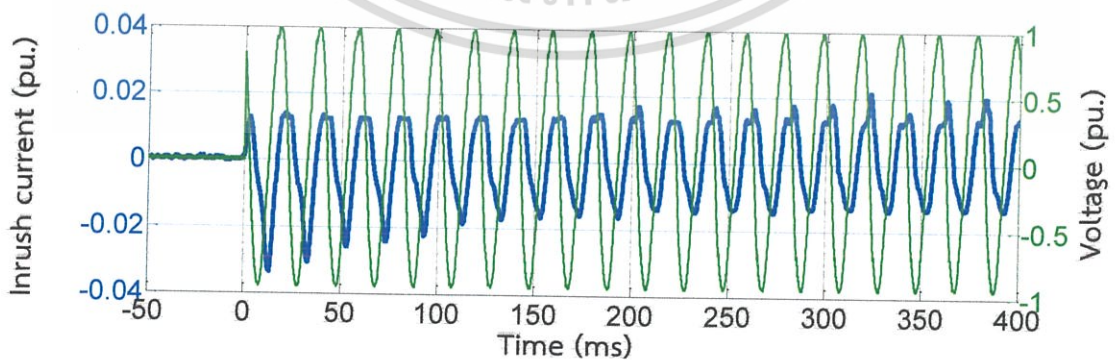
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.45$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 45 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

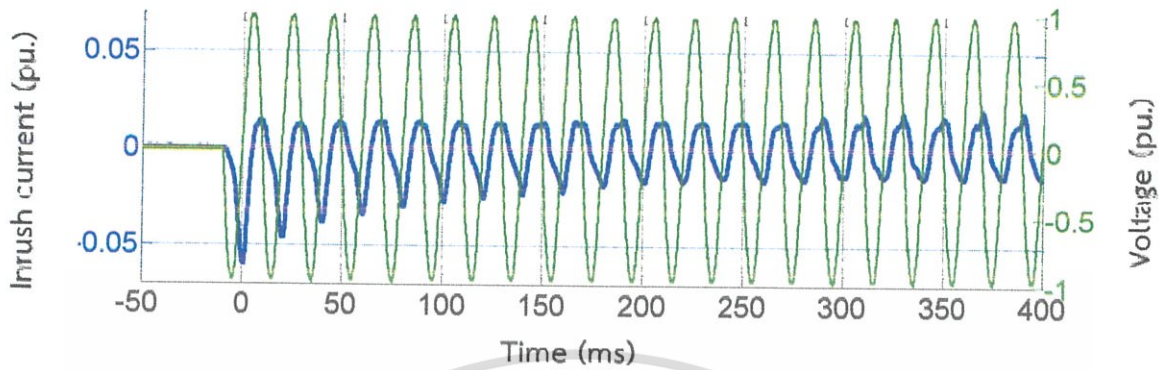


รูปที่ 4.8 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.45$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 90 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

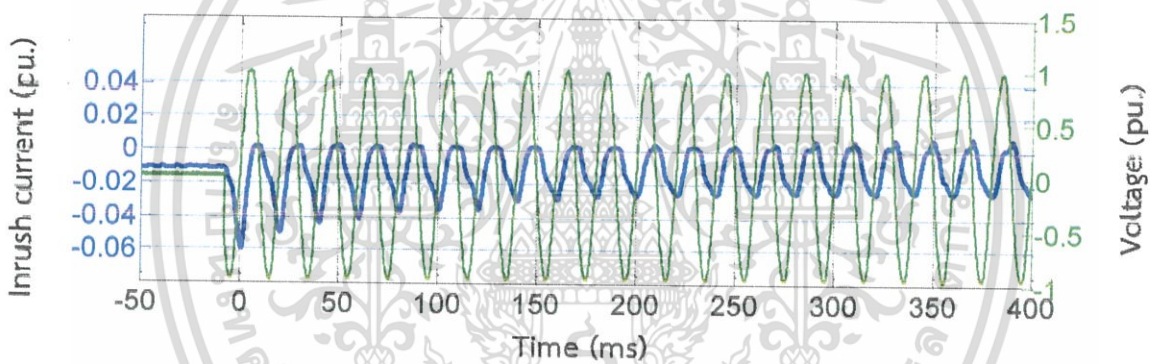


รูปที่ 4.9 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.45$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 135 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

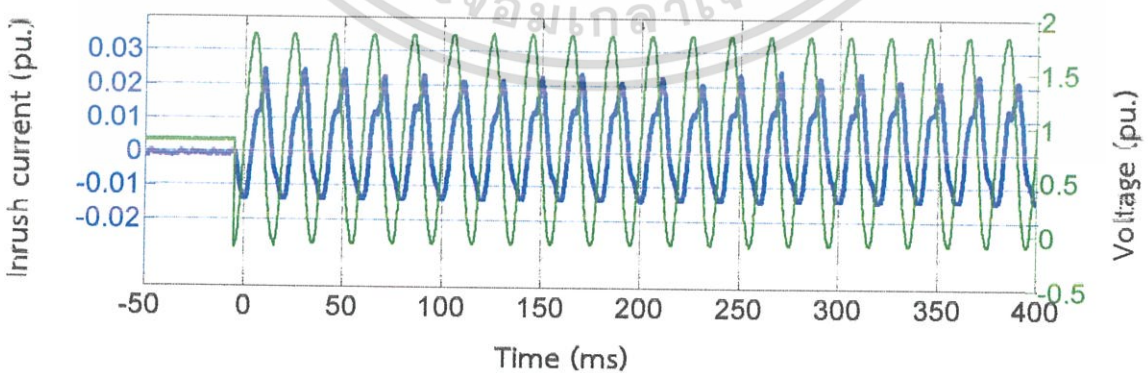
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.45$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 180 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

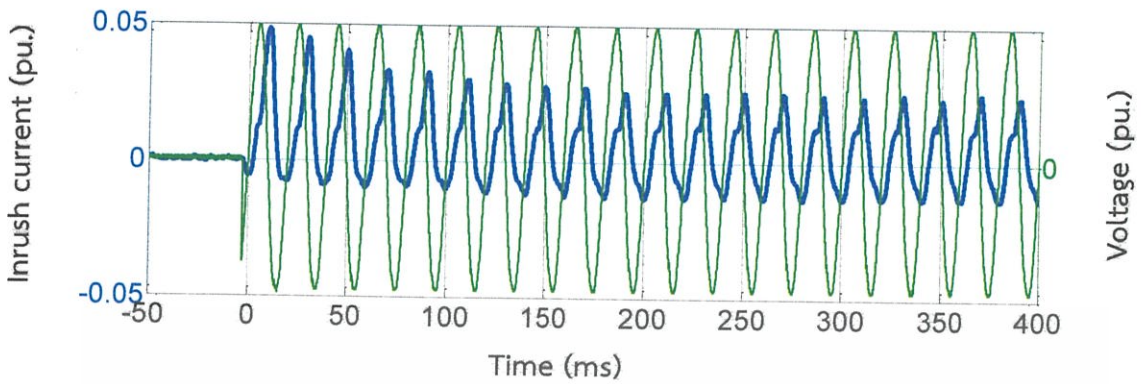


รูปที่ 4.11 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.45$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 225 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง



รูปที่ 4.12 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.45$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 270 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.45$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 315 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

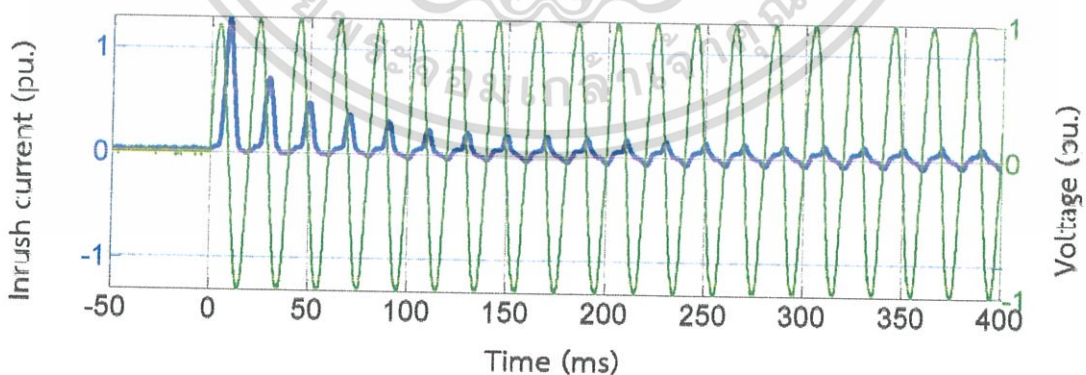


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์เปิดสวิตช์กระแสจะไหลเข้าสู่หม้อแปลงซึ่งขณะนั้นหม้อแปลงไม่มีฟลักซ์ตกค้าง เมื่อป้อนค่ามุมต่าง ๆ ที่กำหนดได้แก่ 0 , 45 , 90 , 135 , 180 , 225 270 และ 315 จากนั้นกำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 0.91 T ได้ค่ากระแสอินรัชตามตารางที่ 4.4

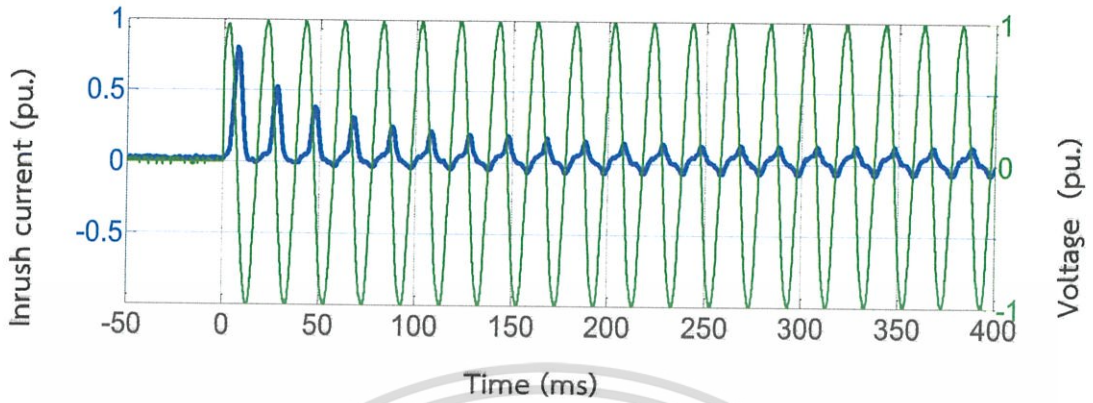
ตารางที่ 4.4 ค่าของกระแสอินรัชที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) = 0.91 T

ครั้งที่ทำการทดลอง	มุมสวิตช์แรงดันไฟฟ้า (องศา)							
	0	45	90	135	180	225	270	315
1	16.6	11.0	1.40	-7.60	-12.8	-7.80	1.40	9.60
2	16.4	10.4	1.60	-6.8	-12.8	-8.20	1.60	9.2
3	16.4	10.6	1.60	-6.4	-13.6	-8.0	1.20	9.4

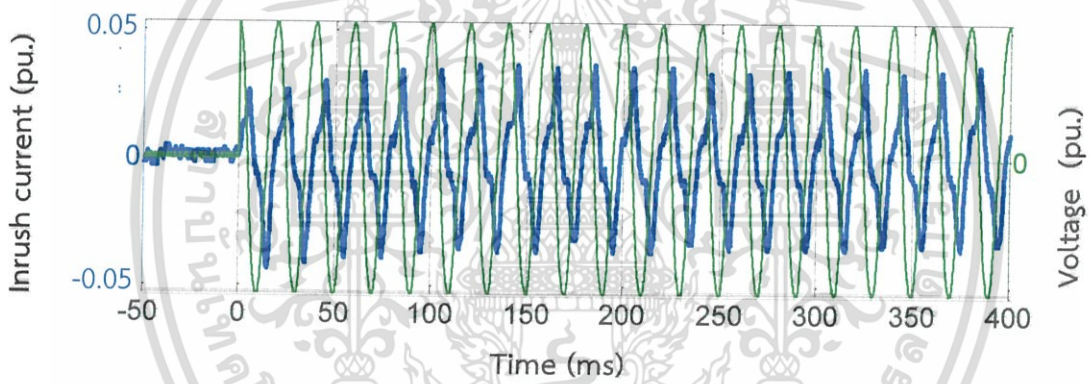


รูปที่ 4.14 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=0.91 T และสวิตช์แรงดันที่มุม 0 องศา ขณะที่ไม่ม่เส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

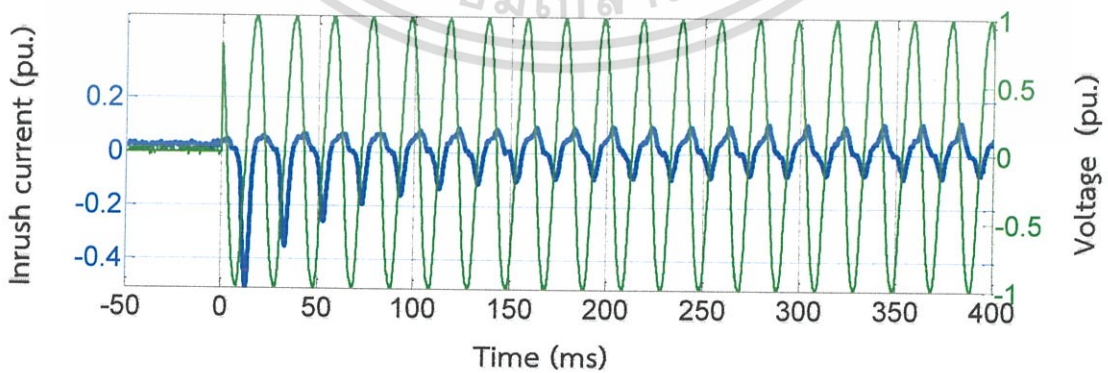
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดันที่มีม 45 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

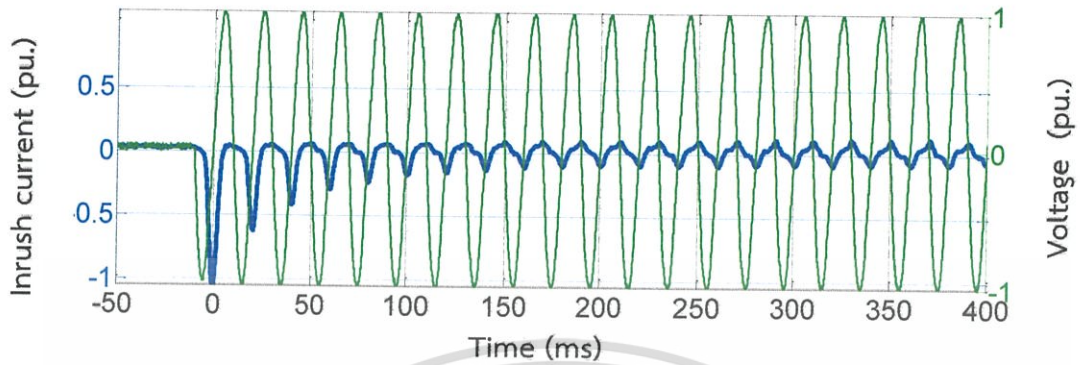


รูปที่ 4.16 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดันที่มีม 90 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

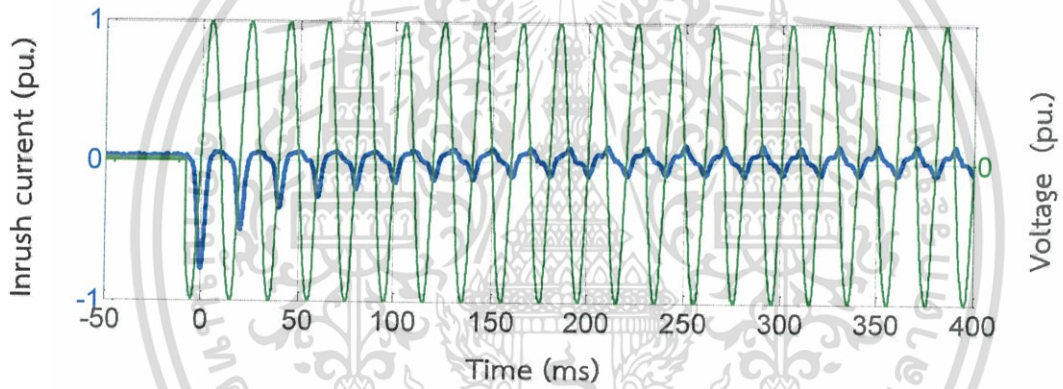


รูปที่ 4.17 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดันที่มีม 135 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

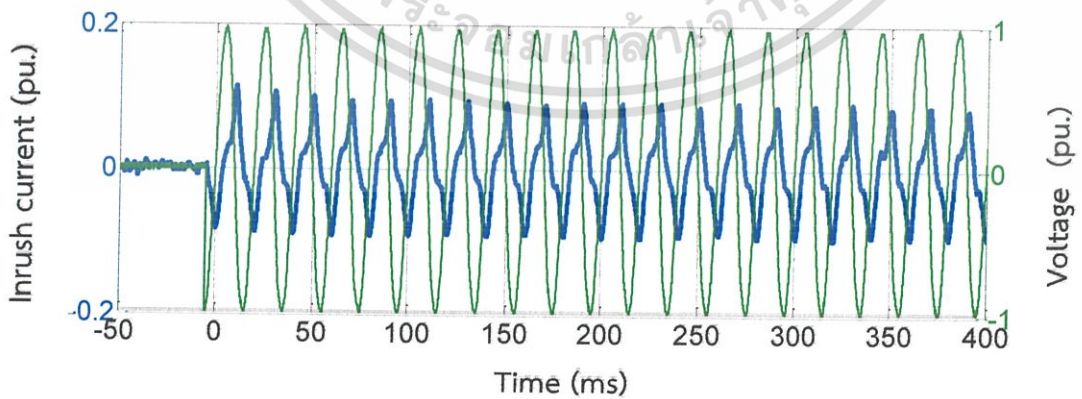
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดันที่มีมุม 180 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

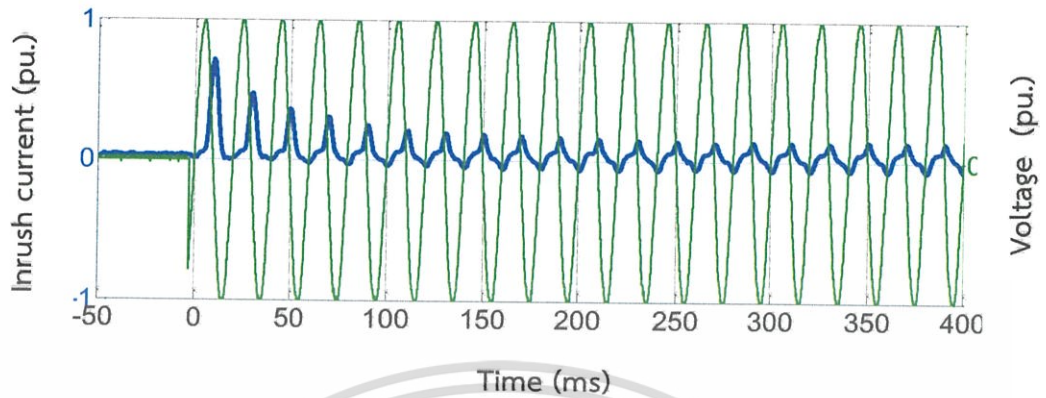


รูปที่ 4.19 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดันที่มีมุม 225 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง



รูปที่ 4.20 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดันที่มีมุม 270 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 315 องศา ขณะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

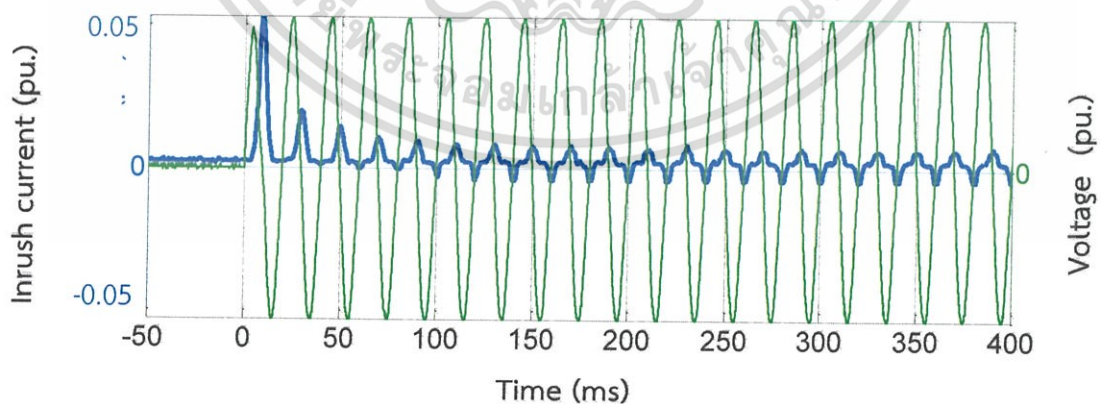


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์เปิดสวิตช์ กระแสจะไหลเข้าสู่หม้อแปลงซึ่งขณะนั้นหม้อแปลงไม่มีฟลักซ์ตกค้าง เมื่อป้อนค่ามุมต่าง ๆ ที่กำหนดได้แก่ 0 , 45 , 90 , 135 , 180 , 225 270 และ 315 จากนั้นกำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.25 T ได้ค่ากระแสอินรัชตามตารางที่ 4.5

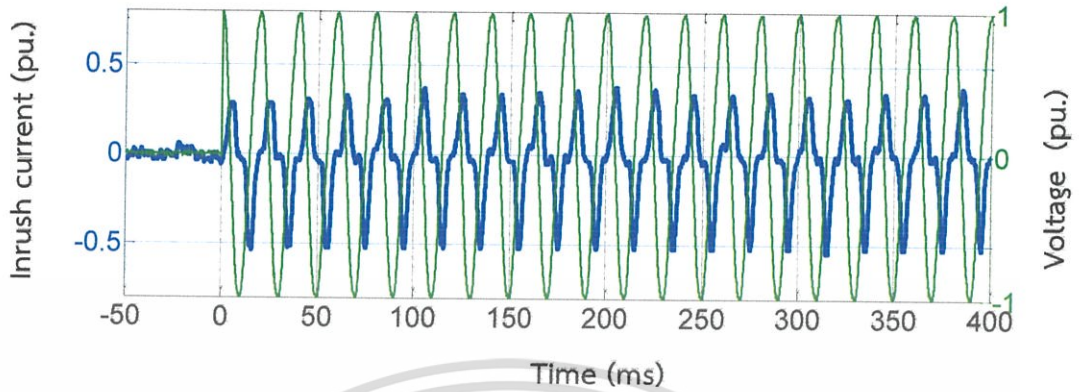
ตารางที่ 4.5 ค่าของกระแสอินรัชที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) = 1.25 T

ครั้งที่ทำการทดลอง	มุมสวิตช์แรงดันไฟฟ้า (องศา)							
	0	45	90	135	180	225	270	315
1	50	33.6	6.4	-20.0	-42.4	-37.6	5.6	44.18
2	52.8	36.8	5.6	-21.6	-41.6	-37.6	4.8	40
3	48	38	5.6	-24.8	-48.0	-37.6	4.8	32

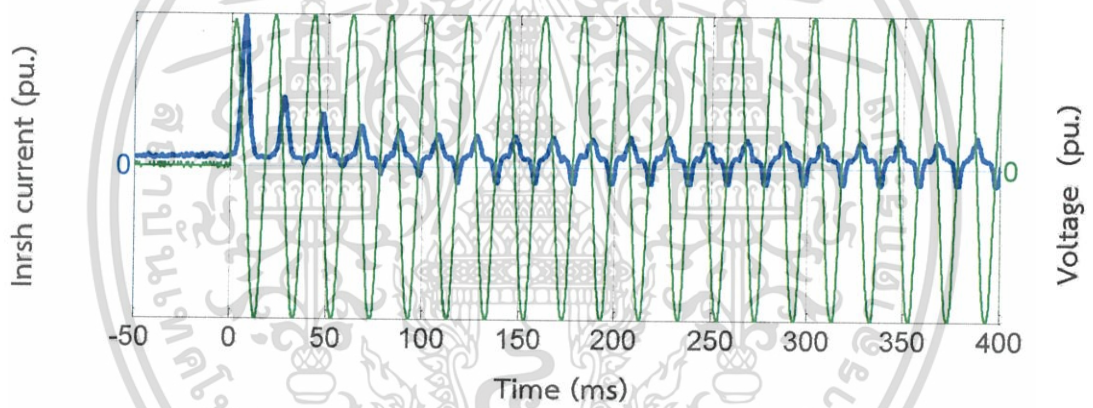


รูปที่ 4.22 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 0 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

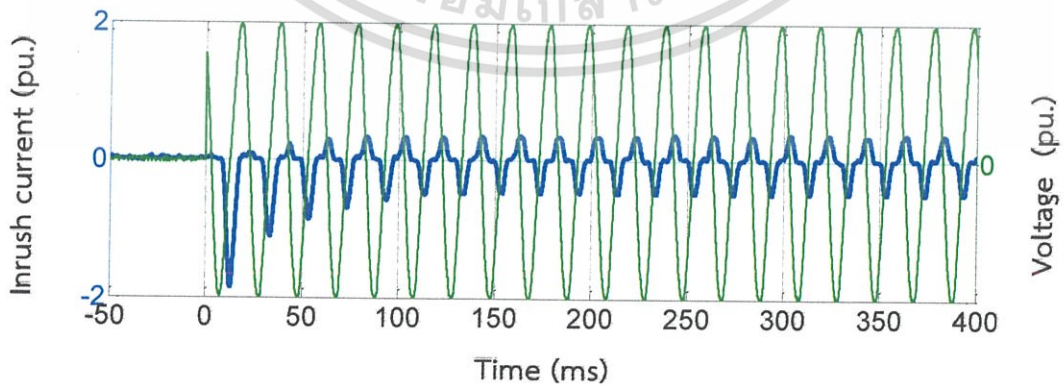
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มีม 45 องศา ขณะที่ไม่ม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

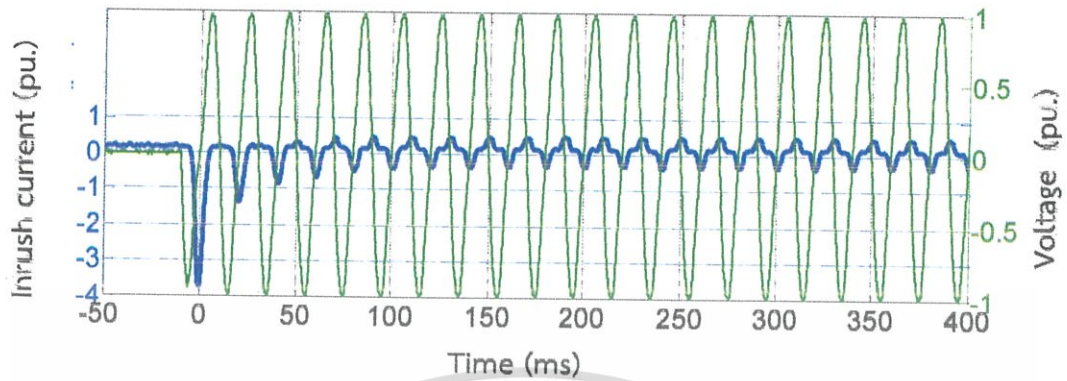


รูปที่ 4.24 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มีม 90 องศา ขณะที่ไม่ม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

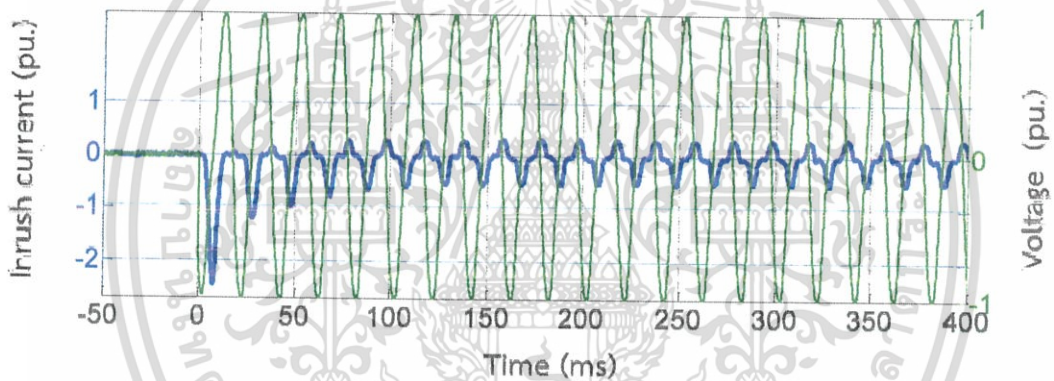


รูปที่ 4.25 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มีม 135 องศา ขณะที่ไม่ม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

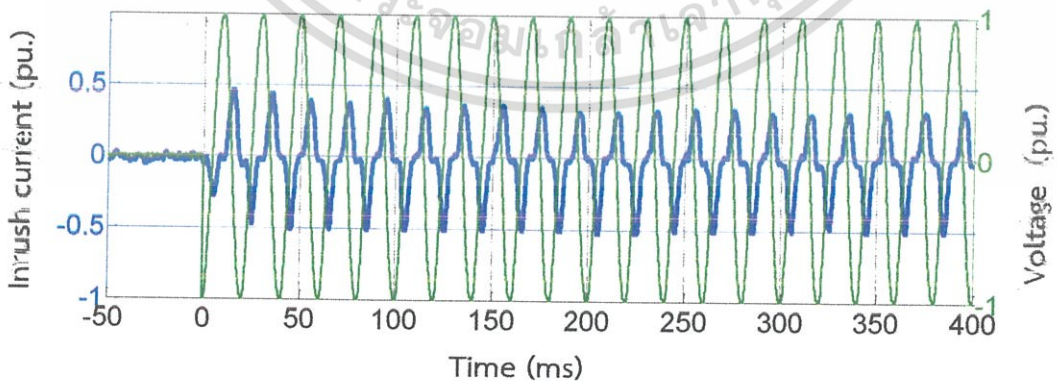
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มีม 180 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

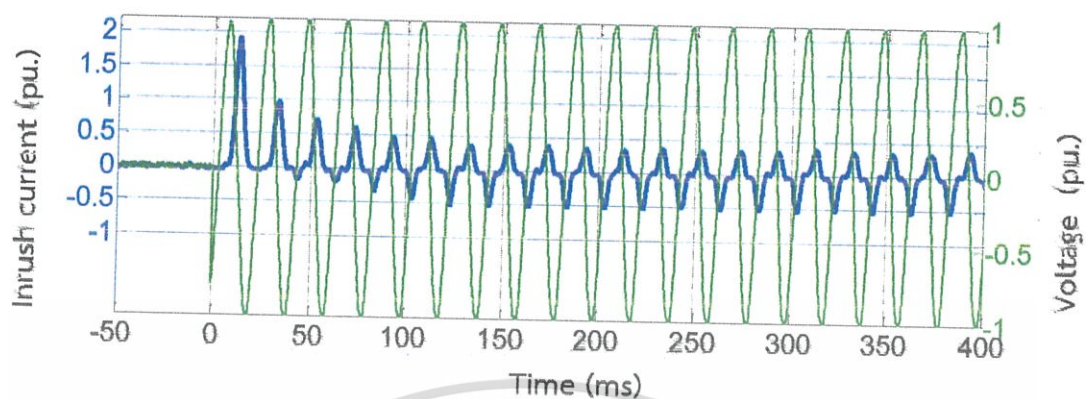


รูปที่ 4.27 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มีม 225 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง



รูปที่ 4.28 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มีม 270 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 สัญญาณกระแสอินrushเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 315 องศา ขณะที่ไม่ได้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง



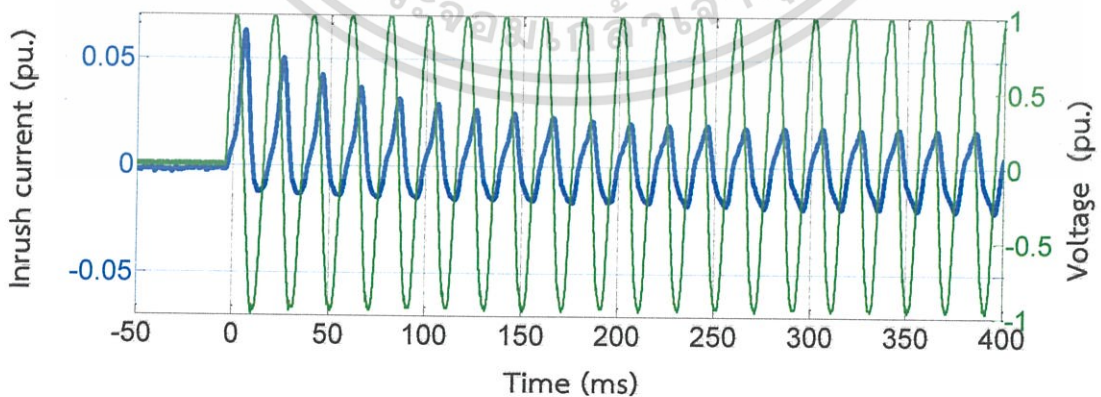
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส มีลักษณะตกค้าง

จากการทดลองเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์เปิดสวิตช์ กระแสจะไหลเข้าสู่หม้อแปลงซึ่งขณะนั้นหม้อแปลงมีลักษณะตกค้าง เมื่อป้อนค่ามุมต่าง ๆ ที่กำหนดได้แก่ 0 , 45 , 90 , 135 , 180 , 225 270 และ 315 จากนั้นกำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 0.45 T ได้ค่ากระแสอินรัชตามตารางที่ 4.6

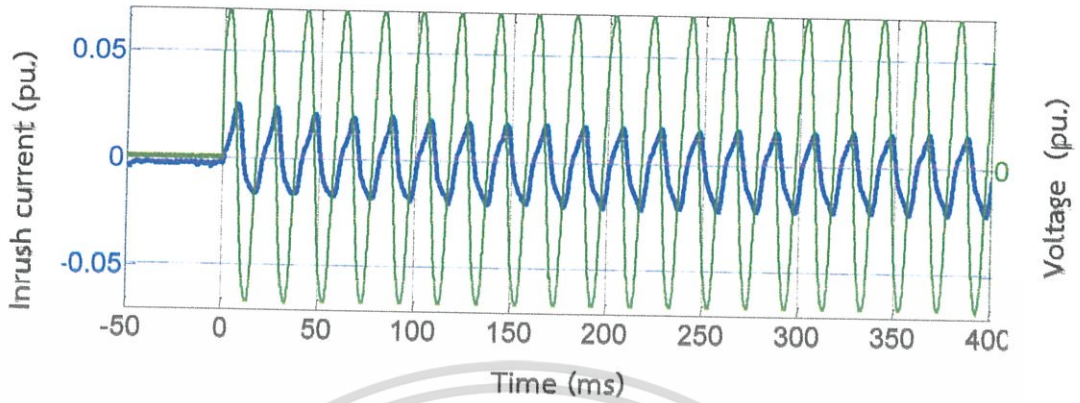
**ตารางที่ 4.6** ค่าของกระแสอินรัชที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) = 0.45 T

ครั้งที่ทำการทดลอง	มุมสวิตช์แรงดันไฟฟ้า (องศา)							
	0	45	90	135	180	225	270	315
1	1.92	1.68	0.24	-0.72	-1.12	-1.0	0.24	0.48
2	0.56	0.4	0.48	-0.4	-0.4	-0.68	0.24	2.6
3	1.2	0.4	0.32	-0.96	-0.8	-0.92	0.44	0.64

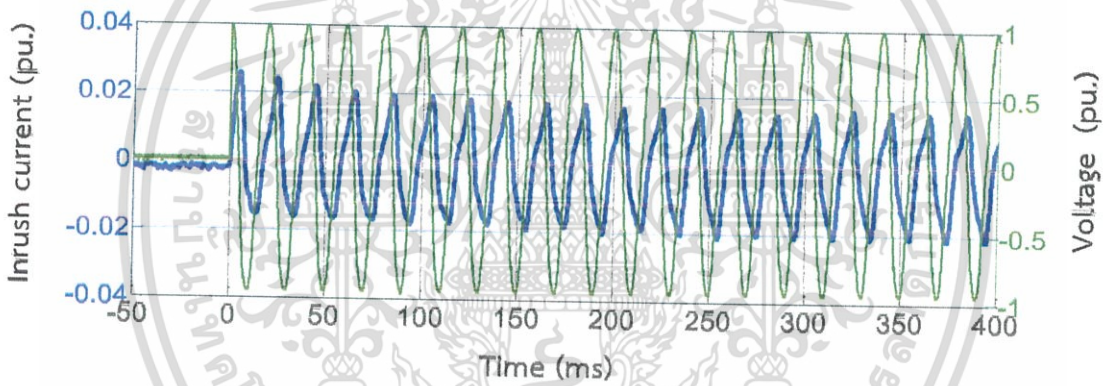


**รูปที่ 4.30** สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=0.45 T และสวิตช์แรงดันที่มุม 0 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

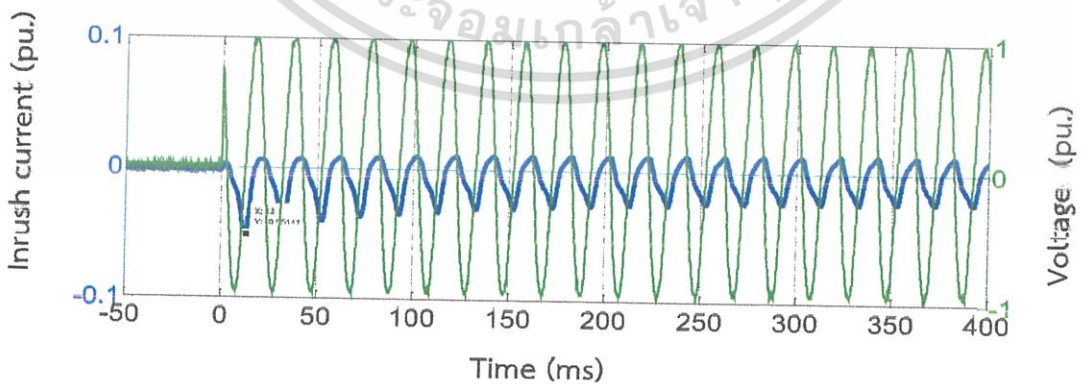
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 สัญญาณกระแสอินrushเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.45$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 45 องศา ขณะที่แม่เหล็กตกค้าง

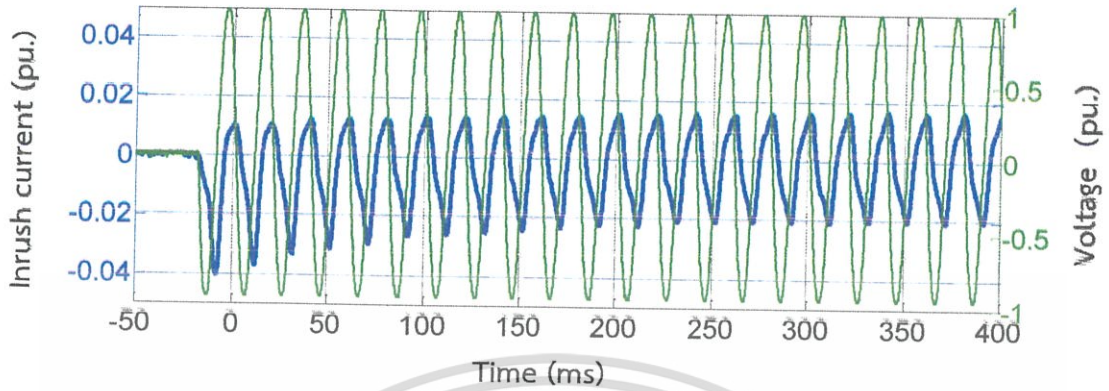


รูปที่ 4.32 สัญญาณกระแสอินrushเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.45$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 90 องศา ขณะที่แม่เหล็กตกค้าง

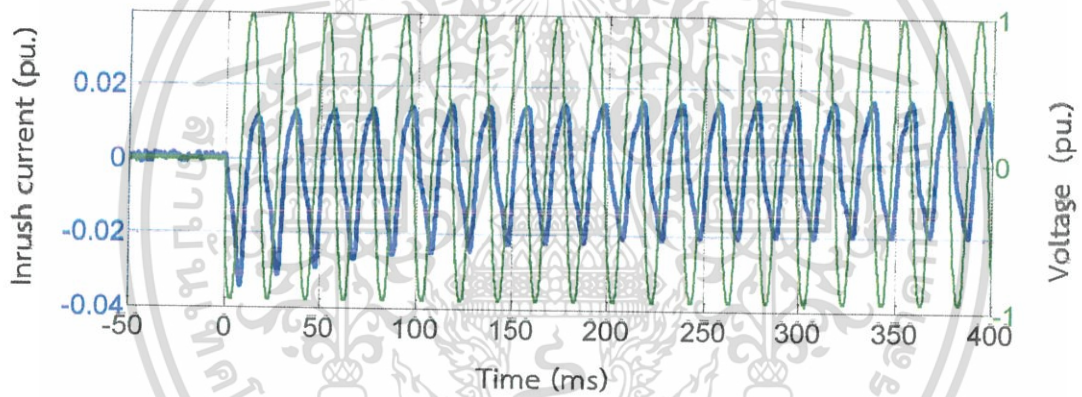


รูปที่ 4.33 สัญญาณกระแสอินrushเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.45$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 135 องศา ขณะที่แม่เหล็กตกค้าง

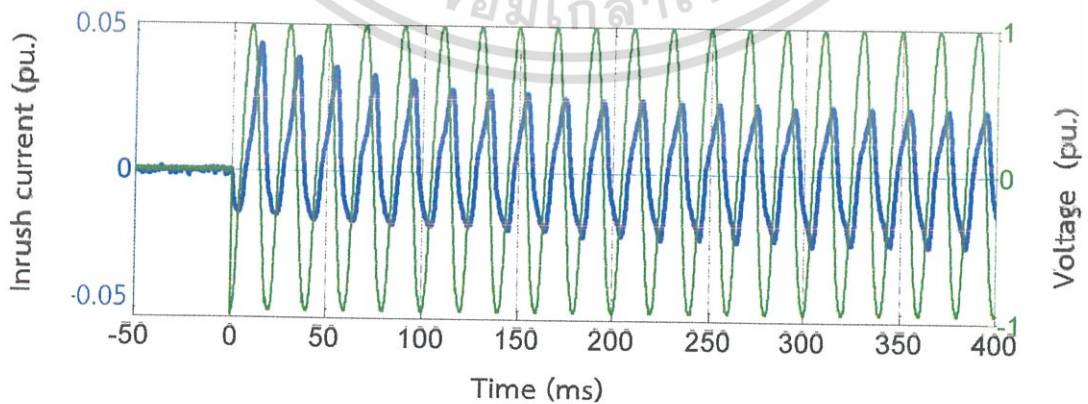
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.45$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 180 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

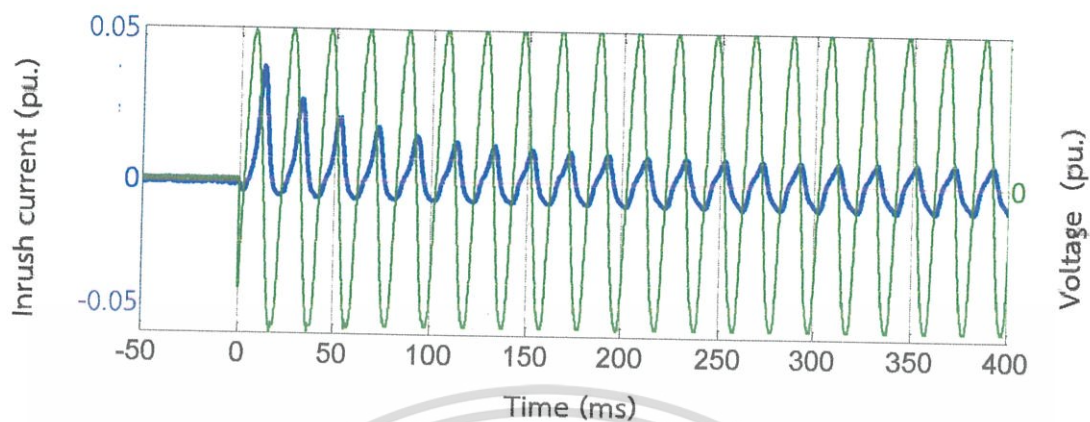


รูปที่ 4.35 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.45$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 225 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง



รูปที่ 4.36 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.45$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 270 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.45$  T และสวิตช์แรงดันที่มี 315 องศา ขณะที่แม่เหล็กตกค้าง

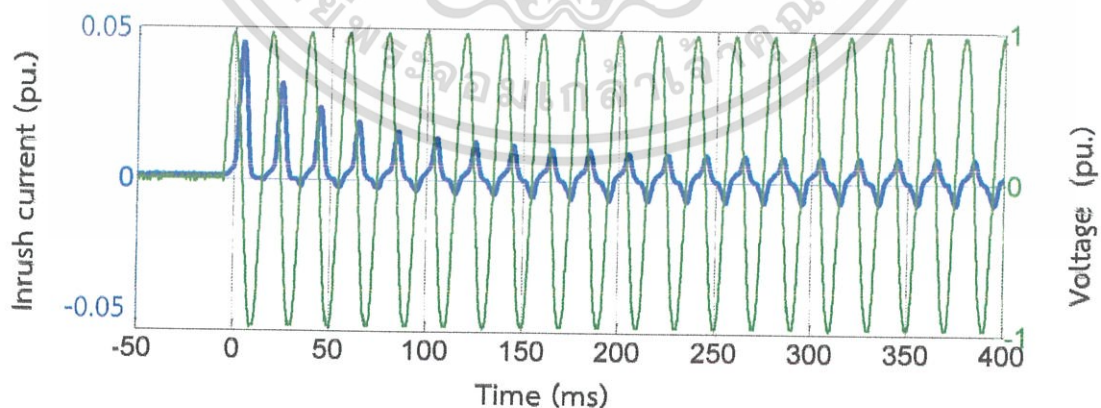


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์เปิดสวิตช์ กระแสจะไหลเข้าสู่หม้อแปลงซึ่งขณะนั้นหม้อแปลงมีฟลักซ์ตกค้าง เมื่อป้อนค่ามุมต่าง ๆ ที่กำหนดได้แก่ 0 , 45 , 90 , 135 , 180 , 225 270 และ 315 จากนั้นกำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 0.45 T ได้ค่ากระแสอินรัชตามตารางที่ 4.7

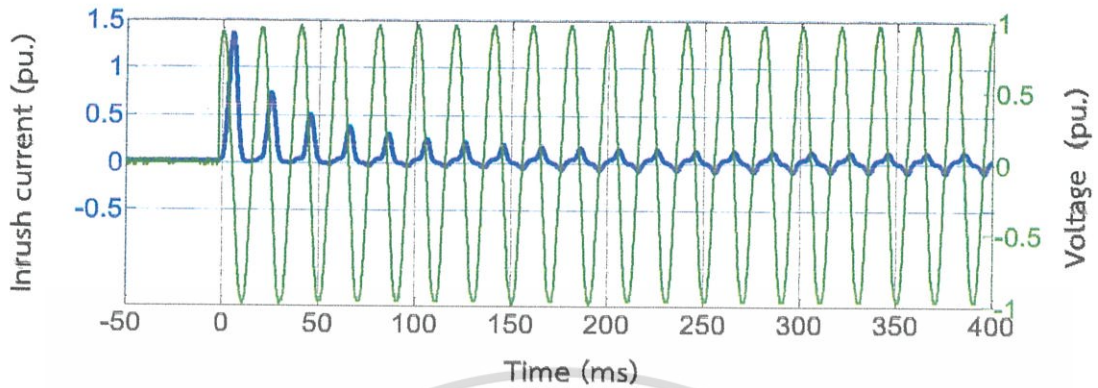
ตารางที่ 4.7 ค่าของกระแสอินรัชที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) = 0.91 T

ครั้งที่ทำการทดลอง	มุมสวิตช์แรงดันไฟฟ้า (องศา)							
	0	45	90	135	180	225	270	315
1	8.8	8	2.4	-6.8	-7.2	-24.4	4.8	6.8
2	12.4	12.4	4.4	-5.6	-7.2	-6	1.2	7.6
3	10.4	18.8	2.4	-11.2	19.2	-22	2.8	7.6

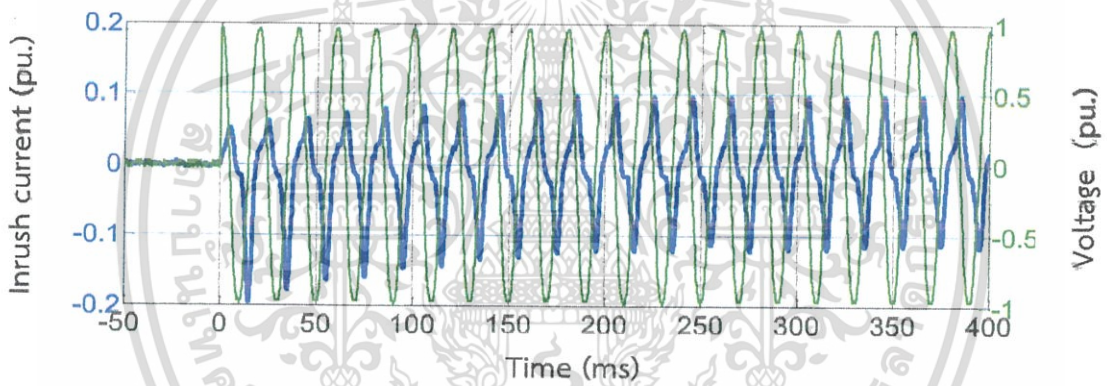


รูปที่ 4.38 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 0 องศา ขณะที่แม่เหล็กตกค้าง

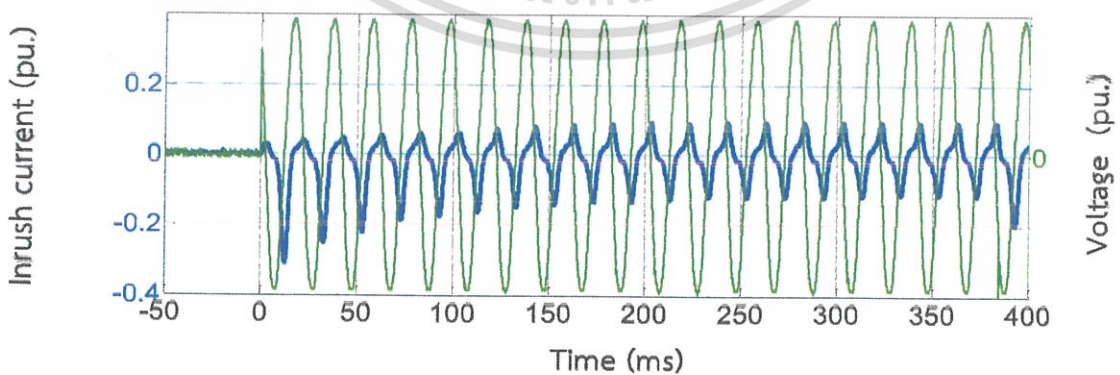
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดันที่มีม 45 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

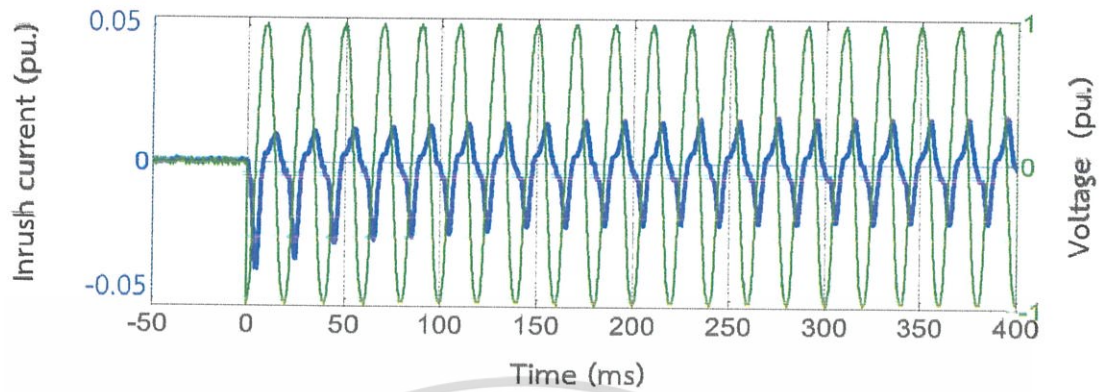


รูปที่ 4.40 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดันที่มีม 90 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

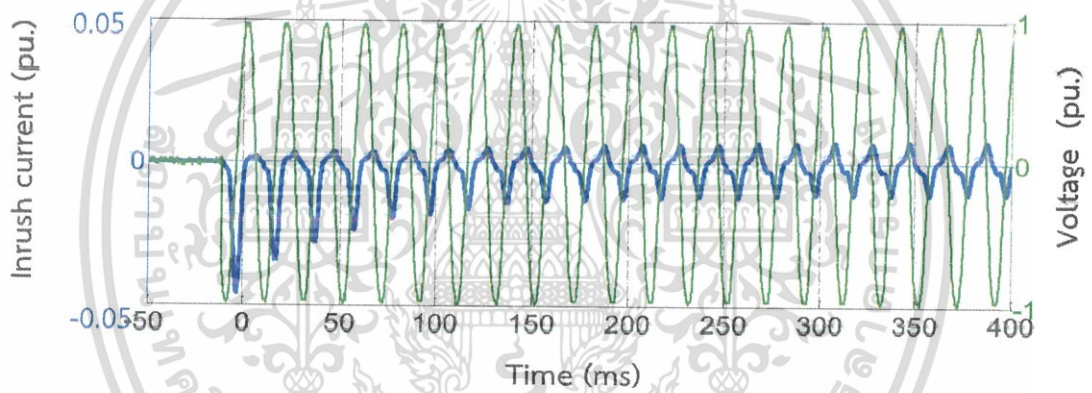


รูปที่ 4.41 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดันที่มีม 135 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

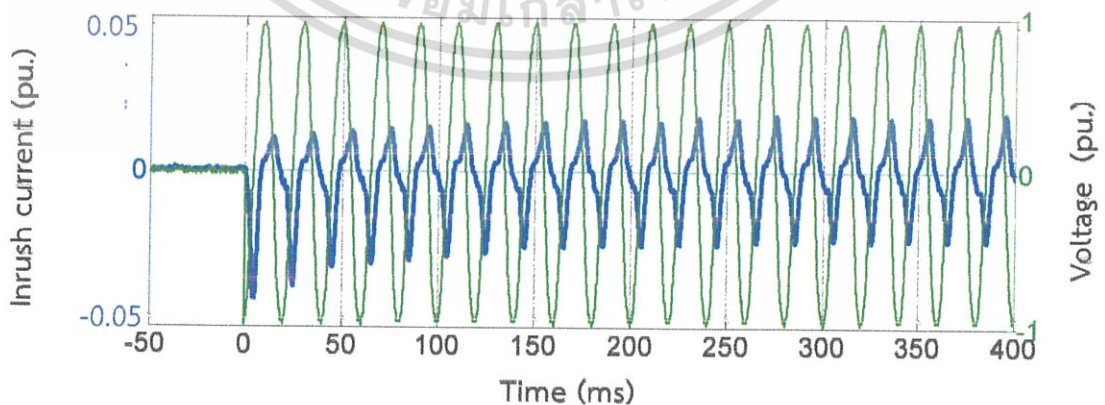
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดันที่มีมุม 180 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

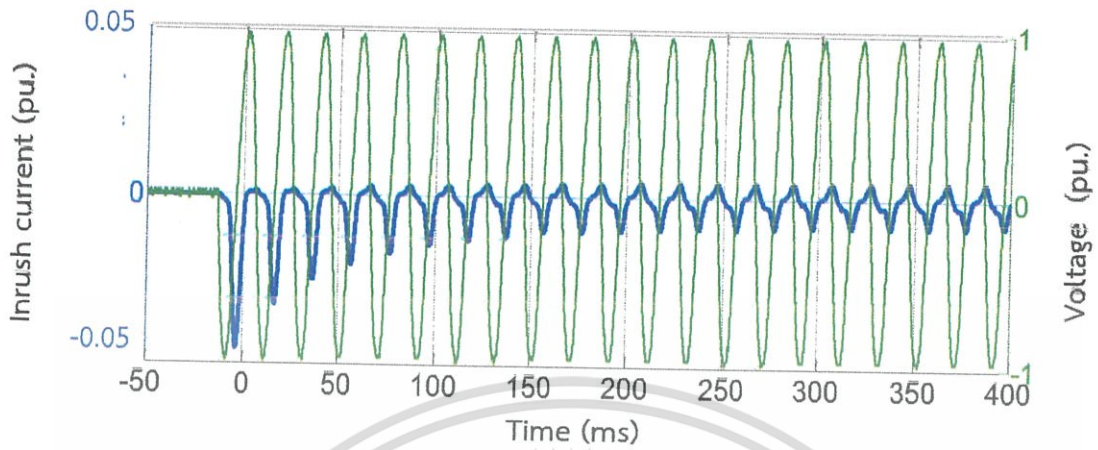


รูปที่ 4.43 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดันที่มีมุม 225 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง



รูปที่ 4.44 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดันที่มีมุม 270 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=0.91$  T และสวิตช์แรงดัน  
ที่มุม 315 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

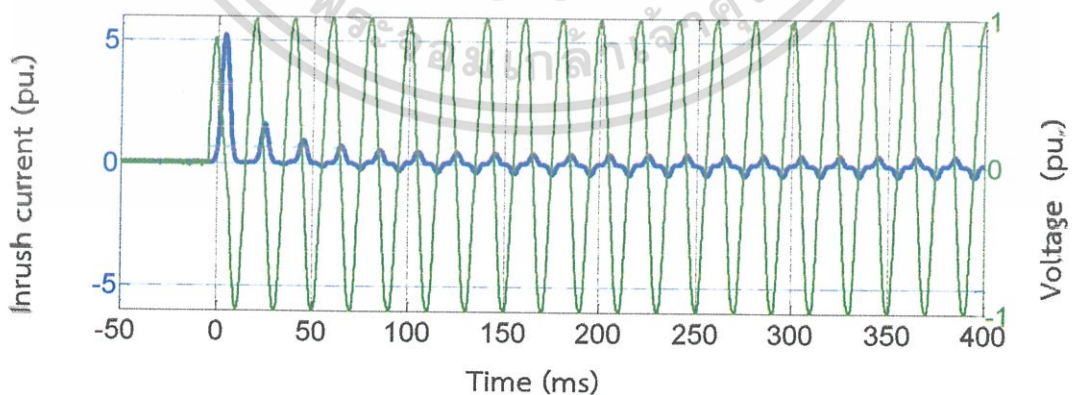


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์เปิดสวิตช์ กระแสจะไหลเข้าสู่หม้อแปลงซึ่งขณะนั้นหม้อแปลงมีฟลักซ์ตกค้าง เมื่อป้อนค่ามุมต่าง ๆ ที่กำหนดได้แก่ 0 , 45 , 90 , 135 , 180 , 225 , 270 และ 315 จากนั้นกำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 0.45 T ได้ค่ากระแสอินรัชตามตารางที่ 4.8

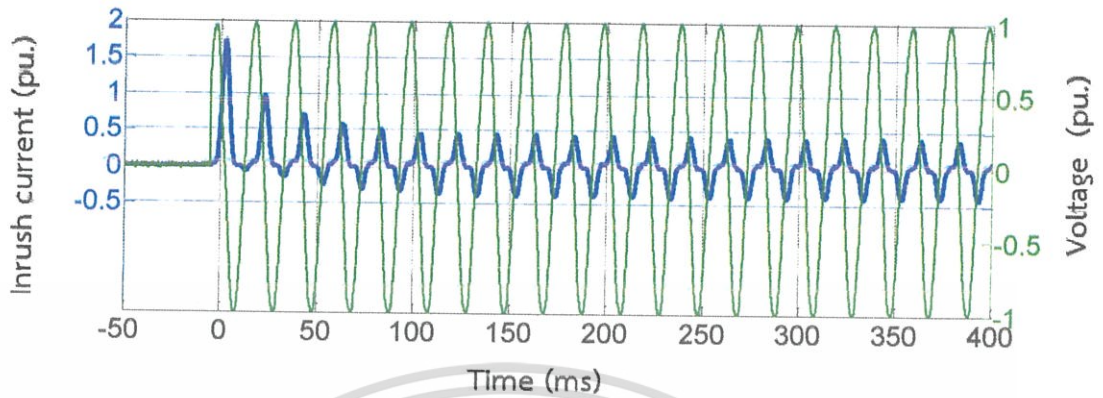
ตารางที่ 4.8 ค่าของกระแสอินรัชที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) = 1.25 T

ครั้งที่ทำการทดลอง	มุมสวิตช์แรงดันไฟฟ้า (องศา)							
	0	45	90	135	180	225	270	315
1	68	63.2	4.8	-32.8	-72.8	-28	7.2	62.4
2	34	37.6	15.3	-64	-64.8	-65.6	13.6	62.4
3	44	34.4	12.8	-63.2	-60.8	-67.2	9.6	62.4

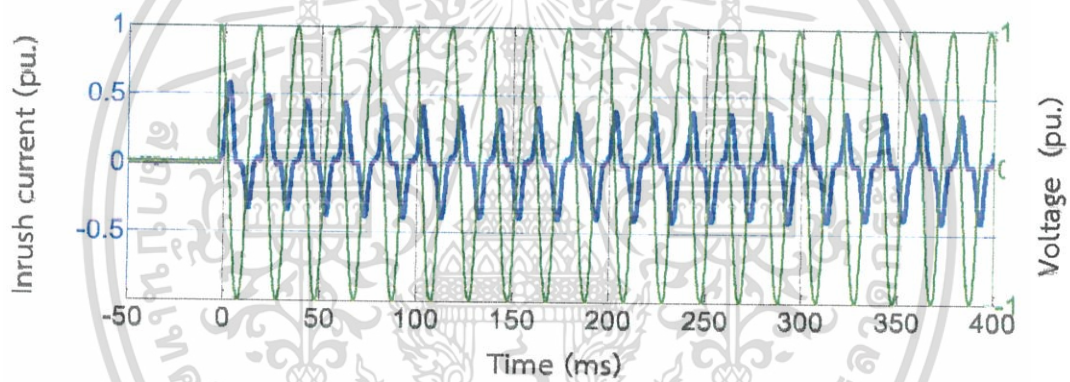


รูปที่ 4.46 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 0 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

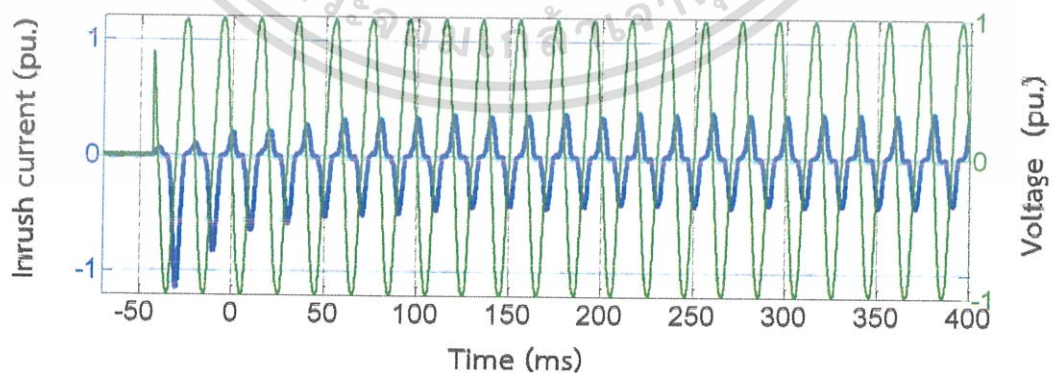
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 45 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

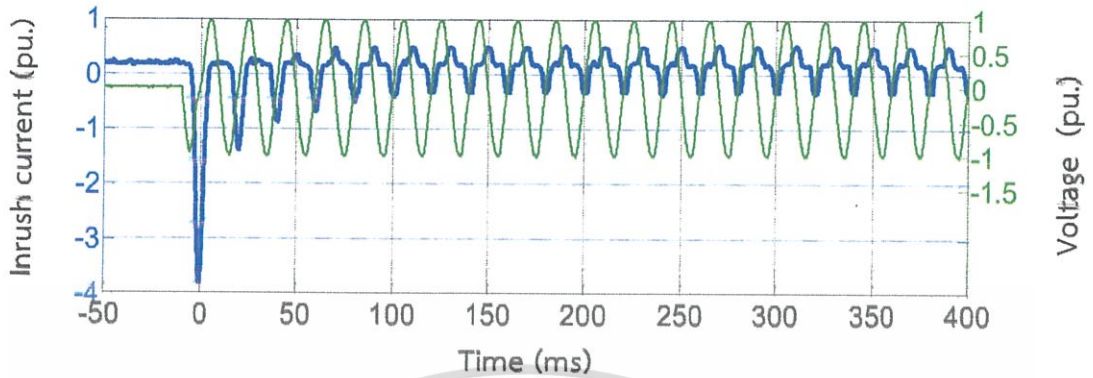


รูปที่ 4.48 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 90 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

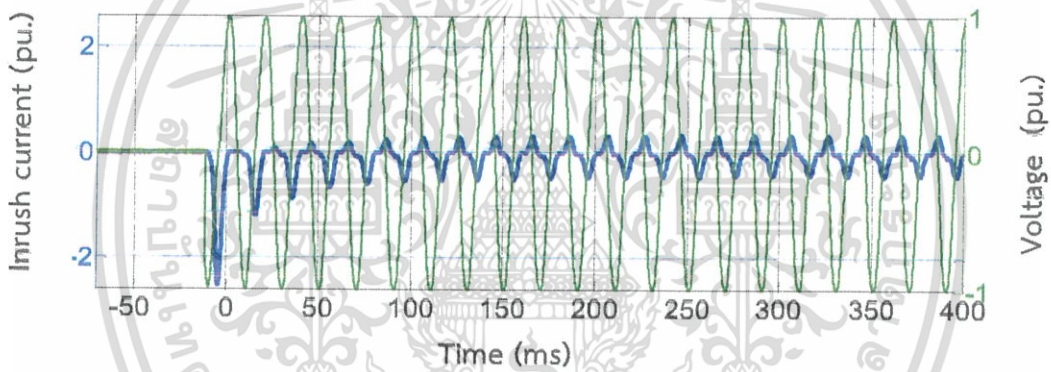


รูปที่ 4.49 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มุม 135 องศา ขณะที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

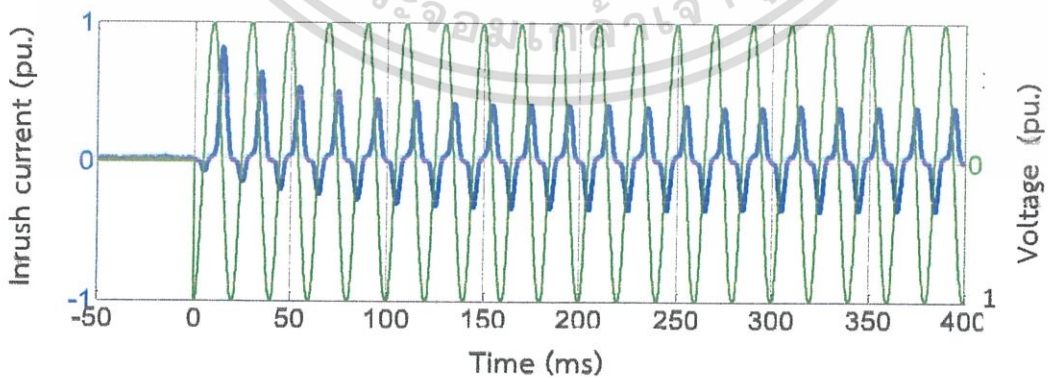
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.50 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มี 180 องศา ขณะที่แม่เหล็กตกค้าง

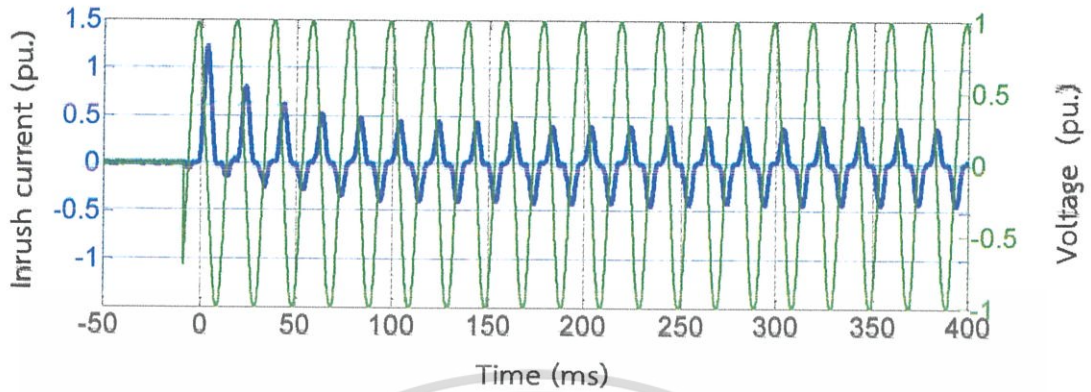


รูปที่ 4.51 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มี 225 องศา ขณะที่แม่เหล็กตกค้าง



รูปที่ 4.52 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดันที่มี 270 องศา ขณะที่แม่เหล็กตกค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



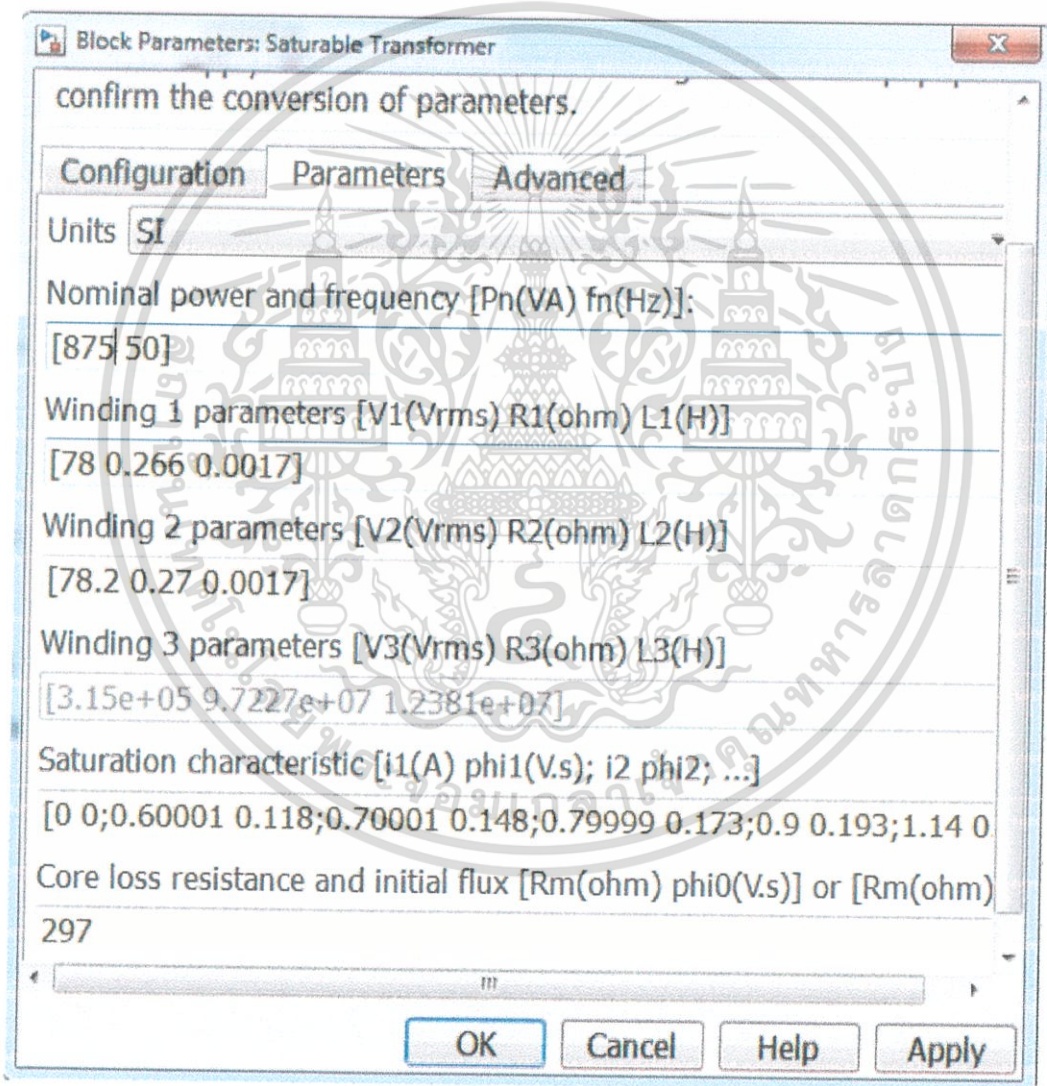
รูปที่ 4.53 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตช์แรงดัน  
ที่มุม 315 องศา ขณะที่มิเตอร์แม่เหล็กตกค้าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยโปรแกรม MATLAB SIMULINK ศึกษาลักษณะกระแสอินรัชเมื่อเปลี่ยนลักษณะ B – H curve

การจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยโปรแกรม MATLAB SIMULINK เพื่อศึกษาลักษณะกระแสอินรัชนั้น จำเป็นต้องใส่ค่าพารามิเตอร์ใน block parameter of saturable transformer เพื่อ simulation ศึกษาลักษณะกระแสอินรัช



รูปที่ 4.54 Block Parameter of Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.1 ค่าพารามิเตอร์ใน Block parameter of saturable transformer

Nominal power and frequency [(VA) (Hz)] คือ ค่า base ของหม้อแปลงไฟฟ้า

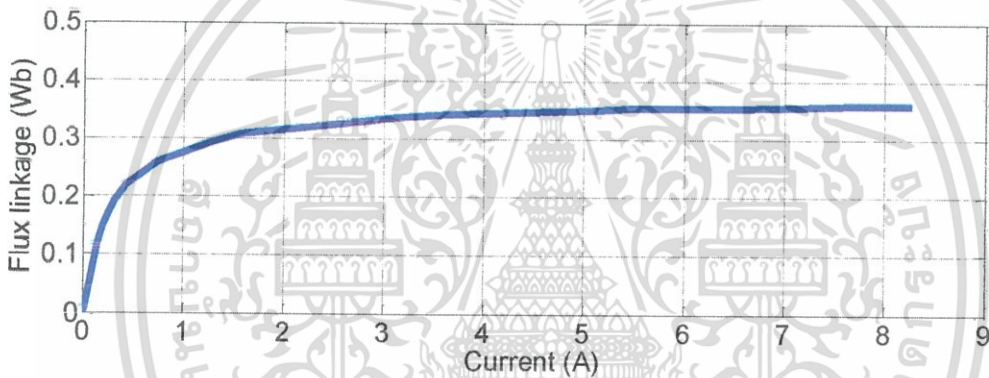
Winding parameter [(Vrms) (Ohm) (H)] คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของขดลวด , ค่าความต้านทานขดลวด  
ค่าความเหนี่ยวนำ

Saturation characteristic คือ ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์เกี่ยวค้ำและค่ากระแสไฟฟ้า

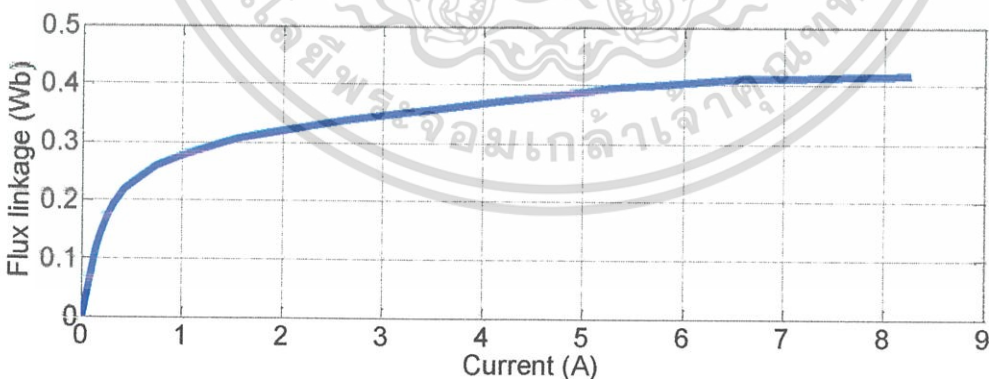
Core loss resistance คือ ความต้านทานแกนเหล็ก

โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์จะเป็นการจำลองผลของกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีลักษณะ

B-H curve ที่ต่างกัน 4 แบบ ดังนี้

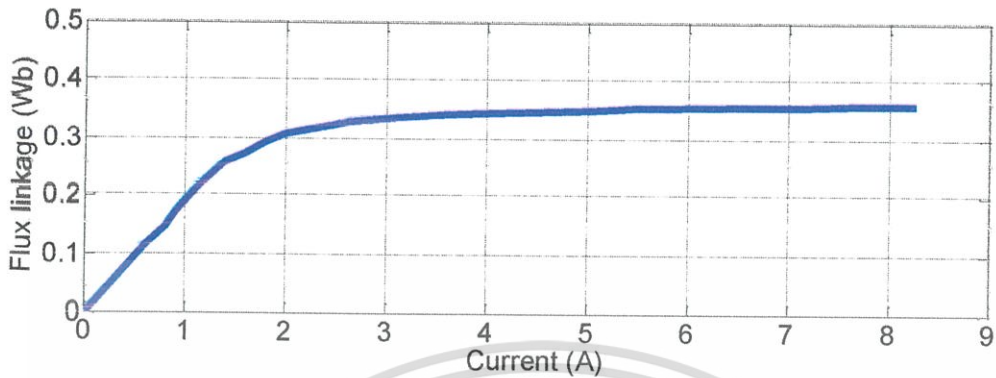


รูปที่ 4.55 B-H curve แบบที่ 1 ความชันช่วง linear point มีค่ามาก ความชันช่วง saturation มีค่าน้อย

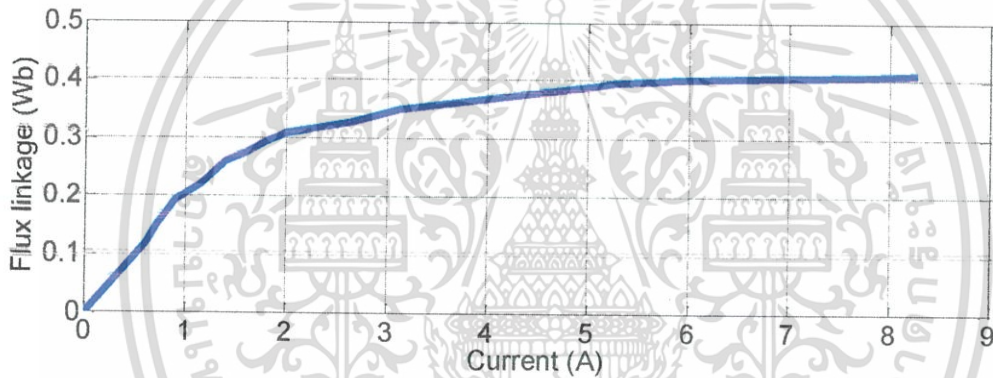


รูปที่ 4.56 B-H curve แบบที่ 2 ความชันช่วง linear point มีค่ามาก ความชันช่วง saturation มีค่ามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.57 B-H curve แบบที่ 3 ความชันช่วง linear point มีค่าน้อย ความชันช่วง saturation มีค่าน้อย



รูปที่ 4.58 B-H curve แบบที่ 4 ความชันช่วง linear point มีค่าน้อย ความชันช่วง saturation มีค่ามาก

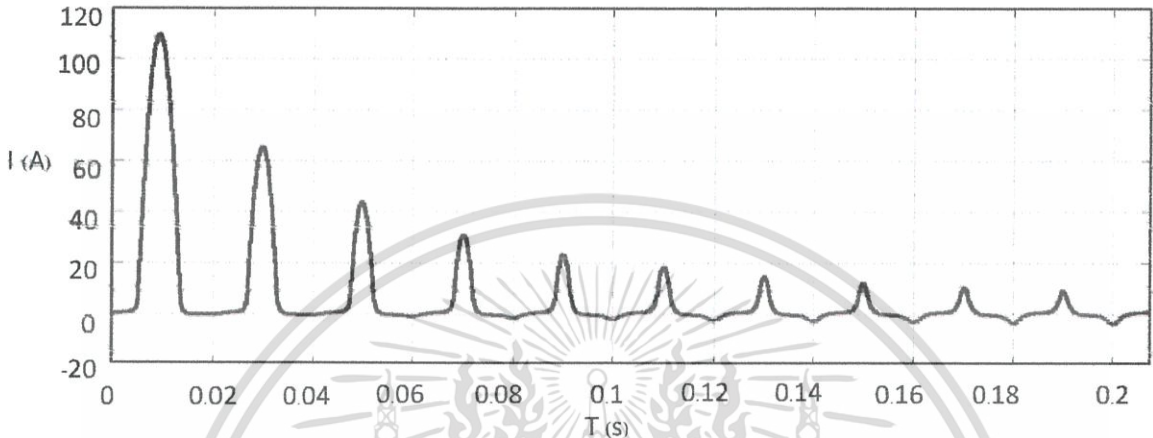
ตารางที่ 4.9 ค่าของกระแสในรีขที่สภาวะเริ่มแรก, สภาวะคงตัว และเวลาที่เข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T ที่มุม 0 องศา

ลักษณะกราฟ B-H	กระแสในรีขที่สภาวะเริ่มแรก (แอมแปร์)	กระแสในรีขที่สภาวะคงตัว (แอมแปร์)	เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที)
แบบที่ 1	109.4	5.36	2
แบบที่ 2	56.5	3.41	3
แบบที่ 3	109.4	5.36	2
แบบที่ 4	56.5	3.41	3

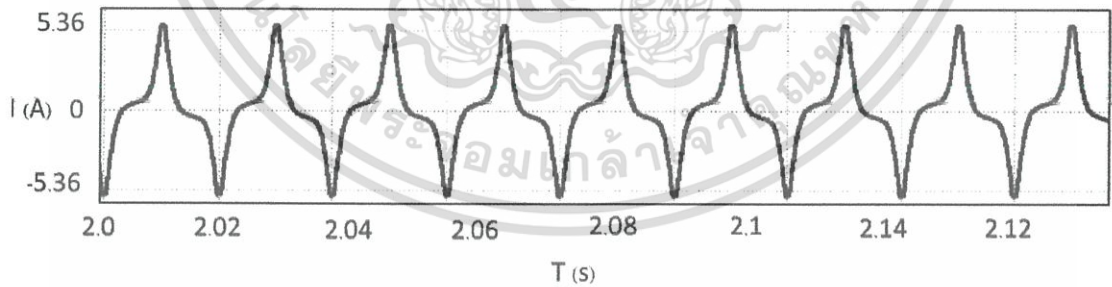
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะกระแสในรีซท์ที่ B-H curve แบบต่างๆดังนี้

แบบที่ 1 ความชันช่วง linear point มีค่ามาก ความชันช่วง saturation มีค่าน้อย



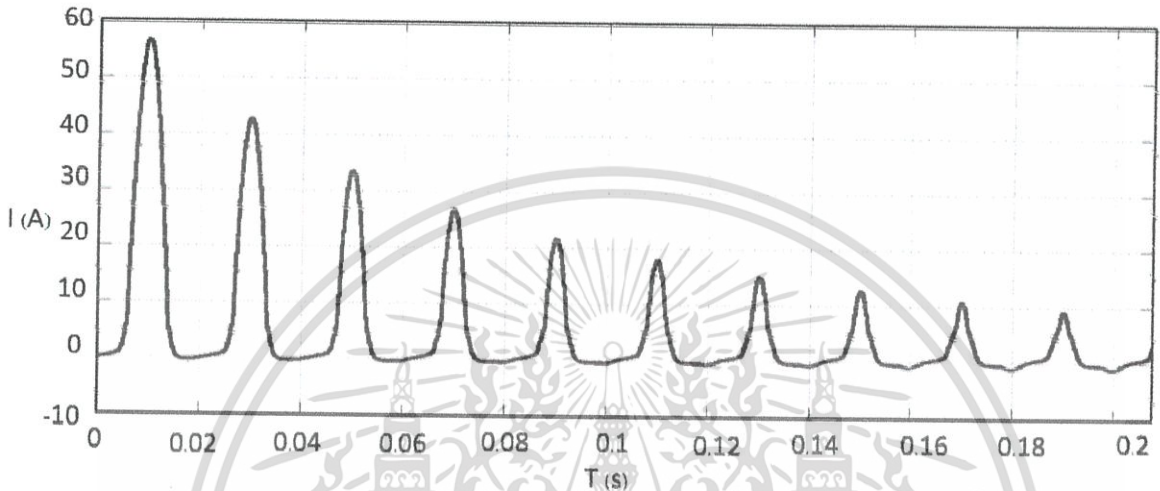
รูปที่ 4.59 ลักษณะกระแสในรีซท์ของกราฟ B-H curve แบบที่1เมื่อหม้อแปลงกระตุ้นถูกที่  $B=1.25$  T แรงดันที่มม 0 องศา



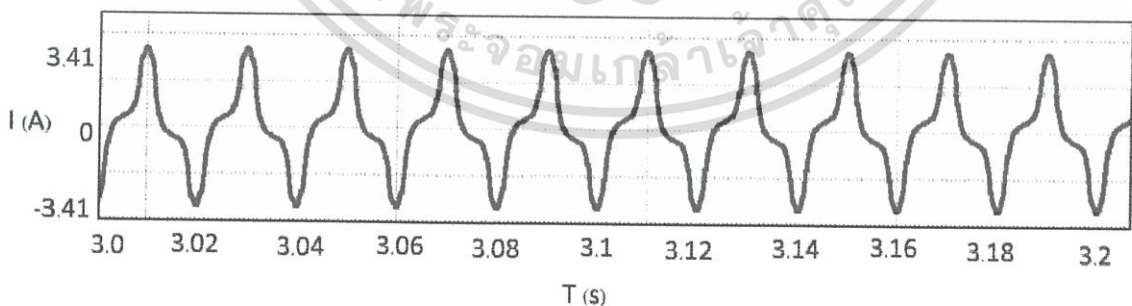
รูปที่ 4.60 กระแสในรีซท์ในสภาวะคงตัวของกราฟ B-H curve แบบที่1เมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้น  $B=1.25$  T ที่มม 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 2 ความชันช่วง linear point มีค่ามาก ความชันช่วง saturation มีค่ามาก



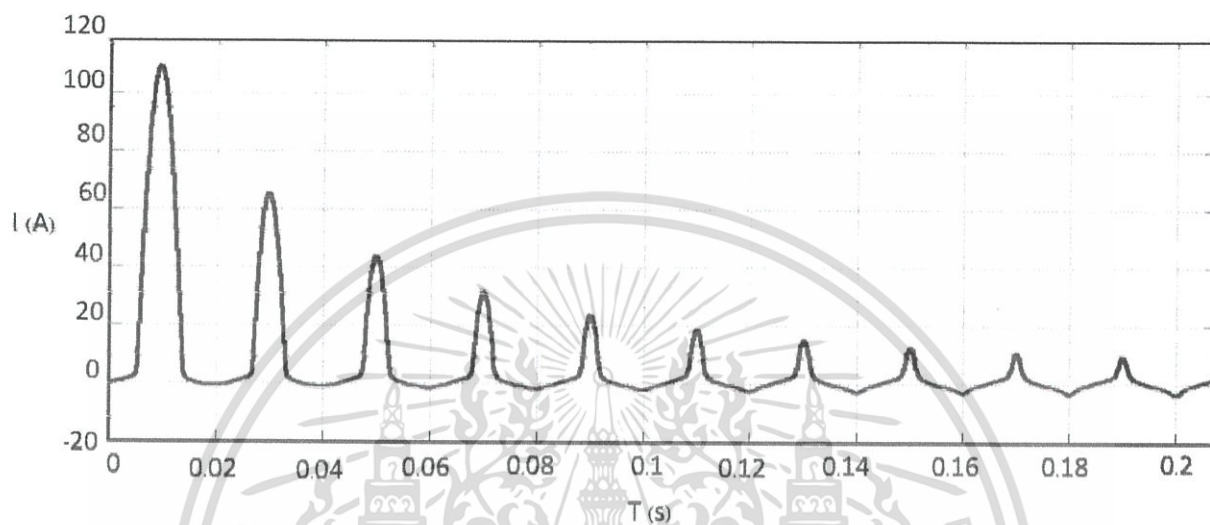
รูปที่ 4.61 ลักษณะกระแสอินรัชของกราฟ B-H curve แบบที่ 2 เมื่อหม้อแปลงกระตุ้นถูกที่  $B=1.25$  T แรงดันที่มม 0 องศา



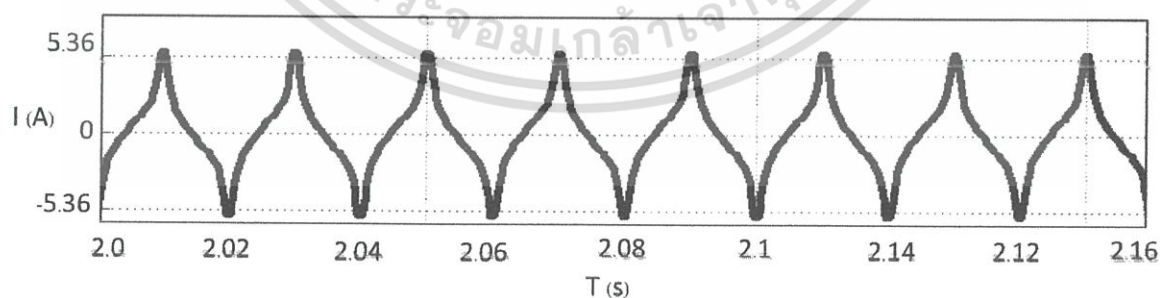
รูปที่ 4.62 ลักษณะกระแสอินรัชในสภาวะคงตัวของกราฟ B-H curve แบบที่ 2 เมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้น  $B=1.25$  T ที่มุม 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 3 ความชันช่วง linear point มีค่าน้อย ความชันช่วง saturation มีค่าน้อย



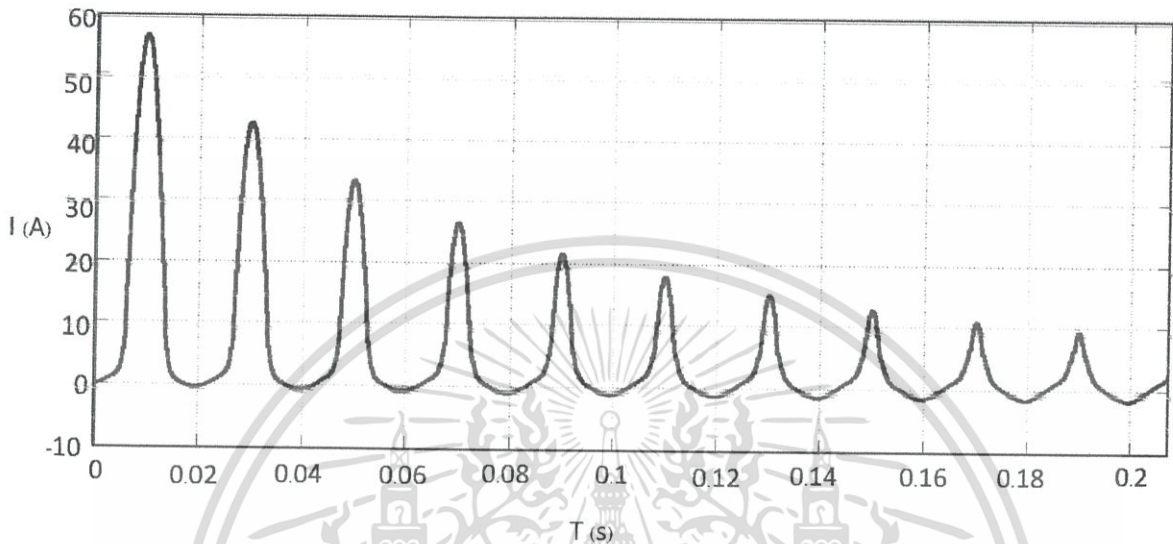
รูปที่ 4.63 ลักษณะกระแสอินรัชของกราฟ B-H curve แบบที่3เมื่อหม้อแปลงกระตุ้นถูกที่  $B=1.25$  T แรงดันที่มม 0 องศา



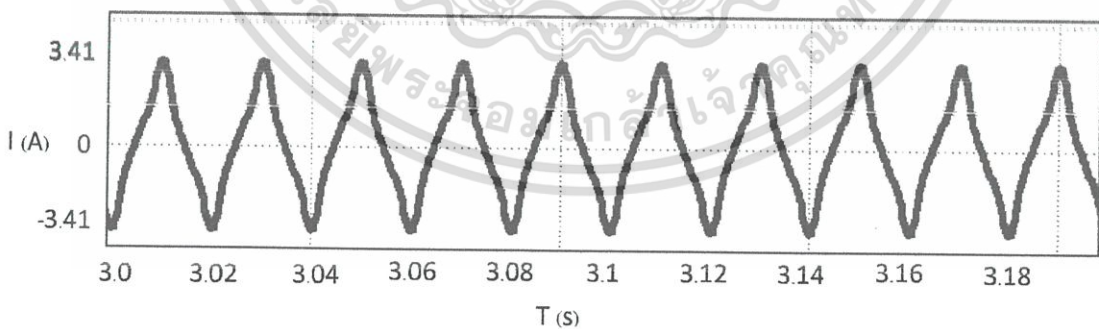
รูปที่ 4.64 ลักษณะกระแสอินรัชในสภาวะคงตัวของกราฟ B-H curve แบบที่3เมื่อหม้อแปลงกระตุ้น  $B=1.25$  T ที่มม 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 4 ความชันช่วง linear point มีค่าน้อย ความชันช่วง saturation มีค่ามาก



รูปที่ 4.65 ลักษณะกระแสอินรัชของกราฟ B-H curve แบบที่4เมื่อหม้อแปลงกระตุ้นถูกที่  $B=1.25$  T แรงดันที่มม 0 องศา



รูปที่ 4.66 ลักษณะกระแสอินรัชในสภาวะคงตัวเมื่อมีลักษณะกราฟ B-H curve แบบที่4เมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่  $B=1.25$  T และสวิตซ์แรงดันที่มม 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 5.1 บทนำ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับขนาดและลักษณะการเกิดของกระแสอินรัช ขณะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งกระแสอินรัชนี้จะส่งผลให้ระบบป้องกันไฟฟ้าทำงานผิดพลาด เนื่องจากกระแสอินรัชมีลักษณะคล้ายกับการเกิดฟอลต์ (fault) ซึ่งในการทดลองได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส กับกระแสอินรัชว่าแต่ละมุมของแรงดันมีผลต่อลักษณะการเกิดและขนาดของกระแสอินรัชอย่างไร

การทดลองแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

กรณี 1 การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะต่างๆและวิเคราะห์ค่าของกระแสในหม้อแปลงที่มีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่างกันทั้งที่ไม่มีฟลักซ์ตกค้าง และมีฟลักซ์ตกค้างโดยวิธีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มุมต่างๆ

กรณี 2 ผลจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation) โดยโปรแกรม MATLAB เพื่อศึกษาลักษณะกระแสอินรัชเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง B-H curve

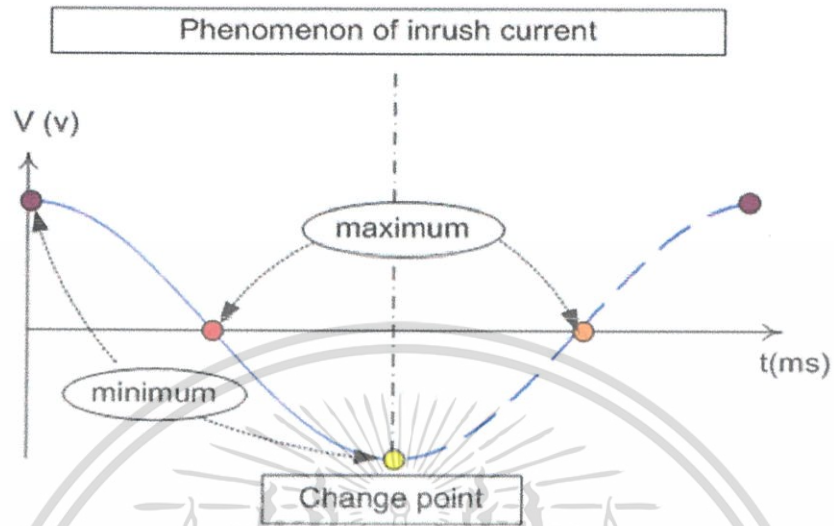
#### 5.2 สรุปผลการทดลอง

กรณีที่ 1 การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะต่างๆและวิเคราะห์ค่าของกระแสในหม้อแปลงที่มีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่างกันทั้งที่ไม่มีฟลักซ์ตกค้าง และมีฟลักซ์ตกค้างโดยวิธีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มุมต่างๆ

จากการทดลองพบว่า มุมของแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้ามีผลต่อลักษณะการเกิดและขนาดของกระแสอินรัชจริง โดยจากผลการทดลองที่ได้ สามารถสรุปได้เป็น 3 ข้อ ตามความสัมพันธ์ของปัจจัยการเกิดกระแสอินรัชได้ดังนี้คือ

1. ความสัมพันธ์ระหว่างมุมแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากับการเกิดกระแสอินรัชเมื่อสับสวิตช์ที่มุมแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0 องศา จะได้ค่ากระแสอินรัชที่สูง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวว่า เมื่อมุมแรงดันไฟฟ้าใกล้ๆ 0 องศา จะเกิดกระแสอินรัชที่สูงสุด โดยปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุด จนเป็นสองเท่าของค่ายอดปกติ ส่งผลให้แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวทำให้เกิดกระแสอินรัชขึ้น หลังจากนั้นกระแสจะเข้าสู่สภาวะคงตัวเนื่องจากการสูญเสียในวงจรไฟฟ้า ที่เกิดจากความต้านทานระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า แต่เมื่อสับสวิตช์ที่มุมแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 90 องศา ดังรูปที่ 5.1 กระแสอินรัชจะเกิดน้อยมากหรือแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

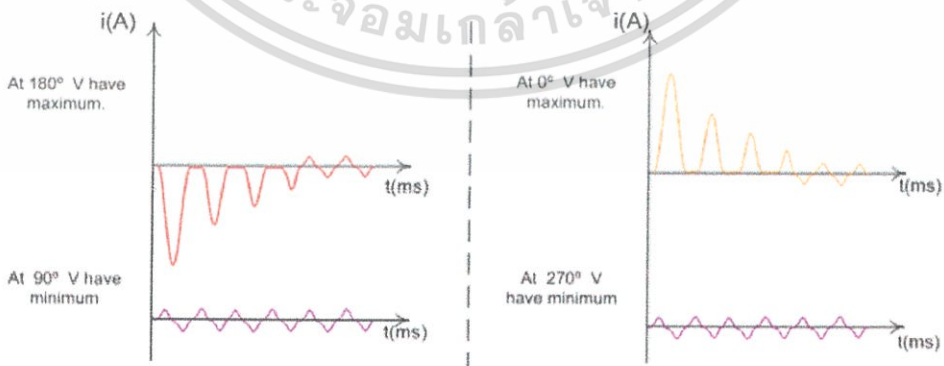


รูปที่ 5.1 ตำแหน่งของการสวิตช์มุมแรงดันที่ทำให้เกิดกระแสอินรัชสูงสุดและต่ำสุด

2. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลักซ์ตกค้างกับการเกิดกระแสอินรัช

เมื่อนำผลการทดลองที่มุมแรงดันไฟฟ้าเดียวกันมาเปรียบเทียบกัน ในกรณีที่มีฟลักซ์ตกค้างและไม่มีฟลักซ์ตกค้างพบว่า กรณีที่มีฟลักซ์ตกค้างจะมีขนาดของกระแสอินรัชที่มากกว่ากรณีที่ไม่มีฟลักซ์ตกค้าง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า เมื่อมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ขนาดของกระแสอินรัชจะมีค่าสูงกว่าตอนที่ไม่มีฟลักซ์ตกค้าง ส่วนทิศทางการเกิดของกระแสอินรัชนั้นจะเป็นไปตามทิศทางของฟลักซ์ เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าติดลบจะทำให้แอมพลิจูดรูปคลื่นกระแสอินรัชเป็นลบแต่ถ้าฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเป็นบวกจะทำให้แอมพลิจูดรูปคลื่นกระแสอินรัชเป็นบวก

ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ทิศทางของรูปคลื่นกระแสอินรัชแปรตามทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับการเกิดกระแสอินรัช

เมื่อนำผลการทดลองที่มุมแรงดันไฟฟ้าเดียวกัน แต่มีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่างกัน มาเปรียบเทียบกันพบว่า ที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่างกัน จะทำให้ได้ขนาดของกระแสอินรัชที่ต่างกัน โดยที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 0.45 T จะมีขนาดของกระแสอินรัชน้อยที่สุด ส่วนที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 1.25 T จะมีขนาดของกระแสอินรัชสูงที่สุด

กรณี 2 ผลจำลองทางคอมพิวเตอร์(Simulation)โดยโปรแกรม MATLABเพื่อศึกษา ลักษณะกระแสอินรัชเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง B-H curve

เมื่อทำการจำลองลักษณะของกราฟ B-H curve เป็น 4 ลักษณะ พบว่า ผลจากการเปลี่ยนแปลงของกราฟ B-H curve ในช่วงที่แกนเหล็กใกล้จะอิ่มตัว ทำให้ขนาดของกระแสอินรัชลดลง แต่ไม่ส่งผลต่อการเข้าสู่สภาวะคงตัวของกระแสอินรัช - เมื่อวิเคราะห์ความชันในช่วง linear ของกราฟ B-H curve พบว่า กราฟที่มีความชันในช่วง linear มาก จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกในรูปคลื่นกระแสอินรัช ส่วนกราฟที่มีความชันในช่วง linear น้อย จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกในรูปคลื่นกระแสอินรัชน้อยกว่า

### 5.3 วิจัยารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง ค่าที่ได้จากการทดลองอาจมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากไม่สามารถหาค่าฟลักซ์ตกค้างได้อย่างถูกต้อง จึงได้ใช้วิธีตามทฤษฎีคือ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับหม้อแปลงจนถึงค่าพิกัด จากนั้นลดระดับแรงดันลงทีละน้อยอย่างต่อเนื่อง จะทำให้ค่าฟลักซ์ตกค้างลดลงจนเกือบศูนย์ รวมไปถึงในการทดลองกรณีที่มีค่าฟลักซ์ตกค้าง ก็ไม่สามารถรู้ว่าปริมาณฟลักซ์แต่ละครั้งเท่ากันหรือไม่ ซึ่งถ้าสามารถรู้ปริมาณฟลักซ์ตกค้างใการทดลอง ก็จะทำให้ผลการทดลองมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

1. จากปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดกระแสอินรัช เช่น ขนาดพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า , ขนาดพิกัดของระบบไฟฟ้า , ค่าความต้านทานในระบบไฟฟ้าระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า , ชนิดของแกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น จึงควรที่จะขยายขอบเขตในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้น

2. หากรู้วิธีการหาปริมาณฟลักซ์ตกค้างในหม้อแปลง อาจจะทำให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 สิ่งที่จะทำต่อไป

### 5.5.1 การเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

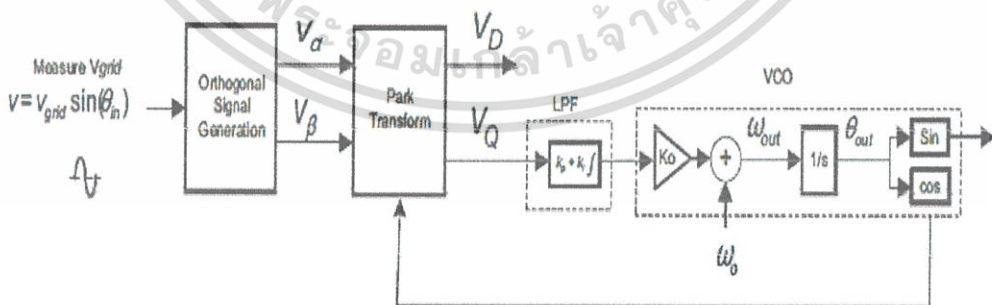
หลักการการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมสวิตช์ ประกอบไปด้วยโมดูลหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์ 3 โมดูลด้วยกันคือ

#### 5.5.1.1 ADC โมดูล

- ไมโครคอนโทรลเลอร์รับสัญญาณอนาล็อกจากเซนเซอร์ และทำการแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณดิจิทัล 0-3 V
- ข้อมูลสัญญาณดิจิทัลของโมดูล ADC ในไมโครคอนโทรลเลอร์ c2000 จะมีความละเอียด 12 บิต โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 4095
- หา Transfer Function เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจาก ADC กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นโวลต์ โดยการคูณด้วยค่า Gain =  $3.3/4095$

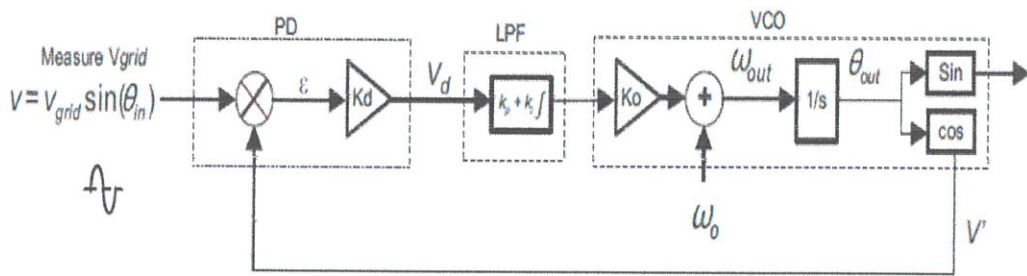
#### 5.5.1.2 PLL โมดูล

- ใช้หลักการแปลงแกน ( Orthogonal signal generator ) เพื่อนำสัญญาณที่ได้ มาทำ phase lock loop กับสัญญาณอ้างอิงใน microcontroller
- สัญญาณ orthogonal ที่ได้ ทำให้ทราบว่าสัญญาณแรงดัน input มีมุมก้องศา



รูปที่ 5.3 สัญญาณ Orthogonal signal generator ก่อนการทำ Phase lock loop สามารถเลือกมุมของแรงดันได้หลังจากการทำ PLL ซึ่งมุมของแรงดันที่ได้ จะเป็นมุม radian

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ไดอะแกรมการทำงานของ Phase lock loop

### 5.5.1.3 ePWM โมดูล

- ทำการส่ง output สัญญาณ โดยใช้ ePWM โมดูล เป็นส่วน interrupt เพื่อส่ง ให้ GPIO มีสถานะ high ซึ่งหมายถึง สั่งให้ switch ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- 1.GEC ALSTHOM MEADUREMENTS LIMITED.Protective Relays Application Guide.England : Stafford, 1976.
- 2.เกรียงไกรกิตติวรารุติ.การศึกษาและวิเคราะห์กระแสอินรัชของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้วิธีการแปลงเวฟ เล็ต( A study and analysis of transformer inrush current using wavelet transform) วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 3.Applied Protective Relaying,FirstEdition,Westinghouse-Electric Corporation,1976. H.J.Li and J.L.Blackburn.Protective Relaying,FirstEdition.Westinghouse-Electric Corporation , 1976.
- 4."Transformer Magnetizing Inrush Current A Resume of Published Information.Electrical Reserch Association,ReportNo.5152,August,1966. A.A.Hudson.Transformer Magnetizing Inrush Current A Resume of Published Information."Electrical Reserch Association,ReportNo.5152. August,1966.
- 5.เสกสรรค์ งามศรีตระกูล.การวิเคราะห์กระแสซิมพาทิตอินรัชระหว่างหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP (Analysis of Sympathetic inrush current between transformer using ATP/EMTP)"วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

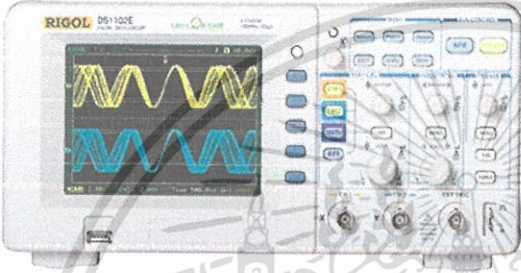
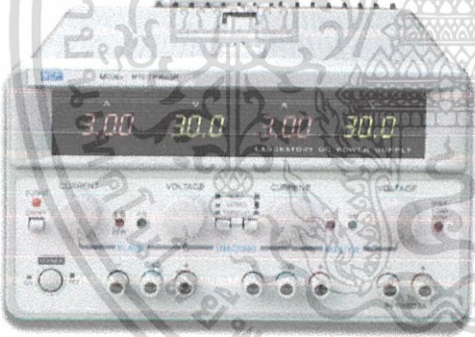



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

## ตารางที่ 1 ก.1 รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

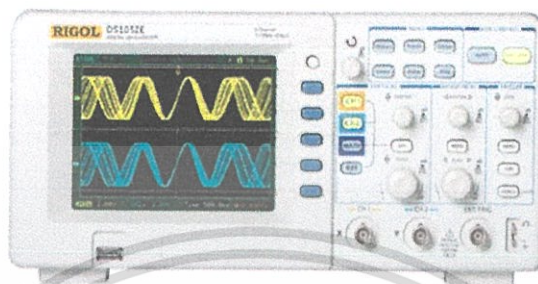
รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>Oscilloscope แบบ 2 Chanel ยี่ห้อ : Rigol 2 Chanel รุ่น : DS1052E</p>
	<p>Power Supply ยี่ห้อ : MCP รุ่น : M10-TP3005H</p>
	<p>สาย Probe Volte ยี่ห้อ : Texas</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>Probe Current ยี่ห้อ : Chauvin พิกัดกระแสไม่เกิน 140 A</p>
	<p>Breaker 30 A ขนาดพิกัดไม่เกิน 30 A</p>
	<p>Variac ขนาดพิกัด 20 A 5 KVA</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การใช้เครื่องออสซิลโลสโคปเบื้องต้น



### วิธีการใช้ออสซิลโลสโคปเบื้องต้น

- $\diamond$  หมุนสเกลทวนเข็มนาฬิกาสัญญาณจะขยายออกทางด้านแกน Y ถ้าหมุนสเกลตามเข็มนาฬิกาสัญญาณจะหดลงทางด้านแกน Y
- $\diamond$  หมุนสเกลทวนเข็มนาฬิกาสัญญาณจะขยายออกทางด้านแกน X ถ้าหมุนสเกลตามเข็มนาฬิกาสัญญาณจะหดลงทางด้านแกน X

### วิธีการเซฟไฟล์ข้อมูลจากออสซิลโลสโคป

- ต่อแฟลชไดรฟ์แล้วกดปุ่ม Storage เลือกเซฟไฟล์แบบ CSV (นำข้อมูลไปพอดในเมทแลปได้) เปลี่ยนจาก Display เป็น Maximum (เก็บข้อมูลที่ละเอียดขึ้น) เลือก External แล้วตั้งชื่อไฟล์แล้วกด Save
- ต่อแฟลชไดรฟ์แล้วกดปุ่ม Storage เลือกเซฟไฟล์แบบ Bitmap (เป็นไฟล์รูปภาพแสดงเหมือนที่ปรากฏในหน้าจอออสซิลโลสโคป) เลือก External แล้วตั้งชื่อไฟล์แล้วกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.  
การสร้างวงจรสวิตซ์เพื่อใช้เลือกมุมแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

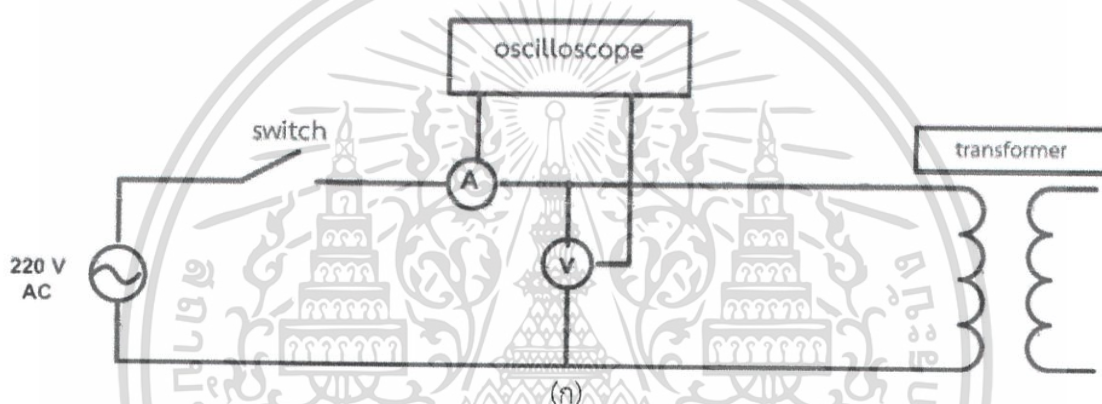
### การสร้างวงจรสวิตช์เพื่อใช้เลือกมุมแรงดันไฟฟ้า

#### ข.1 การสร้างวงจรสวิตช์เพื่อเลือกมุมแรงดันไฟฟ้า

การสร้างวงจรสวิตช์เพื่อเลือกมุมแรงดันไฟฟ้า ก่อนจะต่อเข้ากับโพลทอม่อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนวงจรกำลัง และส่วนวงจรควบคุม ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้

##### ข.1.1 ส่วนวงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Supply Circuit)

###### ข.1.1.1 วงจรกำลัง (Power Circuit)



รูปที่ ข.1 วงจรกำลังที่ต่อเข้ากับโพลทอม่อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ

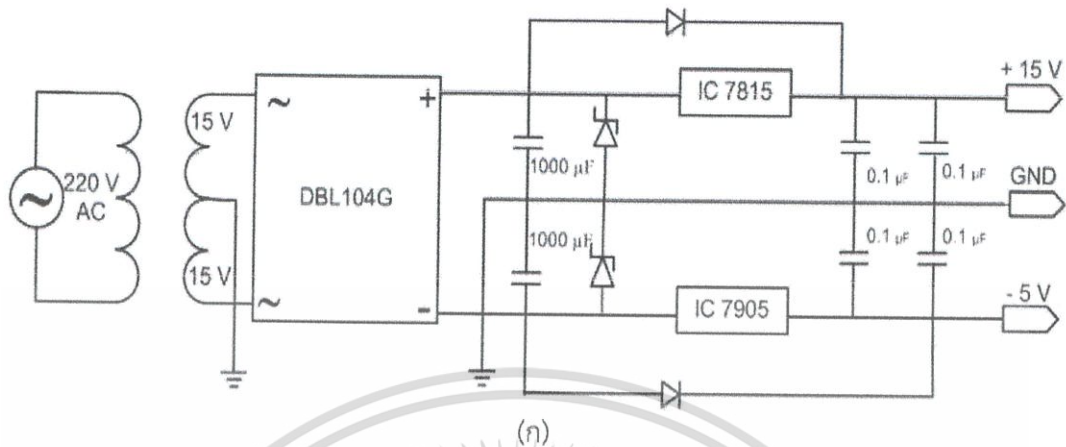
##### ข.1.2 ส่วนวงจรควบคุม (Control Circuit)

การออกแบบวงจรควบคุมมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมการเลือกมุมแรงดันไฟฟ้า โดยการสร้างสัญญาณพีดับเป็นยูเอเอ็มสำหรับควบคุมสวิตช์ของวงจรเลือกมุมจุดฉนวนแรงดัน อีกทั้งยังมีวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง วงจรขับเคลื่อน และวงจรเชื่อมต่อต่างๆ ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้

###### ข.1.2.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

การออกแบบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรเลือกมุมจุดฉนวนแรงดัน ดังรูปที่

ข.3 ขนาดแรงดันไฟฟ้า +15V , -5V จำนวน 1 ชุด ถูกนำไปจ่ายให้กับวงจรขับเคลื่อนที่ใช้สำหรับควบคุมการเปิด-ปิดของไอจีบีที



รูปที่ ข.2 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้า

(ก) โดอะแกรมวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดแรงดันไฟฟ้า +15V , -5V

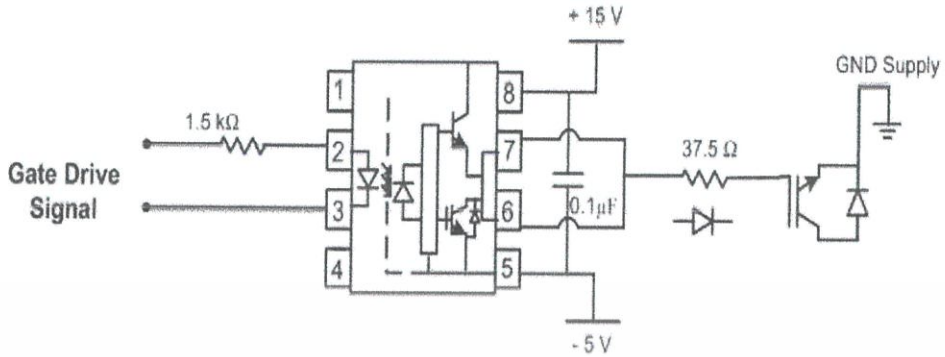
(ข) รูปวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดแรงดันไฟฟ้า

#### ข.1.2.2 วงจรขับเกต (Gate Drive Circuit)

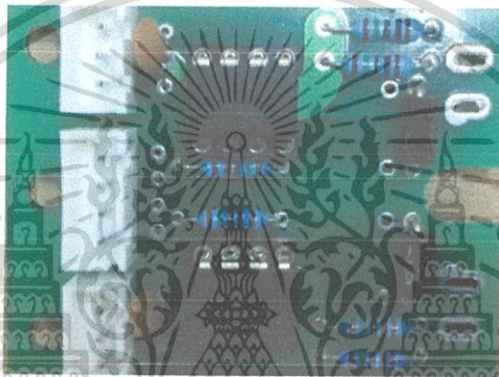
วงจรขับเกตสำหรับวงจรเลือกมุมจุดฉนวนแรงดัน จำนวน 1 ชุด ทำหน้าที่เพิ่มระดับสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และควบคุมสวิตช์ในวงจรเลือกมุมจุดฉนวนแรงดันจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่แยกโนดทางไฟฟ้าระหว่างวงจรกำลังกับวงจรควบคุมเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับวงจรควบคุมในกรณีที่เกิดความผิดปกติของระบบซึ่งได้แก่ ไอซี A 3120

ที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดแรงดันไฟฟ้า +15V -5V โดยวงจรควบคุมจะสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มจ่ายให้กับไอซี ไอซี HCPL 3120 เพื่อเพิ่มระดับสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มให้อยู่ในระดับที่สามารถขับให้ไอจีบีที่ทำงานได้ แล้วจึงจะจ่ายให้กับไอจีบีที่

ดังรูป ที่ ข.3



(ก)



(ข)

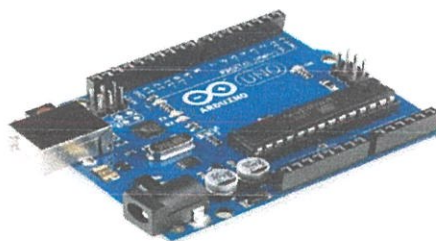
รูปที่ ข.3 วงจรขับเกต

(ก) ไดอะแกรมวงจรขับเกตสำหรับวงจรเลือกมุมจุดอนวนแรงดันไฟฟ้า

(ข) รูปขึ้นงานวงจรขับเกตสำหรับวงจรเลือกมุมจุดอนวนแรงดันไฟฟ้า

**ข.1.2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)**

ในการควบคุมระบบได้ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino UNOR3 เป็นตัวควบคุมระบบ ดังรูปที่ ข.4 โดยใช้ภาษาซี (C Language) ในการเขียนชุดคำสั่งสำหรับค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของโหนดหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของระบบการไฟฟ้าที่วัดจากวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าเพื่อทำการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากัน

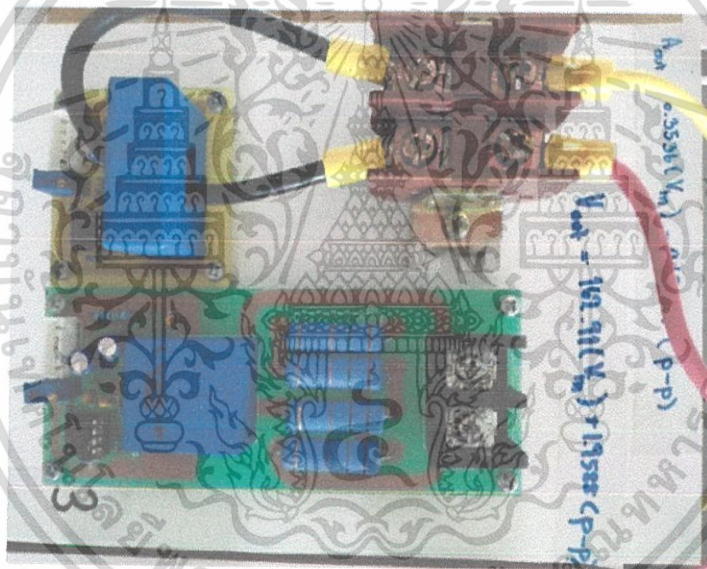


รูปที่ ข.4 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino UNOR3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ข.1.2.4 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าเป็นวงจรที่ทำหน้าที่วัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า และวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่โหลดหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าคือ Voltage Transducer เบอร์ LV25-P ผลิตโดยบริษัท Liaisons Electroniques-Mecaniques หรือมีชื่อย่อว่า LEM มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถวัดได้อยู่ที่ 500V วัดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าซึ่งแปรผันตรงกับค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อนำเอาต์พุตต่อกราวด์ผ่านตัวต้านทาน 150  $\Omega$  เพื่อเปลี่ยนสัญญาณกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ ข.5 วงจรปรับสภาพสัญญาณแรงดัน และกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษากระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส

## Study of inrush current in single phase transformers

กรรณก กันศิริ<sup>[a]</sup>ชลมารค เมืองศรี<sup>[b]</sup>ทรงพล ยินดีสุข<sup>[c]</sup>และรัตนา สืบสอน<sup>[d]</sup>  
ภาควิชาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง1 ถนนฉลองกรุงแขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 0-2739-2478

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสขณะไร้ภาระเนื่องจากกระแสอินรัชดังกล่าวทำให้ระบบป้องกันของระบบไฟฟ้าทำงานผิดพลาด เพื่อที่จะลดความผิดพลาดของระบบป้องกันและยืดอายุของฉนวนภายในหม้อแปลงโครงการนี้ได้มีการออกแบบและสร้างสวิตช์ขึ้นเพื่อให้สามารถเลือกมุมของแรงดันไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมสวิตช์ ในการทดลองได้เลือก IGBT มาใช้เป็นสวิตช์ของวงจร เมื่อรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันถูกตรวจจับโดยอุปกรณ์เช่นเซอร์แรงดัน จากนั้นรูปคลื่นแรงดันที่ได้จะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลแล้วจึงส่งสัญญาณที่ได้ไปควบคุมสวิตช์โดยใช้ฮอสซิลโลสโคปในการสังเกตลักษณะรูปคลื่นของกระแสอินรัชที่มุมต่างๆของแรงดันซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ได้ว่าแต่ละมุมนั้นมีผลต่อการเกิดกระแสอินรัชอย่างไร

**คำสำคัญ:** กระแสอินรัช

### ABSTRACT

This thesis is study about theory of the inrush current in single phase transformer no load type. Because this current is making an error of protection system. For reducing an error of protection system. We want to avoid the inrush current. The switch is designed for triggering the voltage that supply to transformer and is controlled by microcontroller. Oscilloscope is used to observe the performance of the inrush current and analysis current amplitude at each angle.

**Keyword :** inrush current

### 1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบไฟฟ้าทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าและปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้สามารถส่งจ่ายพลังงานให้เหมาะสมกับความต้องการ ระบบป้องกันของหม้อแปลงจึงมีความสำคัญในการตัดแยกหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบเมื่อเกิดฟอลต์และช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับตัวหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสอินรัช (Inrush current) เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ ซึ่งเกิดขึ้นขณะระบบทำการจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยกระแสขนาดสูงจะไหลเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (Primary) เพียงด้านเดียวทำให้ขนาดของกระแสระหว่างขดลวดทั้งสองขดมีความแตกต่างกันคล้ายกรณีเกิดฟอลต์ จึงทำให้ระบบป้องกันของหม้อแปลงทำงานผิดพลาด

ดังนั้นปริญญานิพนธ์นี้จึงศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์กระแสอินรัช (Inrush current) โดยพิจารณาจากระบบที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส แบบไม่มีภาระโหลด โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมสวิตช์เพื่อช่วยในการจ่ายแรงดันที่มุมต่างๆทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดกระแสอินรัชในหม้อแปลงรวมไปถึงเพื่อเป็นแนวทางในการลดความผิดพลาดของการทำงานในระบบป้องกันได้

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการทดลอง

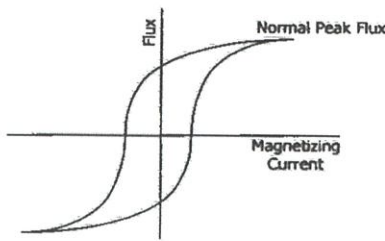
### 2.1 ทฤษฎี

กระแสอินรัช (Magnetizing Inrush Current)(1)(2)

ปรากฏการณ์ที่มีกระแสสาทรานเซียนต์พุ่งเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิในช่วงแรก ขณะที่หม้อแปลงเริ่มมีการจ่ายไฟ (Energizing) และยังคงสภาพของขนาดกระแสพุ่งเข้าดังกล่าวในช่วงเวลาตั้งแต่ 100 ms ไปจนถึงหลายนาที่ ซึ่งไม่ใช่ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง แต่เนื่องจากมีลักษณะการเกิดกระแสระหว่างขดลวดทั้งสองของหม้อแปลงคล้ายการเกิดฟอลต์จึงอาจทำให้ระบบไฟฟ้าทำงานผิดพลาดได้

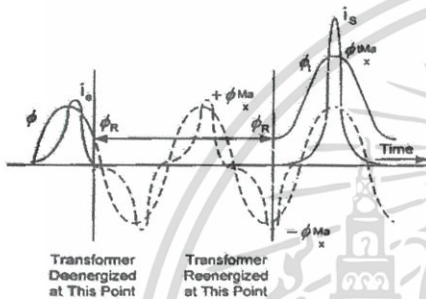
กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟ (Initial Inrush)

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าถูกปลดออกจากระบบไฟฟ้า กระแสกระตุ้นแม่เหล็กจะลดลงเป็นศูนย์ ส่วนฟลักซ์แม่เหล็กจะลดลงเป็นตาม Hysteresis Loop จนเหลือค่าเท่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง  $\Phi_R$  ดังรูป 2.1



รูป 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นแม่เหล็กกับฟลักซ์แม่เหล็ก

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟอีกครั้ง ณ ตำแหน่งที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อเนื่องจากตำแหน่งที่ปลดหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบ จะไม่ปรากฏกระแสกระตุ้นแม่เหล็ก แต่หากมีฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ขนาดของกระแสอินรัชจะมีค่าสูงขึ้นดังรูป



รูปที่ 2.2 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะจ่ายไฟให้กับหม้อแปลง

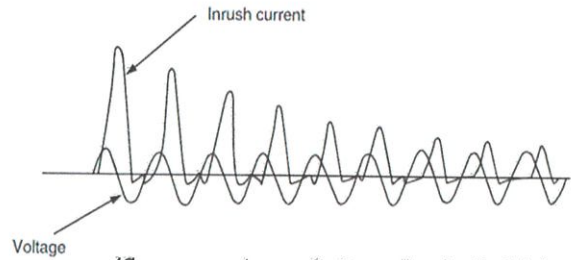
สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน , ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, กระแสกระตุ้นแม่เหล็กแสดงไว้ในสมการ

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

เส้นกราฟ  $\phi_c$  ที่เกิดขึ้นมีความบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นซายน์ปกติ เป็นผลมาจากคุณลักษณะของสภาพการอิ่มตัวในวงจรแม่เหล็ก (The magnetic-circuit's saturation characteristic)

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

เมื่อฟลักซ์แม่เหล็ก มีค่ามากกว่าย่านการทำงานปกติและเข้าสู่ช่วงสนามแม่เหล็กอิ่มตัวสูง ตามคุณลักษณะการกระตุ้นแม่เหล็ก (The Magnetizing Characteristic) ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จะลดลง แต่ขนาดของกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วรูปคลื่นอินรัชที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะซ้ำๆกัน โดยรูปคลื่นนี้จะค่อยๆ เข้าสู่สภาวะคงตัวโดยอาศัยค่าความสูญเสียในวงจรไฟฟ้าที่เกิดจากความต้านทานระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงรูปกระแสอินรัชกระตุ้นแม่เหล็กทั่วไป

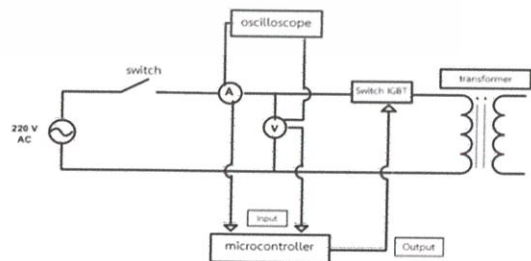
ตำแหน่งการสวิตช์บนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่นั่นทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในสภาวะคงตัวก่อนการสวิตช์ จะทำให้ไม่เกิดกระแสอินรัช โดยกระแสอินรัชที่ได้จะมีลักษณะเหมือนกับกระแสขณะไม่มีโหลดทันที

ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสอินรัช

1. ขนาดพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ขนาดพิกัดของระบบไฟฟ้า
3. ค่าความต้านทานในระบบไฟฟ้าระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า
4. ชนิดของแกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นในการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก (Saturation Density)
5. ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงไฟฟ้า (Residual Flux)
6. วิธีการจ่ายไฟ

## 2.2 การทดลอง

ในการศึกษาลักษณะของกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้า เราจำเป็นต้องใช้ความเร็วในการสวิตช์หม้อแปลง จึงได้มีการสร้างสวิตช์ในการเลือกมุมแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมสวิตช์ โดยการทดลองจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ไม่มีฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างและกรณีที่มียฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง โดยทำการทดลองที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) แตกต่างอื่น 3 ค่า ดังนี้ คือ 0.45 T, 0.91 T และ 1.25 T และทำการทดลองที่มุมต่างๆของแรงดันไฟฟ้าดังนี้ 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 องศา หลังจากนั้นทำการต่อวงจรตามรูปที่ 2.4 สังเกตและบันทึกลักษณะกระแสอินรัช

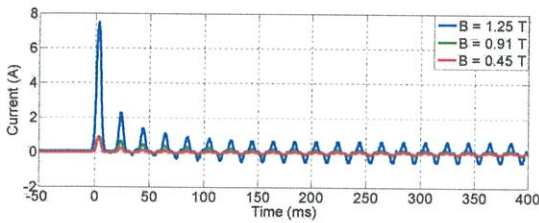


รูปที่ 2.4 ไลอะแกรมวงจรสวิตช์

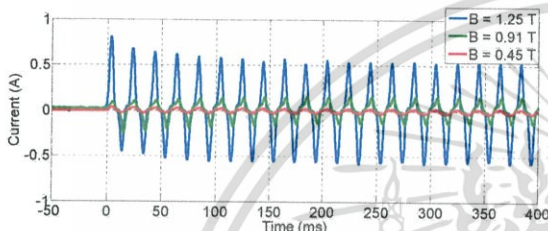
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 ตัวอย่างผลการทดลอง

ยกตัวอย่างกรณีที่มีฟลักซ์ตกค้าง

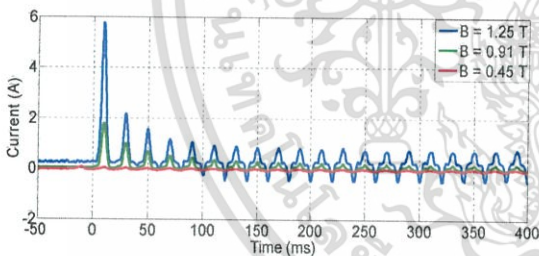


ลักษณะกระแสอินรีซ์ที่มุม 0 องศา  $I_{base} = 8.75$  A

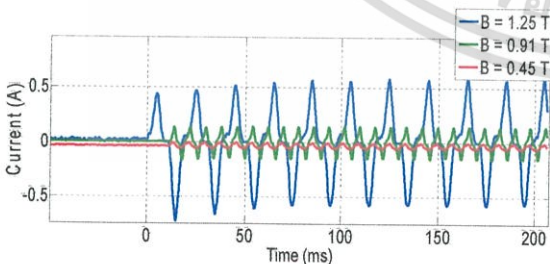


ลักษณะกระแสอินรีซ์ที่มุม 90 องศา  $I_{base} = 8.75$  A

ยกตัวอย่างกรณีที่ไม่มีฟลักซ์ตกค้าง



ลักษณะกระแสอินรีซ์ที่มุม 0 องศา  $I_{base} = 8.75$  A



ลักษณะกระแสอินรีซ์ที่มุม 90 องศา  $I_{base} = 8.75$  A

### 3. สรุป

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลเป็น 3 กรณี ได้แก่

1. ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกระแสอินรีซ์และมุมของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อสับสวิตช์ที่มุมแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0 องศา จะได้ค่ากระแสอินรีซ์สูงซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวไว้ที่มุมแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0 องศา จะเกิดกระแสอินรีซ์สูงสุด โดยปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดจนเป็นสองเท่าของค่าขดปัดคำสั่งผลให้แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวทำให้เกิดกระแสอินรีซ์ขึ้น หลังจากนั้นกระแสจะเข้าสู่สภาวะคงตัว เนื่องจากการสูญเสียในวงจรไฟฟ้าที่เกิดจากความต้านทานระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า แต่เมื่อสับสวิตช์ที่มุมแรงดันไฟฟ้า 90 องศากระแสอินรีซ์จะเกิดน้อยมากหรือแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย ส่วนทิศทางการเกิดกระแสอินรีซ์เป็นไปตามทิศทางของฟลักซ์

2. ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกระแสอินรีซ์กับฟลักซ์ตกค้าง

เมื่อนำผลการทดลองที่มุมแรงดันไฟฟ้าเดียวกันมาเปรียบเทียบกับระหว่าง กรณีที่มีฟลักซ์ตกค้างและไม่มีฟลักซ์ตกค้างพบว่า กรณีที่มีฟลักซ์ตกค้างจะมีขนาดของกระแสอินรีซ์ที่มากกว่า กรณีที่ไม่มีฟลักซ์ตกค้าง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าเมื่อมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ขนาดของกระแสอินรีซ์จะมีค่าสูงกว่าตอนที่ไม่มีฟลักซ์ตกค้าง

3. ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกระแสอินรีซ์กับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

เมื่อเราทดลองที่มุมแรงดันไฟฟ้าเดียวกันแต่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่างกัน พบว่าที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ต่างกันทำให้ได้ขนาดกระแสอินรีซ์ที่ต่างกันโดยที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 0.45 T มีขนาดกระแสอินรีซ์ที่น้อยที่สุด ส่วนที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 1.25 T จะมีขนาดกระแสอินรีซ์ที่สูงที่สุดในการทดลองครั้งนี้ ส่วนทิศทางการเกิดกระแสอินรีซ์เป็นไปตามทิศทางของฟลักซ์

### 4. วิจัยรณัผลการทดลอง

การทดลองครั้งนี้ ค่าที่ได้จากการทดลองอาจจะมีคลาดเคลื่อน เนื่องจากไม่สามารถที่จะหาฟลักซ์ตกค้างได้อย่างแม่นยำ แต่ได้ใช้วิธีตามทฤษฎีที่ว่าหากเราจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปแล้วค่อยๆทำการลดแรงดันลงทีละน้อยๆ อย่างต่อเนื่องจะสามารถทำให้ค่าฟลักซ์ตกค้างลดลงจนเกือบศูนย์ และในการทดลองกรณีที่มีค่า ฟลักซ์ตกค้างเราไม่สามารถจะรู้ได้ว่าฟลักซ์แต่ละครั้งมีขนาดเท่ากันหรือไม่

## 5. ข้อเสนอแนะ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกระแสอินรัชกับมุมของแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า แต่ก็ยังมีปัจจัยอื่นๆอีก ที่มีผลต่อกระแสอินรัชค่านั้นควรที่จะขยายขอบเขตในการศึกษาเพิ่มขึ้น เช่น ขนาดพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า, ขนาดพิกัดของระบบไฟฟ้า, ค่าความต้านทานในระบบไฟฟ้า ระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า, ชนิดของแกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าความเข้มในการอ้อมตัวของสนามแม่เหล็กและค่าฟลักซ์แม่เหล็กค้ำในหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น

## อ้างอิง

1. GEC ALSTHOM MEADUREMENTS LIMITED.Protective Relays Application Guide.England : Stafford, 1976.
2. เกรียงไกรกิตติวารุติ.การศึกษาและวิเคราะห์กระแสอินรัชของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ต (A study and analysis of transformer inrush current using wavelet transform)วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
3. Applied Protective Relaying,FirstEdition,Westinghouse-Electric Corporation,1976. H.J.Li and J.L.Blackburn.Protective Relaying,FirstEdition.Westinghouse-Electric Corporation , 1976.
4. "Transformer Magnetizing Inrush Current A Resume of Published Information.Electrical Reserch Association,ReportNo.5152,August,1966. A.A.Hudson.Transformer Magnetizing Inrush Current A Resume of Published Information."Electrical Reserch Association,ReportNo.5152. August,1966.
5. เอกสารรต์ งามศรีตระกูล.การวิเคราะห์กระแสซิมพาทิคอินรัชระหว่างหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP (Analysis of Sympathetic inrush current between transformer using ATP/EMTP)"วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .

## ประวัติผู้เขียนบทความ

	นางสาวกรรณก ก้นศิริ 56010010 เกิดวันที่ 24 เมษายน 2538 โทรศัพท์ 095-6730139 E-mail : kornkanok0139@gmail.com
	นายชลมารก เมืองศรี 56010271 เกิดวันที่ 13 มกราคม 2537 โทรศัพท์ 090-0285667 E-mail : chonlamark13@gmail.com
	นายทรงพล ยินดีสุข 56010471 เกิดวันที่ 9 มกราคม 2538 โทรศัพท์ 089-4075923 E-mail : harushikung@gmail.com
	นางสาวรัตนา สิบสอน 56011024 เกิดวันที่ 23 มกราคม 2538 โทรศัพท์ 087-8342726 E-mail : giftneena@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้