

การศึกษากระแสอินรัชในหม้อแปลง

A STUDY OF INRUSH CURRENT IN TRANSFORMERS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ปีการศึกษา 2563

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

A STUDY OF INRUSH CURRENT IN TRANSFORMERS



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึ2020เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปีการศึกษา 2563

การศึกษากระแสอินrushในหม้อแปลง

A STUDY OF INRUSH CURRENT IN TRANSFORMERS



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ชีรพล

โพธิ์พงษ์ศรีวิวัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษากระแสอินรัชในหม้อแปลง

ผู้จัดทำ

- | | |
|---------------|--------------|
| 1. นายภควัต | ตั้งปกาศิต |
| 2. นายภูริณัฐ | ยี่มละม้าย |
| 3. นายสุทิวีส | จตุรภูษาภรณ์ |



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธีรพล โปธิ์พงศ์วิวัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การศึกษากระแสอินรัชในหม้อแปลง

นายภควัต ตั้งปกาศิต
นายภูริณัฐ ยิ้มละม้าย
นายสุทิวีส จตุรภูษารณ
ผศ.ดร. ธีรพล โพธิ์พงศวิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอปรากฏการณ์กระแสอินรัชในหม้อแปลงซึ่งเกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้จ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถทำให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาดได้โดยเทคโนโลยีของอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์รูปแบบลักษณะการเกิดและผลของกระแสอินรัชโดยกรณีศึกษานี้จะจำลองกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นบนหม้อแปลงที่มีขดลวด Primary และ Secondary เท่ากันโดยจ่ายแรงดันที่มุมตามที่กำหนดไว้โดยใช้ความรู้ทางด้าน Power Electronics ช่วยเพื่อหาผลตอบสนองชั่วคราวของระบบและอธิบายผลกระทบจากเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็ก รวมไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับกำลังทางไฟฟ้าต่อน้ำหนักหม้อแปลงโดยใช้ค่าการทดลองจริงแสดงบนกราฟเพื่อวิเคราะห์ลักษณะกระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลงความเปลี่ยนแปลงต่างๆหลังเกิดกระแสอินรัช นอกจากนี้ผลงานวิจัยดังกล่าวยังสามารถนำไปใช้ต่อยอดเพื่อประโยชน์ของระบบป้องกันที่รวดเร็วและแม่นยำในการแบ่งแยกกระแหวางกระแสอินรัชและฟอลต์ภายในหม้อแปลงเป็นประโยชน์สำหรับประสิทธิภาพในระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

A STUDY OF INRUSH CURRENT IN TRANSFORMERS

Mr. Pakawat

Tangpakasit

Mr. Phoorinat

Yimlamai

Mr. Suthiwat

Jaturapuchaporn

Assist. Prof. Dr. Teeraphon Phophongviwat Advisor

Lecturer Chaitat

Maneeinn Co-Advisor

Year 2020

ABSTRACT

This thesis presents the inrush current phenomenon in transformers, which occurs when power transformers energized by supply electricity to the power system. This inrush current is important because the effect can lead protection devices to misoperation. The technology of protection devices used in power systems are continually being developed to analyze the form of the formation and effect of the inrush current. This research simulates the inrush currents that occur on transformers with same primary and secondary windings. By applying voltage at the specified angle using knowledge of Power Electronics to determine the transient response of the system and explain the effect of the relationship between magnetic field density and magnetic field intensity, as well as the relationship between magnetic field density and power to weight. Transformers using actual experimental values shown on a graph to analyze the characteristics of the transformer inrush current, changes after the inrush current occurs. The separation between the intrinsic and faulty currents within the transformer is useful for further efficiency in power systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิศวกรรมและ อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาแนะนำ แนวทาง ให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด รวมทั้งให้ความ อนุเคราะห์ในการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่ห้อง STORE ROOM (ECC 310) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่คือห้อง ELECTRICAL LABORATORY (ECC 309) และอุปกรณ์ที่จำเป็นต่างๆ ใน การทำโครงการอย่างครบครัน และคุณณัฐพันธุ์ บุญเสนอ ที่ให้คำแนะนำในการทำโครงการและการ ใช้งานอุปกรณ์ภายในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ใน Dyno Laboratory ทุกคน ที่คอยให้คำปรึกษาและความ ช่วยเหลือจนแล้วจบโครงการ

นอกจากนี้คณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณปณณวีร์ ฉายศิริ ได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี และคุณกมลวรรณ ถาวร เจ้าหน้าที่ห้องธุรการประจำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกเงินภายในโครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การ สนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือ ด้วยดีมาตลอด

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	ii
ABSTRACT	iii
กิตติกรรมประกาศ	iv
สารบัญ	v
สารบัญตาราง	ix
สารบัญรูปภาพ	x
บทที่ 1	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสอินรัช	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	3
บทที่ 2	5
2.1 บทนำ	5
2.2 กระแสอินรัช (Magnetize Inrush Current)[3,4]	5
2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสอินรัช[1]	8
2.2.2 กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟ (Initial Inrush)	9
2.2.3 กระแสอินรัชชดเชย (Recovery inrush)	13
2.2.4 กระแสอินรัชสะท้อน (Sympathetic inrush)	13
2.2.5 องค์ประกอบฮาร์มอนิกในรูปคลื่นกระแสอินรัช (Harmonic content of inrush waveform)	14
2.3 เสถียรภาพของระบบรีเลย์ป้องกันชนิดผลต่างกระแสระหว่างการเกิดกระแสอินรัช	15
2.3.1 การหน่วงเวลา	15

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2.3.2 การตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิก (Harmonic Restraint) หน้าไปใช้ประโยชน์ได้ 16 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อี 2.3.2.1 องค์ประกอบกระแสตรง (DC or Offset Component) สารทุกครั้งที่มีการน 17 ไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.2.2	องค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่สอง (Second Harmonic)	17
2.3.2.3	องค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่สาม (Third Harmonic)	18
2.3.2.4	องค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่สูงกว่า (Higher Harmonic)	18
2.4	การประยุกต์เทคนิคการตรวจจับกระแสอินรัชในรีเลย์ป้องกันชนิดกระแสผลต่างสำหรับการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า	19
2.4.1	การตรวจจับกระแสอินรัช	19
2.4.2	การตรวจจับการอิมตัวของฟลักซ์แม่เหล็กในหม้อแปลง	20
2.4.3	การแสดงความขนาดของกระแสอินรัช	20
บทที่ 3		21
3.1	ที่มาและความสำคัญของหม้อแปลงขนาดเล็ก	21
3.2	โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก[2]	22
3.2.1	โครงสร้างวงจรมแม่เหล็ก	22
3.2.2	โครงสร้างขดลวดตัวนำ	24
3.2.3	การคำนวณความยาวขดลวด	24
3.2.4	ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด	26
3.3	การเลือกใช้ขดลวดตัวนำ	26
3.4	สมการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเบื้องต้น	27
3.4.1	ออกแบบโดยใช้สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ	27
3.4.2	การพิจารณาพื้นที่ช่องว่างในหม้อแปลงต่อการพันหม้อแปลง	28
3.5	รายละเอียดหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบ	29
บทที่ 4		31
4.1	เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	31
4.1.1	การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวครึ่งคลื่น	31
4.1.2	การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวเต็มคลื่น	32
4.2	SCR	34
4.2.1	การทำงานวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว	34
4.2.2	การทำงานกรณีโหลดตัวต้านทาน	35
4.2.3	การทำงานกรณีโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถึงแม้ว่าจะมีการปรับปรุงเนื้อหา และตัดตัวอักษรทิ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.4 การควบคุมแบบเปิด-ปิด	44
4.2.5 การกำหนดพิกัดของเอสซีอาร์	46
4.2.6 รายละเอียด SCR ที่เลือกใช้	47
4.3 เฟสคอนโทรลไอซีทีซีเอ 785 (Phase Control IC TCA785)	49
4.3.1 คุณสมบัติ TCA785	50
4.3.2 คุณสมบัติการทำงานของ TCA785	50
4.3.3 ลักษณะของพัลส์ด้านออกของ TCA785	54
4.3.4 การควบคุมเฟสของ TCA785	54
4.4 ไอซีสร้างความถี่ LM555	56
4.5 วงจรที่ใช้ในการทดลองวัดกระแสอินรัช	58
4.5.1 วงจรไฟฟ้า 1 เฟสต่อเข้าหม้อแปลง ประกอบด้วย	58
4.5.2 วงจรคอนโทรล ประกอบด้วย 3 วงจรหลัก	59
4.5.2.1 วงจรควบคุมเฟสของ TCA785	59
4.5.2.2 วงจรความถี่ 5 กิโลเฮิร์ต	61
4.5.2.3 วงจรขับ SCR	63
บทที่ 5	65
5.1 บทนำ	65
5.2 รายละเอียดและโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ	65
5.3 การทดสอบเปิดวงจร (Open circuit)	66
5.3.1 การทดสอบคุณลักษณะแกนเหล็กในหม้อแปลงทดสอบ	67
5.3.2 การหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่สำคัญ 3 จุด	70
5.4 วงจรทดสอบและการใช้ Oscilloscope เพื่อศึกษาขนาดและลักษณะสัญญาณกระแสอินรัช	71
5.5 ขั้นตอนการทดลอง	72
5.6 ผลการทดลอง	74
5.6.1 การทดลองที่ 1 ทดสอบความสามารถของวงจรควบคุมมุมแรงดัน	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 5.6.2 การทดลองที่ 2 ตรวจสอบสัญญาณกระแสอินรัชในหม้อแปลงให้นำไปใช้ประโยชน์ได้ 77 การค้า
ไม่ว่ากรณีใด **บทที่ 6** อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการ 90.ไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

6.1 บทนำ	90
6.2 สรุปผลการทดลอง	90
6.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง	91
6.4 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	91
6.5 เป้าหมายในอนาคต	92
บรรณานุกรม	93
ภาคผนวก	94
ภาคผนวก ก.	95
ภาคผนวก ข.	99



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1	4
ตารางที่ 2.1	12
ตารางที่ 3.1	30
ตารางที่ 4.1	47
ตารางที่ 4.2	47
ตารางที่ 4.3	49
ตารางที่ 4.4	55
ตารางที่ 4.5	55
ตารางที่ 4.6	57
ตารางที่ 4.7	57
ตารางที่ 4.8	57
ตารางที่ 5.1	68
ตารางที่ 5.2	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นแม่เหล็กกับฟลักซ์แม่เหล็ก	5
รูปที่ 2.2 ค่าฟลักซ์แม่เหล็กในสภาวะคงตัว (STEADY STATE) และ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (Maximum Flux)	6
รูปที่ 2.3 คลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น	7
รูปที่ 2.4 กระแสอินรัชไม่ถูกยกขึ้น (OFFSET) เนื่องจากผลของแกนเหล็กอิ่มตัว	8
รูปที่ 2.5 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงจ่ายไฟฟ้า ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่น แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก	9
รูปที่ 2.6 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงจ่ายไฟฟ้า ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่น แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอยู่ที่ค่าสูงสุด	10
รูปที่ 2.7 คลื่นกระแสอินรัชกระตุ้นแม่เหล็กทั่วไป	11
รูปที่ 2.8 คลื่นกระแสอินรัชทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในขดหนึ่งของการต่อแบบเดลต้า หรือด้านทุติยภูมิของการต่อแบบเดลต้าในหม้อแปลงกระแส	12
รูปที่ 2.9 กระแสอินรัชชดเชย (RECOVERY INRUSH) หลังจากทีพอลต์ภายนอก โซนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าถูกกำจัด	13
รูปที่ 2.10 กระแสอินรัชสะท้อน (SYMPATHETIC INRUSH) เกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้า ต่อขนานอยู่กับหม้อแปลงไฟฟ้าอีกตัวที่กำลังจ่ายไฟ	14
รูปที่ 2.11 การชดเชยของรีเลย์ผลต่างสำหรับขดลวดทั้งสองในหม้อแปลงชนิดสตาร์/สตาร์	16
รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงหลักการตรวจจับช่องว่างในรูปคลื่น	19
รูปที่ 2.13 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะเกิดการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก	20
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า	22
รูปที่ 3.2 โครงสร้างวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก	23
รูปที่ 3.3 การตัดแกนเหล็กรูป E และ I อย่างประหยัด	23
รูปที่ 3.4 ลักษณะการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก	24
รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก	25
รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลหม้อแปลง 1 เฟส	29
รูปที่ 4.1 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวครึ่งคลื่น	31
รูปที่ 4.2 คลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	32
รูปที่ 4.3 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวเต็มคลื่น	33
รูปที่ 4.4 วงจรเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว	34
รูปที่ 4.5 สัญญาณกระตุ้นของเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว	34
รูปที่ 4.6 คลื่นกระแสไฟฟ้าที่ผ่านโหลดและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดตัวต้านทาน	35
รูปที่ 4.7 วงจรเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวเมื่อโหลดคือ RL	38
รูปที่ 4.8 คลื่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดเมื่อโหลดคือ RL	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ลิขสิทธิ์สงวนไว้โดยสมบูรณ์ และขอสงวนสิทธิ์ในชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมนำกระแสและมุมกระตุ้น	40
รูปที่ 4.10	คลื่นของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดตัวต้านทานต่ออยู่กับ ตัวเหนี่ยวนำเมื่อมุม α เท่ากับ θ	41
รูปที่ 4.11	คลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดเมื่อมุมจุดชนวนน้อยกว่ามุมอิมพีแดนซ์	42
รูปที่ 4.12	การกระตุ้นเอสซีอาร์ด้วยกระบวนพัลส์	43
รูปที่ 4.13	วงจรการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบเปิด-ปิด	44
รูปที่ 4.14	คลื่นสัญญาณกระตุ้นและแรงดันตกคร่อมโหลด	45
รูปที่ 4.15	SCR SKKT106/16E	47
รูปที่ 4.16	TCA 785	49
รูปที่ 4.17	การกำหนดขา	49
รูปที่ 4.18	BLOCK DIAGRAM ของ TCA 785	51
รูปที่ 4.19	PULSE DIAGRAM ของ TCA 785	52
รูปที่ 4.20	การกำหนดค่าพินและฟังก์ชัน	56
รูปที่ 4.21	วงจรไฟฟ้ากำลัง	58
รูปที่ 4.22	วงจรของ TCA785 เอาต์พุตขา 14,15	59
รูปที่ 4.23	สัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนฝั่งลบ ขา14	60
รูปที่ 4.24	สัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนฝั่งบวก ขา15	60
รูปที่ 4.25	วงจรพัลส์เอาต์พุต 5 กิโลเฮิร์ต	61
รูปที่ 4.26	สัญญาณพัลส์ 5 กิโลเฮิร์ต	61
รูปที่ 4.27	สัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนฝั่งลบ ขา14 หลังแอนด์กับพัลส์ 5 กิโลเฮิร์ต	62
รูปที่ 4.28	สัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนฝั่งบวก ขา15 หลังแอนด์กับพัลส์ 5 กิโลเฮิร์ต	62
รูปที่ 4.29	วงจรขับขา G,K ของ SCR	63
รูปที่ 4.30	สัญญาณขับขา G,K ของ SCR ฝั่งลบ	64
รูปที่ 4.31	สัญญาณขับขา G,K ของ SCR ฝั่งบวก	64
รูปที่ 5.1	หม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ	65
รูปที่ 5.2	หม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ (ความหนา)	66
รูปที่ 5.3	วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า (OPEN CIRCUIT TEST)	67
รูปที่ 5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับกำลังทางไฟฟ้า ต่อน้ำหนักหม้อแปลง	69
รูปที่ 5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก	69
รูปที่ 5.6	MAGNETIZING CURVE	70
รูปที่ 5.7	วงจรทดสอบกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้า	71
รูปที่ 5.8	แผนภาพขั้นตอนการทดลอง	73
รูปที่ 5.9	สัญญาณแรงดันเมื่อจ่ายไฟฟ้าสู่วงจรกำลัง โดยควบคุม	74
รูปที่ 5.10	สัญญาณแรงดันเมื่อจ่ายไฟฟ้าสู่วงจรกำลัง โดยควบคุม	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรืออาจมีข้อความที่ผิดเพี้ยนไปบ้างเนื่องจากเป็นการนำเอกสารไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากเจ้าของลิขสิทธิ์
 ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ห้ามนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้าโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 5.11 สัญญาณแรงดันเมื่อจ่ายไฟฟ้าส่วจรกำลัง โดยควบคุม	75
รูปที่ 5.12 สัญญาณแรงดันเมื่อจ่ายไฟฟ้าส่วจรกำลัง โดยควบคุม	75
รูปที่ 5.13 สัญญาณแรงดันเมื่อจ่ายไฟฟ้าส่วจรกำลัง โดยควบคุม	76
รูปที่ 5.14 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.1T	77
รูปที่ 5.15 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.1T	77
รูปที่ 5.16 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.1T	78
รูปที่ 5.17 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.1T	78
รูปที่ 5.18 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.4T	79
รูปที่ 5.19 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.4T	79
รูปที่ 5.20 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.4T	80
รูปที่ 5.21 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.4T	80
รูปที่ 5.22 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.7T	81
รูปที่ 5.23 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.7T	81
รูปที่ 5.24 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.7T	82
รูปที่ 5.25 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.7T	82
รูปที่ 5.26 สัญญาณกระแสอินรัชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.1T	83
รูปที่ 5.27 สัญญาณกระแสอินรัชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.1T	83
รูปที่ 5.28 สัญญาณกระแสอินรัชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.1T	84
รูปที่ 5.29 สัญญาณกระแสอินรัชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.1T	84
รูปที่ 5.30 สัญญาณกระแสอินรัชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.4T	85
รูปที่ 5.31 สัญญาณกระแสอินรัชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.4T	85
รูปที่ 5.32 สัญญาณกระแสอินรัชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.4T	86
รูปที่ 5.33 สัญญาณกระแสอินรัชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.4T	86
รูปที่ 5.34 สัญญาณกระแสอินรัชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.7T	87
รูปที่ 5.35 สัญญาณกระแสอินรัชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.7T	87
รูปที่ 5.36 สัญญาณกระแสอินรัชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.7T	88
รูปที่ 5.37 สัญญาณกระแสอินรัชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ B=1.7T	88
รูปที่ 6.1 ลักษณะการเกิดกระแสอินรัชเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มุม 0 องศา	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คงปฏิเสธไม่ได้ว่าปัจจุบันไฟฟ้ามีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมากและแน่นอนว่าความต่อเนื่องของพลังงานเป็นสิ่งทีทุกคนปรารถนาไม่เฉพาะเพียงผู้ใช้งานไฟฟ้าแต่ยังรวมไปถึงผู้ปฏิบัติงานทางไฟฟ้าและออกแบบระบบไฟฟ้าด้วยแต่อย่างไรก็ตามความผิดปกติในระบบไฟฟ้า (Fault) เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นจึงมีการเชื่อมโยงโครงข่ายของระบบไฟฟ้าเข้าด้วยกันโดยที่สายส่งเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากโรงงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้โดยผ่านส่วนต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น สถานีไฟฟ้า เขตชุมชน เป็นต้น ในขณะเดียวกัน หม้อแปลงไฟฟ้า (Power Transformer) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญและมีราคาสูงซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากต่ำไปสูงเพื่อให้สามารถส่งจ่ายพลังงานไปได้ระยะไกลและแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากสูงมาต่ำเพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าปลายทาง ดังนั้นระบบป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีความสำคัญในการตัดแยกหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจากฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งตัวอย่างความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรภายในคือ ขดลวดภายในเสียหายและอาจทำให้โครงสร้างภายนอกเสียหายจากแรงดันของน้ำมันหม้อแปลงที่ขยายตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรภายใน และเมื่อโครงสร้างภายนอกเสียหายจะให้น้ำมันซึ่งมีอุณหภูมิสูงรั่วออกมาสู่ภายนอกและอาจเกิดการลุกไหม้สร้างความเสียหายต่อไปได้อีก

ข้อจำกัดอย่างหนึ่งที่มีผลกับความเร็วในการทำงานของรีเลย์ป้องกันในปัจจุบันคือ กรณีการเกิดกระแสเกินรัชซึ่งเกิดขึ้นขณะระบบทำการจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการเกิดกระแสเกินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นขณะเริ่มจ่ายไฟ (Energizing) ไม่ถือเป็นความผิดปกติในหม้อแปลงซึ่งจะมีกระแสกระตุ้นแม่เหล็ก (Magnetizing Current) ขนาดสูงเข้าหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิเพียงด้านเดียวจนอาจจะทำให้ระบบป้องกันไฟฟ้าทำงานผิดพลาดเนื่องจากมองเห็นผลต่างของกระแสระหว่างขดลวดทั้งสองขดของหม้อแปลงมีลักษณะคล้ายกรณีการเกิดฟอลต์ ดังนั้นจึงต้องมีการหน่วงเวลาให้รีเลย์เริ่มทำงานในช่วงเวลาหลังจากเกิดกระแสเกินรัชและศึกษาคุณลักษณะต่างๆของกระแสเกินรัชซึ่งในงานวิจัยนี้จึงมุ่งพิจารณาศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์การเกิดกระแสเกินรัช โดยจะพิจารณาจากระบบที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าต่ออนุกรมจากบัสเดียวและใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็กรวมไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับกำลังทางไฟฟ้าต่อน้ำหนักหม้อแปลงในการพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อขนาดของกระแสเกินรัชเพื่อช่วยในการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงให้มีความเหมาะสมต่อระบบมากยิ่งขึ้นและลดความผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงอันเกิดจากกระแสเกินรัช

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชที่แรงดันและมุมที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์สัญญาณกระแสทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นนำผลที่ได้มาใช้ใน 2 ลักษณะด้วยกันคือ

1. ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของขนาดที่เกิดขึ้นจากกระแสอินรัชของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกระแสอินรัชในหม้อแปลง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ตั้งสมมติฐานของการศึกษา โดยอ้างอิงจากข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่ใช้งานเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การเกิดกระแสอินรัชและวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของกระแสอินรัช ที่อาจทำให้อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงทำงานผิดพลาดได้ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาและเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงให้สามารถทำงานในกรณีที่มีฟอลต์แต่จะไม่ทำงานในสภาวะที่เกิดกระแสอินรัช

1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสอินรัช

1. ขนาดพิกัดของหม้อแปลงฟ้า
2. ขนาดพิกัดของระบบไฟฟ้า
3. ค่าความต้านทานในระบบไฟฟ้าระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลง
4. ชนิดของแกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าความเข้มในการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก (Saturation Density)
5. ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงไฟฟ้า (Residual Flux)
6. วิธีการจ่ายไฟฟ้า

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ทำการศึกษาลักษณะการเกิดกระแสอินรัชโดยการใช้หม้อแปลงขนาด 1:1 มาช่วยในการทดสอบระบบซึ่งอาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจริงเพื่อหาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อขนาดของกระแสอินรัชเพื่อนำมาวิเคราะห์และสรุปลักษณะการเกิดกระแสอินรัชและวิเคราะห์หาเหตุผลที่ทำให้ปัจจัยต่างๆมีผลต่อขนาดของกระแสอินรัชเพื่อประโยชน์ในการพัฒนาระบบป้องกันสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่ากระแสอินรัช
2. ทดสอบคุณลักษณะของแกนเหล็กที่จะนำมาใช้สร้างหม้อแปลงไฟฟ้า
3. ออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า
4. ออกแบบและสร้างสวิตช์เพื่อควบคุมตำแหน่งมุมแรงดันไฟฟ้าที่เริ่มจ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า
5. ทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกระแสอินรัช เช่น ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง, ค่าตำแหน่งมุมแรงดันไฟฟ้า และ ค่าความต้านทานที่เชื่อมต่อกับหม้อแปลง
6. สรุปผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2563					พ.ศ. 2564			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้องกับการพันหม้อแปลงขนาดเล็ก									
2. ศึกษาเทคนิคการพันหม้อแปลง									
3. เริ่มพันหม้อแปลงและทดสอบ									
4. วิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลง									
5. ศึกษาทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้องกับสวิตช์									
6. ออกแบบสวิตช์สำหรับใช้กับหม้อแปลง									
7. ทดสอบการใช้งานสวิตช์ที่ต่อเข้ากับหม้อแปลง									
8. วิเคราะห์ผลการทดสอบสวิตช์ที่ต่อเข้ากับหม้อแปลง									
9. สรุปผลและเขียนผลโครงการ									
10. จัดทำและรวบรวมปริญญานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

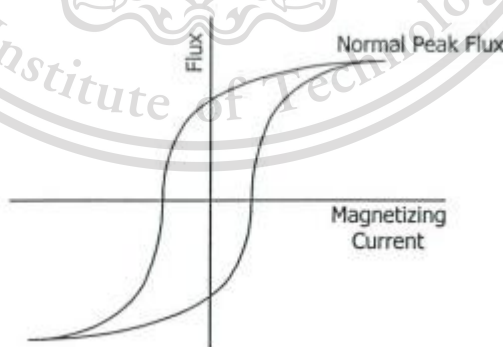
การวิเคราะห์กระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้า

2.1 บทนำ

สำหรับปริญญาโทฉบับนี้ได้ศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นซึ่งจะศึกษาในส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นก่อนที่จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์เพื่อมาวิเคราะห์คุณลักษณะดังกล่าว จึงจำเป็นต้องศึกษาและทำความเข้าใจในเบื้องต้นเกี่ยวกับปรากฏการณ์เกิดกระแสกระตุ้นแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าขณะที่มีการจ่ายไฟเข้า ที่เรียกกันทั่วไปว่ากระแสอินรัช ซึ่งในบทนี้จะอธิบายถึงความสำคัญในการศึกษาคุณลักษณะของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า

2.2 กระแสอินรัช (Magnetize Inrush Current)[3,4]

ปรากฏการณ์ที่มีกระแสรานเซี่ยนต์พุ่งเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิในช่วงแรกขณะที่หม้อแปลงเริ่มมีการจ่ายไฟ (Energizing) และยังคงสภาพของขนาดกระแสที่พุ่งเข้าดังกล่าวในช่วงเวลา 100 ms ไปจนถึงหลายนาทิจะเรียกว่า กระแสอินรัช ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้เกิดจากความผิดพลาดของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่เนื่องจากการเกิดกระแสที่ผลต่างระหว่างขดลวดทั้งสองของหม้อแปลงซึ่งจะเปรียบเทียบบคล้ายกับการเกิดฟลัด จึงอาจทำให้ระบบป้องกันไฟฟ้าทำงานผิดพลาดได้ ดังนั้นเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงความผิดพลาดดังกล่าว ในการที่จะออกแบบระบบป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าจำเป็นต้องศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของกระแสอินรัช เพื่อที่จะนำไปปรับปรุงและพัฒนาาระบบป้องกันไฟฟ้าให้ทำงานขณะเกิดฟลัดขึ้นภายในโซนป้องกัน แต่จะต้องไม่ทำงานตลอดช่วงเวลาที่เกิดสภาวะทรานเซี่ยนต์ของกระแสอินรัช



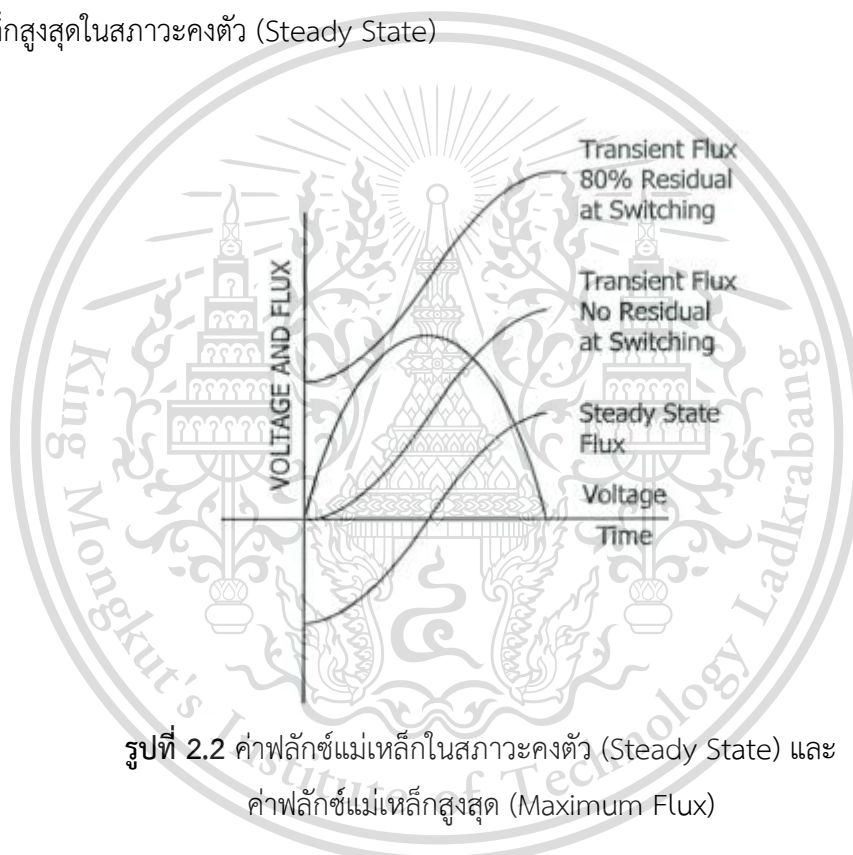
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นแม่เหล็กกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อพิจารณาตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ที่ถูกจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับคงที่ จะสังเกตได้ว่าขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคล้องในวงจรแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจะเริ่มต้นจากค่ายอด (Peak) สูงสุดทางด้านลบและเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่ายอดที่เท่ากันของด้านบวกภายในช่วงเวลาครึ่งไซเคิลของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะถือว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยมีขนาดเป็นสองเท่าของค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในช่วงเวลาครึ่งไซเคิลของแรงดันไฟฟ้า จากกราฟฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะสภาวะคงที่ในรูปที่ 2.2 จะสังเกตได้ว่าที่ตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งหมดในช่วงครึ่งไซเคิลแรกจะมีค่าที่แกว่งไปมาทั้งด้านบวกและด้านลบ แต่ถ้าฟลักซ์แม่เหล็กเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์ขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ตรงตำแหน่งแรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าประมาณ 2 เท่าของค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในสภาวะคงตัว (Steady State)



รูปที่ 2.2 ค่าฟลักซ์แม่เหล็กในสภาวะคงตัว (Steady State) และค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (Maximum Flux)

จากคำอธิบายข้างต้นแสดงให้เห็นว่าในตัวเหนี่ยวนำที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ยกตัวอย่างเช่นตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนอากาศ กระแสจะไหลเพิ่มสูงขึ้นจนมีขนาดประมาณสองเท่าของค่ากระแสในสภาวะคงตัว อย่างไรก็ตามขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนเหล็ก ซึ่งโดยปกติจะมีค่าฟลักซ์มีเหล็กสูงสุดอยู่ใกล้กับจุดอิ่มตัว (Saturation) ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กถึงสองเท่าย่อมทำให้เกิดการอิ่มตัวอย่างมากในแกนเหล็ก และจะทำให้กระแสกระตุ้นแม่เหล็กมีขนาดสูงขึ้นอย่างมากจนอาจมีค่ามากกว่ากระแสเต็มพิกัด โดยเรียกกระแสกระตุ้นแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระแสอินรัช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ที่พบว่ามีใช้ผิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

นอกจากนี้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างยังสามารถทำให้ขนาดของกระแสอินรัชมีค่าสูงมากขึ้น โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.2 แทนที่ค่าฟลักซ์แม่เหล็กขณะเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ให้สมมติว่ามีค่าของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างเริ่มต้นค่าหนึ่งและอยู่ในทิศเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก โดยกำหนดให้อัตราการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กเท่าเดิม จะพบว่า ในช่วงครึ่งไซเคิลแรกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ได้ใหม่จะมีค่าสูงถึง 2.8 เท่าของค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในสภาวะคงตัว เมื่อกำหนดค่าฟลักซ์ที่ตกค้างมีค่าประมาณ 80% ของค่าสูงสุดในสภาวะคงตัว



รูปที่ 2.3 คลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น

ค่าความหนาแน่นสูงของฟลักซ์แม่เหล็กที่อยู่ในแกนเหล็กดังที่แสดงไว้ข้างต้นนั้นมีความสูงเกินกว่าย่านทำงานปกติ ที่กำหนดให้อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความซึมซาบแม่เหล็กในแกนเหล็กมีค่าคงที่ และค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ของขดลวดมีค่าต่ำลงจนใกล้เคียงค่าของตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนอากาศ ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นพบว่ากระแสจะเริ่มต้นจากศูนย์และค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆในช่วงแรก ค่าฟลักซ์ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงกว่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างเล็กน้อย และค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเหล็กมีค่าสูงขึ้นพอประมาณ ต่อมาเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กมีค่ามากเกินไปจนการทำงานปกติและเข้าสู่ช่วงสนามแม่เหล็กอิ่มตัวสูงตามคุณลักษณะการกระตุ้นแม่เหล็ก (The Magnetizing Characteristic) ค่าความเหนี่ยวนำที่จะได้ลดลงและกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าสูงสุดในช่วงครึ่งไซเคิลแรกของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอาจจะมีค่าสูงถึง 500 เท่ากระแสในสภาวะคงตัว ต่อมาเมื่อผ่านช่วงฟลักซ์สูงสุด ที่ตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ในช่วงครึ่งไซเคิลหลังรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านลบจะทำให้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กลดลงไปยังตำแหน่งเริ่มต้นใหม่อีกครั้งโดยกระแสอินรัชจะลดลงจนเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.3 รูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะซ้ำๆกัน โดยรูปคลื่นนี้จะค่อยๆเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยอาศัยค่าความสูญเสียในวงจรไฟฟ้าที่เกิดจากความต้านทานระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าเท่านั้น สำหรับค่าคงที่เวลา (Time Constant) ของกระแสทรานเซียนต์นี้ อาจะเริ่มต้นจาก 0.1 วินาทีสำหรับหม้อแปลงขนาดประมาณ 100 kVA ไปจนกระทั่งถึง 1 วินาที สำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามจากคุณลักษณะการกระตุ้นแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) และไม่เป็นฟังก์ชัน Exponential ที่ชัดเจนจึงทำให้ สามารถเห็นผลของกระแสอินรัชนานถึง 30 นาทีหลังการสับเซอร์กิตเบรกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เผยแพร่เพื่อประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สำหรับการสวิตช์ซึ่งที่ตำแหน่งอื่นๆ บนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ค่ากระแสทรานเซียนต์ที่ต่ำลงไป และถ้าตำแหน่งการสวิตช์ซึ่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้านั้นทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในสภาวะคงตัวก่อนการสวิตช์ซึ่ง ก็จะทำให้ไม่เกิดผลของกระแสอินรัชเกิดขึ้น โดยกระแสที่จะได้มีลักษณะเหมือนกับกระแสขณะไม่มีโหลดทันที

ในกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ตำแหน่งการสวิตช์ซึ่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีความแตกต่างกัน ดังนั้นรูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นก็จะมีลักษณะแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้รูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นจะยังได้รับผลกระทบจากฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคล้องระหว่างเฟส อันเนื่องมาจากการรวมกันของฟลักซ์แม่เหล็กทุกเฟสในแกนเหล็ก ซึ่งในกรณีนี้หากเฟสใดเฟสหนึ่งทำการ สวิตช์ซึ่งตรงตำแหน่งที่ไม่ทำให้เกิดผลของกระแสอินรัชขณะจ่ายไฟนั้น ก็ยังจะได้รับผลของกระแสอินรัชจากเฟสอื่น ดังนั้นในกรณีนี้ถึงแม้ว่ารูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นจะไม่ถูกยกจากแกนนอน แต่จะมีความบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระแสอินรัชไม่ถูกยกขึ้น (Offset) เนื่องจากผลของแกนเหล็กอิ่มตัว

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

2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสอินรัช[1]

1. ขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ขนาดพิกัดของระบบไฟฟ้า
3. ค่าความต้านทานในระบบไฟฟ้าระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า
4. ชนิดของแกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นในการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก (Saturation density)
5. ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงไฟฟ้า (Residual Flux) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
6. วิธีการจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อี... ทั้งนี้... การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

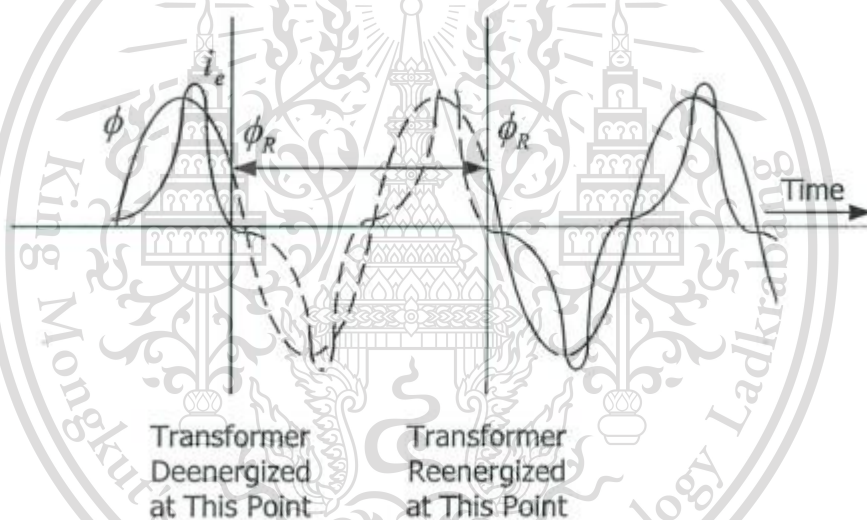
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

นอกเหนือจากกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจ่ายไฟแล้ว กระแสอินรัชยังสามารถเกิดขึ้นขณะจ่ายไฟของหม้อแปลงตัวอื่นๆ ที่อยู่ในระบบไฟฟ้า หรือการปลดโหลดออกจากหม้อแปลงอย่างทันทีทันใด ซึ่งสามารถแบ่งกระแสอินรัชตามลักษณะการเกิดได้ดังนี้

2.2.2 กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟ (Initial Inrush)

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าถูกปลดออกจากระบบไฟฟ้า กระแสกระตุ้นแม่เหล็กจะลดลงเป็น ศูนย์ ส่วนฟลักซ์แม่เหล็กจะค่อยลดลงตาม Hysteresis Loop จนเหลือค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ϕ_R (ดังแสดงในรูป 2.5) ต่อมาเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟอีกครั้ง ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดัน ไฟฟ้าที่ค่าฟลักซ์แม่เหล็กมีความต่อเนื่องจากตำแหน่งที่ปลดหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบนั้น ก็จะไม่ปรากฏของกระแสกระตุ้นแม่เหล็กทรานเซียนต์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.5) อย่างไรก็ตามในทาง ปฏิบัติแทบเป็นไปไม่ได้ที่อุปกรณ์ตัดต่อจะควบคุมตำแหน่งการสวิตซ์ซึ่งได้ ดังนั้นกระแสทรานเซียนต์อินรัชที่เกิดขึ้นจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้



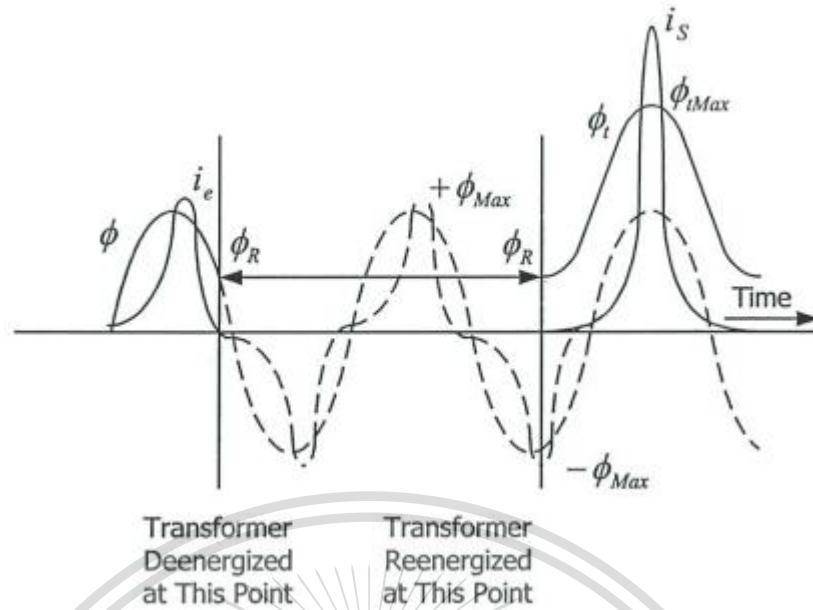
รูปที่ 2.5 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงจ่ายไฟซ้ำ ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก

ในรูปที่ 2.6 สมมุติให้หม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟอีกครั้ง ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดัน ไฟฟ้าที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่ำสุด ($-\phi_{max}$) ซึ่ง ณ ตำแหน่งดังกล่าว ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง (Residual Flux) ก่อนการปลดวงจรมีค่าเป็นบวกประมาณ 50% แต่เนื่องจากคุณสมบัติของฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทันทีทันใด ดังนั้นรูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นแทนที่จะ เริ่มต้นจากจุด ($-\phi_{max}$) และค่อยๆเปลี่ยนแปลงไปตามเส้นประก็จะเริ่มต้นจากค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างและค่อยๆเพิ่มขึ้นไปตามเส้นกราฟ ($-\phi_t$) ในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.6 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงจ่ายไฟฟ้า ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า
ที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอยู่ที่ค่าสูงสุด

เส้นกราฟ ϕ_c ที่เกิดขึ้นมีความบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นไซน์ปกติ เป็นผลเนื่องมาจาก
คุณลักษณะของสภาพการอิ่มตัวในวงจรแม่เหล็ก (The magnetic circuit's saturation
characteristic) โดยทางทฤษฎีกล่าวไว้ว่า

$$\phi_{max} = \pm(|\phi_R| + 2|\phi_{max}|) \quad (2.1)$$

ส่วนในการออกแบบหม้อแปลงตามหลักเศรษฐศาสตร์ ค่าความเข้มข้นการอิ่มตัวของฟลักซ์
แม่เหล็กที่ประหยัดที่สุด (Economical saturation density) ϕ_s จะไม่ได้ออกแบบเพื่อไว้มากนัก
ดังนั้น ค่ายอดของฟลักซ์แม่เหล็ก ϕ_c จะทำให้เกิดการอิ่มตัวด้วยความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด
(Supersaturation) ในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งผลที่ได้จะให้เกิดกระแสกระตุ้นแม่เหล็กที่สูงมาก ดังรูปที่ 2.6

ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ϕ_R คือฟลักซ์แม่เหล็กที่ยังคงตกค้างอยู่ในแกนเหล็กหลังจากปลด
ไฟออกจากหม้อแปลงไฟฟ้า โดยกระแสจะไหลต่อไปอีกชั่วขณะหลังจากแรงดันไฟฟ้าถูกปลดออก
ค่าฟลักซ์จะค่อยๆ ลดลงตาม Hysteresis Loop จนเหลือค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ϕ_R เมื่อ
กระแสมีค่าเป็นศูนย์ และในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ค่าฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสจะมีมุมต่าง
กัน 120° จึงทำให้ถ้าเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับ $+\phi_R$ อีก 2 เฟสที่เหลือจะมีค่าเท่ากับ $-\phi_R$ โดยผลลัพธ์ของ
กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นจะเป็นผลมาจากค่าของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ณ ตำแหน่งแรงดันที่ทำการสวิตช์
ซึ่งรวมกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้

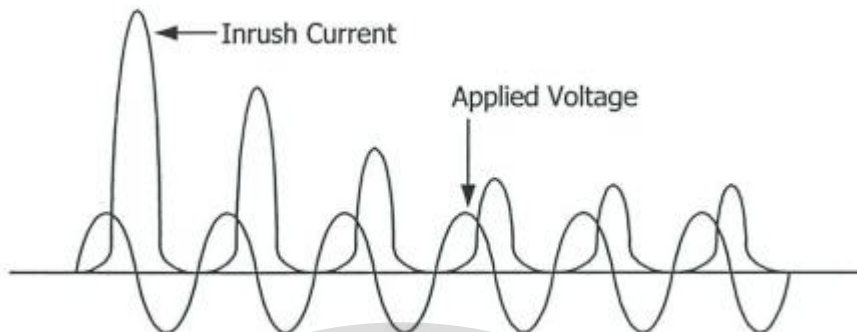
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปคลื่นของกระแสอินรัชทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.7 ในช่วง 2-3 ไซเคิลแรก ขนาดของกระแสอินรัชจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากนั้นกระแสจะลดลงช้าๆ อาจกินเวลาหลายวินาทีในกรณีที่ค่าความต้านทานระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าต่ำ



รูปที่ 2.7 คลื่นกระแสอินรัชกระตุ้นแม่เหล็กทั่วไป

ค่าคงที่เวลา (Time constant) ซึ่งโดยปกติมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าเหนี่ยวนำกับค่าความต้านทาน (L/R) แต่สำหรับในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำ (L) สามารถเปลี่ยนแปลงตามค่าความอิ่มตัวแม่เหล็กในแกนเหล็กหม้อแปลง (Transformer saturation) โดยในระหว่าง 2-3 ไซเคิลแรก ค่าความอิ่มตัวแม่เหล็กจะมีค่าสูง ซึ่งเป็นผลให้ค่าความเหนี่ยวนำ (L) มีค่าต่ำ ต่อมาเมื่อในวงจรมีความต้านทาน (Losses damp) เกิดขึ้น ทำให้ค่าความอิ่มตัวแม่เหล็กลดลง เป็นผลให้ค่าความเหนี่ยวนำ (L) มีค่าเพิ่มขึ้น

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

ค่าความต้านทานระหว่างแหล่งกำเนิดกับตัวหม้อแปลงเป็นอีกปัจจัยหลักในการกำหนดอัตราการลดลง (Damping) ของรูปคลื่นกระแส โดยหม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีช่วงการเกิดกระแสอินรัชยาวนานกว่าเนื่องจากค่าความต้านทานต่ำ ซึ่งคล้ายกันกับหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาดใหญ่ก็จะมีช่วงของกระแสอินรัชที่ยาวนาน เนื่องจากมีค่าความเหนี่ยวนำที่สูงกว่า ในทางตรงกันข้าม สถานีไฟฟ้าที่อยู่ไกลออกไป กระแสอินรัชจะเกิดขึ้นไม่นานเนื่องจากค่าความต้านทานของ สายส่งจะช่วยให้กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นลดลงอย่างรวดเร็ว

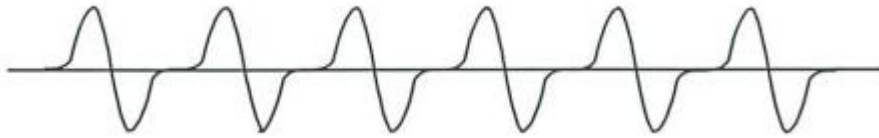
นอกเหนือจากเงื่อนไขดังกล่าวซึ่งมีผลกระทบต่อกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า ชนิดเฟสเดียวแล้ว รูปคลื่นกระแสอินรัชในขดลวดที่ต่อแบบเดลต้า ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ยังได้รับผลกระทบจากจำนวนของแกนเหล็กและผลรวมเวกเตอร์ของกระแสในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเริ่มต้นจากกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีแกนเหล็กมากกว่าหนึ่ง กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสจะมีมุมแตกต่างกัน 120° จะทำให้รูปคลื่นของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นปกติ และรูปคลื่นกระแสรวมมีลักษณะคล้ายการแกว่ง (Oscillatory) ดัง แสดงในรูปที่ 2.8 ต่อมาถ้ารูปคลื่นของกระแสอินรัชแบบหลายเฟส หรือ เฟสเดียวในขดลวด แบบเคลดต้า ซึ่งได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาและเผยแพร่ในวงจำกัดเท่านั้น ไม่สามารถนำออกไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม กรุณาแจ้งชื่อของเอกสารนี้แก่ผู้จัดทำเอกสารทุกครั้ง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เฟส (L-L) หากสมมติว่ามีแกนเหล็กเพียงแกนเดียวที่อิ่มตัว ธรรมชาติของ กระแสในสายส่งจะทำให้รูปคลื่นที่เกิดขึ้นแกว่งไปมาและบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นปกติ



รูปที่ 2.8 คลื่นกระแสอินรัชที่สร้างขึ้นในขดหนึ่งของการต่อแบบเดลต้า หรือด้านทุติยภูมิของการต่อแบบเดลต้าในหม้อแปลงกระแส

ขนาดสูงสุดของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถคำนวณได้โดยอาศัยกราฟการกระตุ้นแม่เหล็ก (Excitation curve) ส่วนในตารางที่ 2.1 แสดงค่าการคำนวณทั่วไปของขนาดสูงสุดของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น โดยจากค่าการคำนวณนี้จะพบว่า

1. ถ้าค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กขณะอิ่มตัว (the saturation density lux) ϕ_s มีค่าต่ำลงจะทำให้ค่ายอด (peak) ของกระแสอินรัชมีค่าสูงขึ้น
2. ค่าสูงสุดของกระแสอินรัช เฟส-กระแส จะเกิดขึ้นใกล้กับมุมศูนย์ (เช่น แรงดันไฟฟ้าศูนย์)
3. ค่าสูงสุดของกระแสอินรัชในสายส่งจะเกิดขึ้นใกล้กับมุม $\pm 30^\circ$ ของมุมสวิตซ์ซึ่ง

ตารางที่ 2.1 การคำนวณขนาดสูงสุดของกระแสอินรัชทั่วไป

ϕ_s	Closing Angle	Peak Value of Inrush Current Wave (p.u.)					
		I_a	I_b	I_c	I_a-I_b	I_b-I_c	I_c-I_a
1.40	0°	5.60	-3.37	-3.37	8.33	-3.73	-8.33
1.40	30°	5.10	-5.10	-5.10	5.96	5.10	-9.20
1.15	0°	6.53	-4.67	-4.67	10.20	-4.67	-10.20
1.15	30°	6.03	-6.03	-6.03	7.83	6.03	-11.06

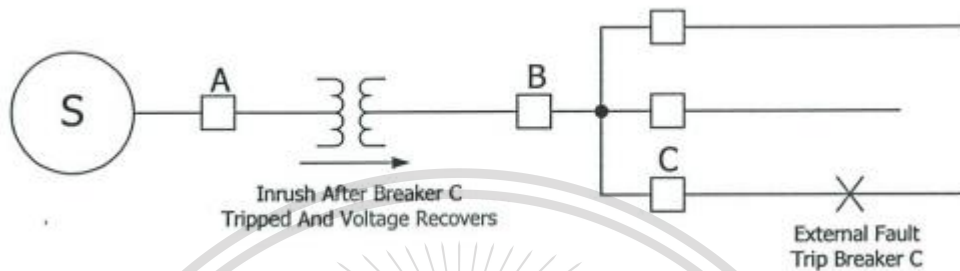
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.3 กระแสอินรัชชดเชย (Recovery inrush)

คือกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นภายหลังจากที่ฟอลต์ภายนอก โชนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าถูกกำจัดไปและแรงดันไฟฟ้ากลับสู่สภาวะปกติ (ดังรูปที่ 2.9) ซึ่งคล้ายกับว่าหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟใหม่เพียงบางส่วน ดังนั้นค่ากระแสอินรัชชดเชยจะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้น ขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟเสมอ



รูปที่ 2.9 กระแสอินรัชชดเชย (Recovery Inrush) หลังจากฟอลต์ภายนอกโชนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าถูกกำจัด

2.2.4 กระแสอินรัชสะท้อน (Sympathetic inrush)

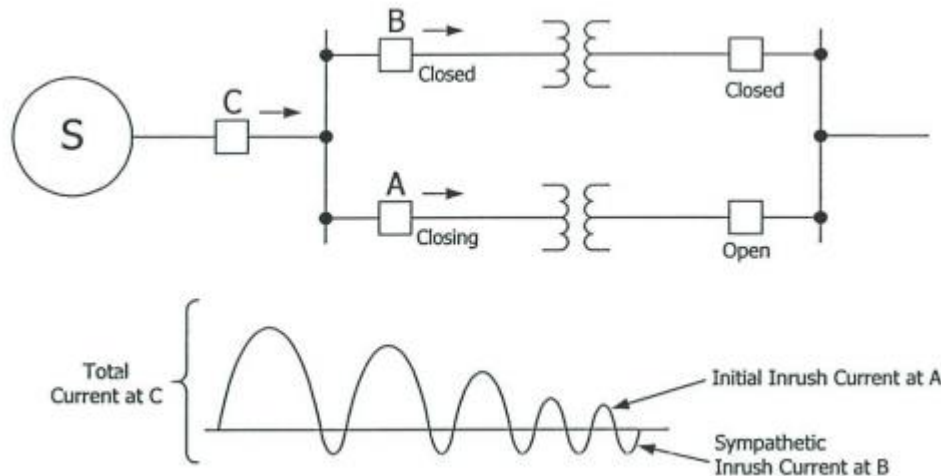
เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าต่อขนานกันในวงจรสองตัว หม้อแปลงไฟฟ้าตัวจ่ายไฟอยู่ก่อนจะแสดงผลของกระแสอินรัชสะท้อน (Sympathetic inrush) ซึ่งค่ากระแสอินรัชที่เพิ่มขึ้นจากหม้อแปลงที่กำลังถูกจ่ายไฟ จะส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงอีกตัวที่ขนานอยู่ด้วยเช่นกัน โดยองค์ประกอบกระแสตรง (d-c component) ที่อิมตัวอยู่ในแกนเหล็กของหม้อแปลงจะทำหน้าที่สร้างกระแสอินรัช โดยขนาดของกระแสอินรัชนี้ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปของวงจรที่ต่อขนานเพิ่มขึ้น และเช่นเดียวกันกระแสอินรัชสะท้อนจะมีขนาดน้อยกว่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้น ขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟเสมอ

ดังรูปที่ 2.10 ค่ากระแสทั้งหมดที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ C มีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้า A ถูกจ่ายไฟ กับค่ากระแสอินรัชสะท้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า B โดยรูปคลื่นผลรวมของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกับกระแสฟอลต์ และอาจทำให้รีเลย์ป้องกันชนิดตรวจจับฮาร์โมนิก (Harmonic Restraint Differential Relay) ที่อาศัยการตรวจจับกระแสที่เกิดขึ้นในขดลวดทั้งสองฝั่งของหม้อแปลงทำงานผิดพลาดได้

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ชนิดที่ต่อตรงกับหม้อแปลงไฟฟ้าจะไม่แสดงผลของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟ เนื่องจากว่าหม้อแปลงดังกล่าวจะค่อยๆ ถูกเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจนกระทั่งถึงแรงดันไฟฟ้าปกติ ในทางเดียวกันพบว่ากระแสอินรัชชดเชยและกระแสอินรัชสะท้อนจะแสดงผลชัดเจนกว่า แต่ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าค่ากระแสอินรัชทั้งสองมีขนาดเล็กกว่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟอยู่หลายเท่า จึงทำให้ผลรวมของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงที่ต่อตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.10 กระแสอินrushสะท้อน (Sympathetic Inrush) เกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าต่อขนานอยู่กับหม้อแปลงไฟฟ้าอีกตัวที่กำลังจ่ายไฟ

2.2.5 องค์ประกอบฮาร์มอนิกในรูปคลื่นกระแสอินrush (Harmonic content of inrush waveform)

หลังจากที่ได้ทราบเกี่ยวกับลักษณะการเกิดกระแสอินrushในหม้อแปลงไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ แล้ว นอกจากจะพบว่ากระแสอินrushเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าหรือตัวเหนี่ยวนำซึ่งแทบไม่มีโอกาสหลีกเลี่ยงได้ ในบทนี้ยังได้แสดงให้เห็นว่ากระแสอินrushที่มีขนาดสูงที่สุดเกิดขึ้นในขณะที่ยหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟครั้งแรก ดังนั้นเพื่อพัฒนาระบบรีเลย์ป้องกันของหม้อแปลงให้สามารถที่จะเรียนรู้และวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสอินrushกับกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาคูณลักษณะเฉพาะของรูป คลื่นกระแสอินrushที่แตกต่างจากกระแสฟอลต์ การวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์มอนิกเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างรูปคลื่นกระแสทั้งสองได้อย่างชัดเจน

รูปคลื่นของกระแสกระตุ้นแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วยสัดส่วนของฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ซึ่งมีจำนวนมากขึ้นตามปริมาณความหนาแน่นของค่าสูงสุดฟลักซ์แม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดอิ่มตัวของแกนเหล็ก จากการแปลงฟูเรียร์เพื่อหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกพบว่า เมื่อรูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นมีลักษณะสมมาตรกับแกนนอน องค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะมีเพียงองค์ประกอบฮาร์มอนิกเฉพาะลำดับที่เป็นเลขคู่เท่านั้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นคุณสมบัติทั่วไปที่เกิดขึ้นเมื่อรูปคลื่นกระแสสลับไหลผ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่มีคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้า (Directional Polarizing) โดยขณะที่หม้อแปลงอยู่ในสภาวะอิ่มตัว กระแสไฟฟ้าที่ไหลในหม้อแปลงจะประกอบจากองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และองค์ประกอบฮาร์มอนิกคู่ลำดับอื่นๆ ที่สูงขึ้นไปอีกเล็กน้อย ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่มากขึ้นจะสัมพันธ์กับสภาพความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กโดยตรง เช่น ถ้าระดับความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น จะทำให้จำนวนองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ เพิ่มขึ้น นอกเหนือจากจำนวนองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เพิ่มมากขึ้นแล้ว ขนาดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 จะมีค่าสูงขึ้นไปจนมีค่ามากกว่าขนาดขององค์ประกอบลำดับที่ 3 ด้วย และถ้าระดับความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นไปอีก ก็อาจจะทำให้ขนาดขององค์ประกอบฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ลำดับที่ 7 สูงกว่าขนาดขององค์ประกอบลำดับที่ 5 ได้ แต่อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวระหว่างระดับความอึดตัวของสนามแม่เหล็กยังไม่ได้ถูกทดสอบกับหม้อแปลงใน ระบบไฟฟ้ากำลัง

ในขณะที่หม้อแปลงถูกจ่ายไฟ รูปลักษณ์ของกระแสกระตุ้นแม่เหล็กหรือกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีลักษณะไม่สมมาตรกับแกนนอน แต่เมื่อตัดการพิจารณาเกี่ยวกับขนาดของกระแสที่ลดลง จะพบว่ารูปลักษณ์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะสมมาตรกันระหว่างช่วงขาขึ้นกับขาลง โดยรูปลักษณ์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบฮาร์มอนิกทั้งที่เป็นลำดับคู่และคี่ ซึ่งเมื่อทำการแปลงฟูเรียร์เพื่อแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสอินรัชพบว่า ในช่วงแรกจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 และ 3 เป็นหลัก ในส่วนองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆ ที่สูง ขึ้นไปจะลดน้อยลง และเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวอัตราส่วนขององค์ประกอบฮาร์มอนิกจะเปลี่ยน แปลงไปตามระดับการอึดตัวของสนามแม่เหล็กที่ลดลง ดังนั้นสัญญาณทรานเซียนต์ในกระแสอินรัชก็จะลดลงด้วย ซึ่งถ้ากระแสอินรัชมีขนาดลดลงจนไม่แสดงผลของรูปลักษณ์ที่ถูกยก (Offset) ดัง รูปที่ 2.8 อย่งไรก็ตามรูปลักษณ์ดังกล่าวยังมีลักษณะไม่สมมาตรกับแกนนอนเนื่องจากผลรวมของ ฟลักซ์แม่เหล็กในหม้อแปลง แต่เมื่อพิจารณาเลือกตำแหน่ง (Ordinate) บนรูปลักษณ์ใดๆ ก็จะสามารถ เห็นรูปลักษณ์ที่สมมาตรกับตัวเองได้ โดยรูปลักษณ์ที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วยฮาร์มอนิกทั้งลำดับเลขคู่ และคี่รวมกัน

2.3 เสถียรภาพของระบบรีเลย์ป้องกันชนิดผลต่างกระแสระหว่างการเกิดกระแสอินรัช

ปรากฏการณ์การเกิดกระแสอินรัชแม่เหล็กดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งเป็นผลให้กระแสที่ไหลเข้าขดลวดด้านที่ถูกจ่ายไฟไม่เท่ากับกระแสในขดลวดอีกด้านหนึ่งของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้น ผลต่างกันเกิดขึ้นจากกระแสอินรัชนั้น ส่งผลให้กระแสมีลักษณะไม่สมดุล (Unbalance) และทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ความแตกต่างกับกระแสที่เกิดจากการลัดวงจรภายในได้ ซึ่งการ ตั้งค่ากระแสชดเชยทั่วไปใช้ไม่ได้ผลและการเลื่อนค่าเซตตั้งของระบบป้องกันเพื่อหนีไม่ให้ระบบ ป้องกันทำงานนั้นทำได้ยาก ดังนั้นเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของรีเลย์ในการตรวจจับการเกิดกระแส อินรัชในลักษณะต่างๆ ดังต่อไปนี้

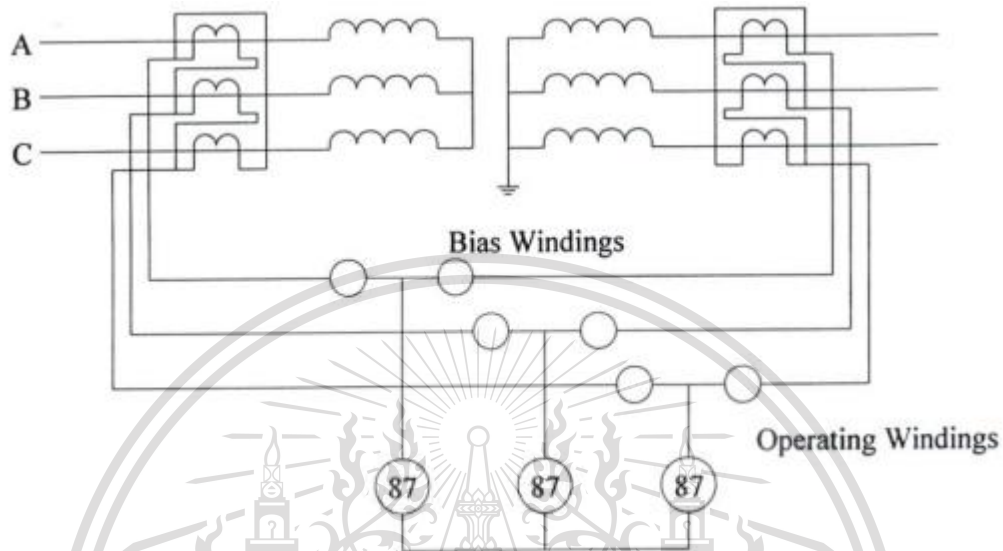
2.3.1 การหน่วงเวลา

เมื่อปรากฏการณ์การเกิดกระแสอินรัชนั้นเป็นลักษณะสัญญาณทรานเซียนต์ซึ่งเกิดขึ้น ชั่วขณะ การหน่วงเวลาจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ได้ผลและมีใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อเพิ่มเสถียรภาพ ให้กับระบบป้องกัน

สำหรับการประยุกต์เทคนิคการหน่วงเวลาในรีเลย์กระแสเกินชนิดจับปล้น (Instantaneous Overcurrent Relay) ทำได้โดยการต่อรีเลย์ดังกล่าวขนานกับฟิวส์ที่เรียกว่า KickFuse ซึ่งทำหน้าที่เป็นทางผ่านของกระแสส่วนใหญ่ในวงจร โดยการเลือกขนาดฟิวส์จะต้องเลือกให้ สามารถทนต่อขนาดของกระแสอินรัชทรานเซียนต์ได้ และจะขาดออกก็ต่อเมื่อเกิดการลัดวงจรภายใน ซึ่งเมื่อขาดออกจะทำให้รีเลย์ที่ต่อขนานอยู่รับกระแสทั้งหมดจึงส่งสัญญาณตัดวงจรต่อไป

ส่วนรีเลย์ DDT แบบใช้ตัวเหนี่ยวนำมีความเหมาะสมทั้งคุณลักษณะทางด้านเวลา และการชดเชยกระแส โดยแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 2 ตัวที่ติดตั้งอยู่ด้านเดียวกันของแผ่นจานหมุนจะสร้างแรง (Torque) มาหักล้างกัน อุปกรณ์อื่นๆ ถูกต่ออยู่แบบ Merz-Price ดังรูปที่ 2.11 โดยค่าเซตตั้ง สามารถปรับได้ตั้งแต่ 40-100% ค่าความชันสำหรับการชดเชยกระแสสามารถเลือกได้จากแท็บที่มี ค่า 20%, 30% หรือ 40% ซึ่งช่วงเวลาสั้นๆ ที่ใช้ในการหน่วงเวลาทำงานของรีเลย์จะกำหนดมา

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



รูปที่ 2.11 การชดเชยของรีเลย์ผลต่างสำหรับขดลวดทั้งสองในหม้อแปลงชนิดสตาร์/สตาร์

เป็นไปได้ที่ค่าเวลาการหน่วงซึ่งถูกกำหนดข้างต้นอาจจะไม่เพียงพอสำหรับป้องกันการดำเนินงานผิดพลาดของรีเลย์ในทุกกรณีสำหรับการเกิดกระแสอินรัชตังนั้นในทางปฏิบัติจึงมีการปรับปรุงจากรีเลย์ชนิดตัวเหนี่ยวนำที่มีผลการตอบสนองต่ำไปเป็นรีเลย์แบบกระแสไหลทางเดียว

2.3.2 การตรวจจับองค์ประกอบฮาร์โมนิก (Harmonic Restraint)

สำหรับระบบป้องกันหม้อแปลงที่ดีที่สุดคือ หากมีฟอลต์เกิดขึ้นจะต้องทำการเคลียร์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นโดยไม่มีการหน่วงเวลาเพื่อให้หม้อแปลงมีความเสียหายน้อยที่สุดและระบบไฟฟ้าได้รับผลกระทบน้อยที่สุด ซึ่งวิธีการดังกล่าวอาจส่งผลให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างไรก็ตาม กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นแม้ว่า จะมีความคล้ายกับกระแสที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรภายในนั้น แต่เมื่อสังเกตโดยละเอียดจะพบความแตกต่างอย่างมากเมื่อนำรูปคลื่นกระแสทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งลักษณะเฉพาะของความแตกต่างที่พบสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับแบ่งแยกประเภทของกระแสทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น กระแสอินรีชประกอบด้วยองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ แต่ขนาดขององค์ประกอบเหล่านี้ก็มีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นในการศึกษาวิเคราะห์เกี่ยวกับเรื่องนี้จึงมีความซับซ้อนสูง เนื่องจากรูปคลื่นกระแสอินรีชที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงตามระดับความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กและคุณภาพของเหล็กที่นำมาใช้ทำแกนเหล็ก ซึ่งหลักการต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

2.3.2.1 องค์ประกอบกระแสตรง (DC or Offset Component)

องค์ประกอบกระแสทิศทางเดียวมักจะถูกพบว่าเป็นองค์ประกอบในกระแสอินรีช ของหม้อแปลงชนิดเฟสเดียวอยู่เสมอตามหลักการการเกิดกระแสอินรีชของระบบ 3 เฟส อย่างไรก็ตามถ้ามีการสวิตช์ซึ่ง ณ ตำแหน่งที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างเฟสใดเฟสหนึ่งเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กก่อนการปลดวงจร ก็จะไม่มีการรบกวนจากกระแสทรานเซียนต์เกิดขึ้นในเฟสนั้น ส่วนอีก 2 เฟสที่เหลือจะเกิดกระแสอินรีชขนาดสูง เนื่องมาจากการที่ฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็กของเฟสนั้นมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กสูงๆ ที่เกิดขึ้นไหลวนในแกนเหล็กของหม้อแปลง 3 เฟสจะส่งผลกระทบต่อรูปคลื่นกระแสของเฟสแรกที่ไม่แสดงผลกระทบของการเกิดกระแสอินรีช โดย ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะทำให้รูปคลื่นกระแสในเฟสแรกมีลักษณะบิดเบี้ยวดังรูปที่ 2.4 แต่จะไม่ถูก ยกขึ้นเหนือแกนนอน โดยสรุปถ้าจะนำองค์ประกอบของกระแสทิศทางเดียวมาใช้เพื่อเพิ่ม เสถียรภาพในระบบป้องกันชนิดผลต่างกระแส อาจจำเป็นต้องชดเชยกระแสจากผลกระทบดังกล่าว ด้วยการไขว้เฟส (Cross-Phase Biasing)

2.3.2.2 องค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่สอง (Second Harmonic)

องค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่สองนี้จะปรากฏอยู่ในรูปคลื่นกระแสอินรีชทุก แบบ นอกจากนี้ยังมีรูปแบบของรูปคลื่นกระแสที่เป็นมาตรฐาน โดยที่ทุกๆ ครึ่งไซเคิลถัดไปจะไม่พบลักษณะกลับหัวกันแบบกระแสสลับ แต่เมื่อเลือกตำแหน่งพิกัดที่เหมาะสม ก็จะทำให้รูปคลื่นกระแสอินรีชนั้นมีลักษณะสมมาตรกันได้ สัดส่วนขององค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่สองจะ เปลี่ยนไปตามระดับความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก แต่กระแสที่เกิดจะมีทิศทาง เดียวกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นและคงอยู่ให้นานที่สุดเสมอ โดยขนาดของกระแสอินรีชที่เกิดขึ้นมี ค่ามากกว่ากระแสขณะสภาวะคงตัวอยู่อย่างน้อย 20% รูปคลื่นที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.2.2.1 ดังแสดง ในรูปที่ 2.4 ประกอบไปด้วยอัตราส่วนขององค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่สองถึงแม่รูปคลื่นจะไม่ ถูกยกขึ้น แต่ก็มีจุดเริ่มต้นในทิศทางเดียวกับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง

โดยปกติกระแสลัดวงจรจะไม่มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่สองและฮาร์โมนิกลำดับที่เป็นเลขคู่ ซึ่งจะไม่ทำให้กระแสที่ไหลในแกนเหล็กที่อิ่มตัวในสภาวะคงตัวมีความบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นไซน์

กระแสขาออกของหม้อแปลงกระแสที่เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจะมีองค์ประกอบ ของฮาร์โมนิกลำดับที่เป็นเลขคู่เท่านั้น ไม่มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่เป็นเลขคู่ อย่างไรก็ตาม หม้อแปลงกระแสที่อิ่มตัวจากกระแสลัดวงจรจะมีรูปคลื่นของกระแสทางด้านขาออกของหม้อ แปลงกระแสมีลักษณะไม่สมมาตรและมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิกลำดับที่เป็นเลขคู่ ซึ่งลักษณะเฉพาะดังกล่าวนี้สามารถนำมาใช้สำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของรีเลย์ชนิด

This model is for informational purposes only. It is not intended to be used for any other purpose. The user assumes all responsibility for the use of this model. The user agrees to indemnify and hold the provider harmless from all claims, damages, and expenses, including reasonable attorneys' fees, arising from the use of this model. The user agrees to keep the provider informed of any use of this model in any public domain or any other medium. The user agrees to grant the provider a non-exclusive license to use the user's name and likeness in connection with the promotion and marketing of the provider's products and services. The user agrees to grant the provider a non-exclusive license to use the user's name and likeness in connection with the promotion and marketing of the provider's products and services. The user agrees to grant the provider a non-exclusive license to use the user's name and likeness in connection with the promotion and marketing of the provider's products and services.

ลัดวงจรภายในจะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นการใช้อุปกรณ์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สองนี้จึงเป็นหลักการที่น่าจะนำมาใช้สำหรับเพิ่มเสถียรภาพของระบบป้องกันกรณีเกิดกระแสอินรัช อย่างไรก็ตามจะต้องมั่นใจว่าหม้อแปลงกระแสที่นำมาใช้งานมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะไม่อิ่มตัวจนทำให้องค์ประกอบ ฮาร์มอนิกขณะเกิดกระแสลัดวงจรไปรบกวนและหน่วงเวลาการทำงานของรีเลย์ได้

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

2.3.2.3 องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สาม (Third Harmonic)

การใช้อุปกรณ์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สามที่อยู่ในกระแสอินรัชจะคล้ายกับการเปรียบเทียบสัดส่วนขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สอง

กระแสอินรัชในแต่ละเฟสจะมีความสัมพันธ์ชนิดเฟสตรงกัน (In Phase) กับแรง ขับเคลื่อนทางไฟฟ้า (Electromotive Forces) ทางด้านปฐมภูมิและองค์ประกอบฮาร์มอนิกจะมี ลักษณะคล้ายช่องว่างเวลาที่จะรวมฮาร์มอนิกลำดับที่สามในขดลวดทั้งสามไปสู่เฟสเดียว ถ้าขดลวด ต่อในลักษณะ Delta ค่ากระแสในสาย (Line Current) จะเท่ากับผลต่างกระแสระหว่างสองเฟส จาก องค์ประกอบของกระแสอินรัชที่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะทรานเซียนต์ จึงเป็นไปได้ที่กระแสผลต่าง ดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สามของกระแสในสายก็จะหายไป ด้วย ซึ่งอาจทำให้เสถียรภาพของระบบไม่น่าไว้วางใจ นอกจากนี้องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สามยังสามารถเกิดขึ้นได้ในขณะที่หม้อแปลงกระแสอิ่มตัวจากกระแสฟอลต์ที่รุนแรงอีกด้วย

ด้วยเหตุผลทั้งหมดที่ได้แสดงนี้ ทำให้การใช้อุปกรณ์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สาม สำหรับระบบป้องกัน จึงไม่ควรนำมาใช้เพื่อป้องกันผลกระทบของกระแสอินรัช

2.3.2.4 องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สูงกว่า (Higher Harmonic)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวงการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ยัง สามารถเกิดขึ้นในขณะที่หม้อแปลงกระแสอิ่มตัวด้วยกระแสฟอลต์เช่นเดียวกับองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ดังนั้นจึงไม่ควรนำมาประยุกต์ใช้งาน สำหรับองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สูงขึ้นไป อีก

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ก็จะมีขนาดที่เล็กมากจนไม่คุ้มที่จะนำมาวิเคราะห์ สัดส่วนขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เทียบกับกระแสอินรัชจะมีค่าสูงชันอย่างชัดเจนเมื่อหม้อแปลงอยู่ในสภาพแรงดันไฟฟ้าเกิน บาง ผู้ผลิตพยายามประยุกต์การตรวจจับค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เพื่อให้รีเลย์ยับยั้งการทำงานขณะเกิดสภาวะดังกล่าว โดยทั่วไปในกรณีเกิดกระแสอินรัชจะมีสัดส่วนขององค์ประกอบ ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เทียบกับกระแสอินรัชประมาณ 30%

2.4 การประยุกต์เทคนิคการตรวจจับกระแสอินรัชในรีเลย์ป้องกันชนิดกระแสผลต่างสำหรับกราดป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า

2.4.1 การตรวจจับกระแสอินรัช

อีกคุณสมบัติของลักษณะของกระแสอินรัชดังรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 เมื่อรูปคลื่นกระแสมีค่าเท่ากับศูนย์ปรากฏอยู่ช่วงหนึ่งของคาบ ซึ่งตามทฤษฎีช่วงกระแสศูนย์ดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 14 ไมโครวินาที จึงสามารถตรวจจับได้ด้วยวงจรมีเวลา $T1$ ที่ตั้งค่าไว้ที่ $1/4f$ วินาที โดยรูปที่ 2.12 แสดงวงจรการตรวจจับในรูปแบบของแผนภาพวงจรมีเวลา $T1$ จะสร้างสัญญาณขาออก (Output) ก็ต่อเมื่อช่วงกระแสศูนย์มีค่ามากกว่า $1/4f$ วินาที และจะรีเซ็ตก็ต่อเมื่อค่ากระแสชั่วขณะของกระแสผลต่างเกินค่าที่ตั้งไว้

จากการที่ช่วงกระแสศูนย์ของกรณีกระแสอินรัชจะเกิดขึ้นในช่วงท้ายๆ ของไซเคิล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มเวลาสำหรับการตรวจจับอีก $1/f$ วินาที เพื่อให้รีเลย์ป้องกันมั่นใจว่าสามารถตรวจจับช่วงศูนย์ที่เกิดขึ้นได้แน่นอน ทำได้โดยใช้วงจรมีเวลา $T2$ ซึ่งจะถูกรีเซ็ตจากสัญญาณขาออกของวงจรมีเวลา $T1$



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงหลักการตรวจจับช่องว่างในรูปคลื่น

เมื่อไม่มีกระแสไหลในวงจรเกิน $1/4f$ วินาที วงจรมีเวลา $T2$ ก็จะถูกกรีเซ็ตและรีเลย์ชนิดผลต่างกระแสซึ่งถูกควบคุมด้วยวงจรมีเวลานี้ก็จะไม่สั่งตัดวงจร แต่เมื่อผลต่างกระแสเกินค่าเซ็ตติงของรีเลย์ วงจรมีเวลา $T1$ จะถูกรีเซ็ต ทำให้วงจรมีเวลา $T2$ หมดเวลาและส่งสัญญาณสั่งตัดวงจรในเวลา $1/f$ วินาที แต่ถ้ากระแสผลต่างเป็นลักษณะของกระแสอินรัช วงจรเวลา $T2$ ก็จะถูกกรีเซ็ตในทุกๆ ไซเคิล ดังนั้นสัญญาณสั่งตัดวงจรก็จะถูกยับยั้งไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

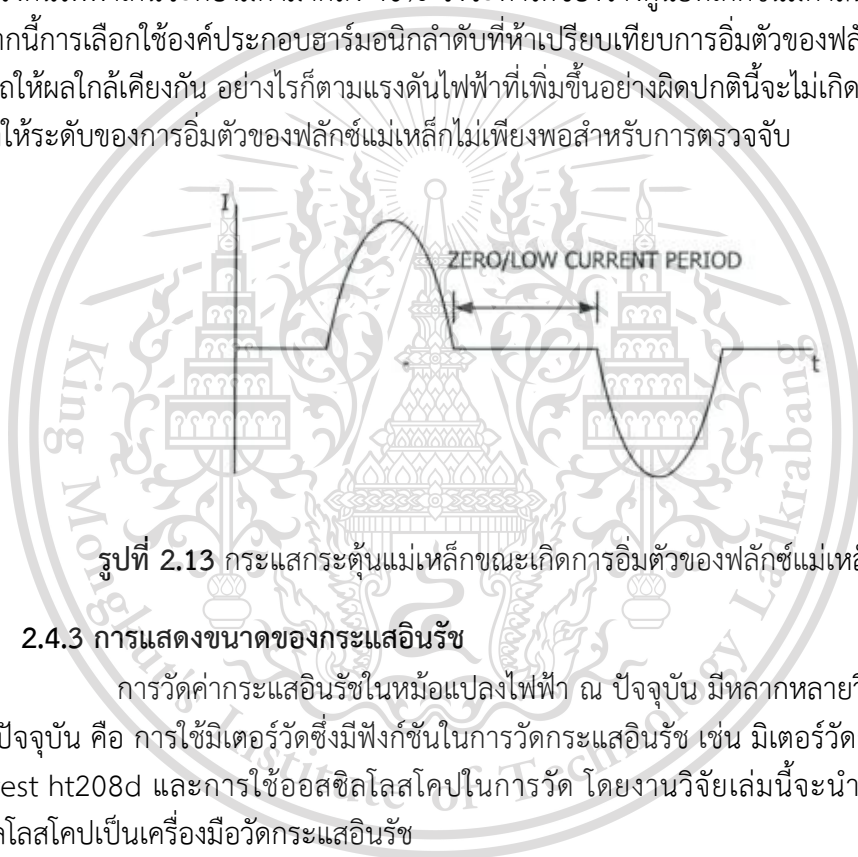
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4.2 การตรวจจัการอิมตัวของฟลักซ์แม่เหล็กในหม้อแปลง

เมื่อหม้อแปลงอยู่ในสภาพแรงดันไฟฟ้าเกิน จะมีพัลส์กระแสขนาดใหญ่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงทุกๆ ไซเคิล ซึ่งจะเกิดเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงกว่า Knee ของกราฟการกระตุ้นแม่เหล็ก (Magnetizing curve) ในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า

ค่ากระแสกระตุ้นแม่เหล็กจะเกิดขึ้น 2 ครั้งในทุกๆ ไซเคิลเมื่อกระแสมีค่าต่ำกว่าขอบเขตของผลต่างกระแสที่กำหนด (Differential setting threshold) ของรีเลย์ดังรูปที่ 2.13 โดยทั่วไปช่วงของกระแสที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามากกว่า $1/45$ วินาที ดังนั้นการทำงานของรีเลย์จะถูกยับยั้งหาก ตรวจพบรูปแบบของกระแสกระตุ้นแม่เหล็กนี้

เมื่อระดับการอิมตัวของฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้น ค่าช่องว่างศูนย์จะสั้นลง อย่างไรก็ตาม แรงดันไฟฟ้าเกินจะต้องมีค่ามากถึง 40% จึงจะทำให้ช่องว่างศูนย์ที่เกิดขึ้นมีค่าสั้นกว่าค่าปรับตั้ง นอกจากนี้การเลือกใช้อุปกรณ์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ห้าเปรียบเทียบการอิมตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก จะสามารถให้ผลใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างผิดปกติจะไม่เกิดขึ้นบ่อย ครั้งเป็นผลให้ระดับของการอิมตัวของฟลักซ์แม่เหล็กไม่เพียงพอสำหรับการตรวจจับ



รูปที่ 2.13 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะเกิดการอิมตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก

2.4.3 การแสดงขนาดของกระแสอินรัช

การวัดค่ากระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้า ณ ปัจจุบัน มีหลากหลายวิธี โดยวิธีที่นิยมใช้ ณ ปัจจุบัน คือ การใช้มิเตอร์วัดซึ่งมีฟังก์ชันในการวัดกระแสอินรัช เช่น มิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้ารุ่น habotest ht208d และการใช้ออสซิลโลสโคปในการวัด โดยงานวิจัยเล่มนี้จะนำเสนอวิธีการใช้ออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือวัดกระแสอินรัช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

การออกแบบหม้อแปลงขนาดเล็ก

3.1 ที่มาและความสำคัญของหม้อแปลงขนาดเล็ก

ในปัจจุบันหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก (Small transformers) ได้ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ การเลือกใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความต้องการ เช่น เมื่อพิจารณาถึงค่าความสูญเสียและการประหยัดพลังงานก็จะเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าความสูญเสียต่ำ หรือเมื่อผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าต้องการลดต้นทุนการผลิตเพื่อเพิ่มผลประกอบการก็จะเลือกผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาต่ำเป็นต้น จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยวิธีทั่วไป เมื่อต้องการออกแบบโดยกำหนดคุณลักษณะการใช้งานที่ต้องการ หรือปรับคุณลักษณะของ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ให้เปลี่ยนไป จะใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial and error) จากประสบการณ์และความชำนาญของผู้ออกแบบโดยการเปลี่ยนขนาดโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าเช่น ขนาดของ แกนเหล็ก และจำนวนรอบของขดลวด ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย อีกทั้งยังมีโอกาสที่จะไม่ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการที่ดีที่สุดด้วย

โดยเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือลดต่ำลงตามที่ต้องการ โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กประกอบด้วยขดลวดสองชุดพันอยู่บนแกนเหล็กรูป E- I กำลังไฟฟ้าจะถ่ายทอดจากขดลวดด้านหนึ่งไปสู่ขดลวดอีกด้านหนึ่งผ่านทางสนามแม่เหล็ก ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กจะกระจายอยู่ในแกนเหล็กที่ขดลวดพันอยู่ขดลวดที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าเรียกว่าขดลวดปฐมภูมิ ส่วนอีกขดลวดหนึ่งต่อเข้ากับภาระไฟฟ้าเรียกว่าขดลวดทุติยภูมิ

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าไปทางขดลวดปฐมภูมิที่ความถี่และ ระดับแรงดันที่กำหนดจะได้แรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ขดลวดทุติยภูมิที่ความถี่เดียวกัน โดยระดับแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ในทางอุดมคติจะไม่พิจารณาความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ดังนั้นระดับแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิต่างกันกรณีที่ระดับแรงดันไฟฟ้าด้าน ปฐมภูมิสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าด้าน ทุติยภูมิเรียกว่า หม้อแปลงลดระดับแรงดัน (step-down transformer) ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิต่ำกว่าระดับแรงดันไฟฟ้า ด้านทุติยภูมิเรียกว่า หม้อแปลงเพิ่มระดับแรงดัน (step-up transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยทั่วไปจะเป็นแบบลดระดับแรงดัน โดยมีระดับแรงดันด้านปฐมภูมิประมาณ 220 -230 V พิกัด กำลังไฟฟ้าไม่เกิน 200 VA การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยทั่วไปนั้นจะแบ่งออกเป็นขั้นตอนดังนี้

1. ประมาณขนาดพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็กและกำหนดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ออกแบบ

2. กำหนดจำนวนรอบของขดลวดจากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเลือกขนาดของแกนเหล็กที่จะนำมาเรียงซ้อนกันเป็นวงจรมแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

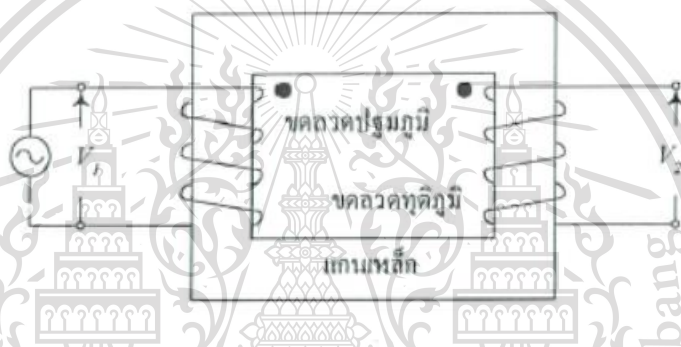
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อทราบโครงสร้างแกนเหล็กและขดลวดแล้วจะคำนวณหาคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าในด้านต่างๆ เช่น น้ำหนัก ,ราคาและค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งหากไม่เป็นที่พอใจก็สามารถที่จะปรับปรุงแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็กหรือค่าความหนาแน่น ของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและความชำนาญของผู้ออกแบบเพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามต้องการ

3.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก[2]

หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้งานกันอยู่โดยทั่วไปมีขดลวดสองชุดพันรอบแกนเหล็กที่ทำด้วยสาร ferromagnetic เป็นแผ่นเหล็กบาง (laminated core) นำมาวางเรียงซ้อนกันส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยแกนเหล็กจะทำหน้าที่เป็นวงจรมแม่เหล็กมีพลังงานสนามแม่เหล็กสะสมอยู่ ขดลวดเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

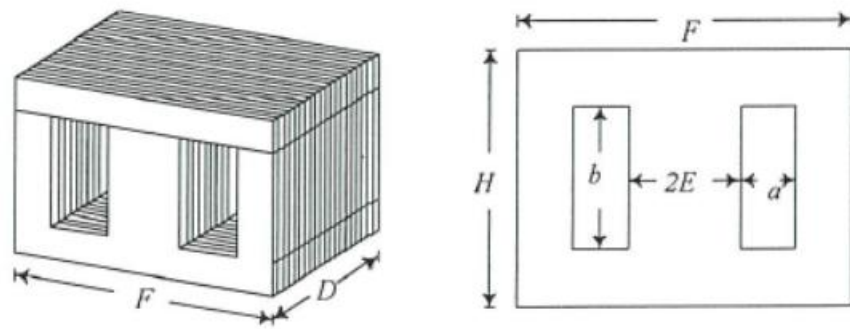
3.2.1 โครงสร้างวงจรมแม่เหล็ก

โครงสร้างวงจรมแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยทั่วไปนิยมใช้โครงสร้างเป็นแบบเซลล์แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นการประกอบกันของแผ่นเหล็กรูป E และ I ขนาดขากลางของแกนเหล็กจะเป็นสองเท่าของขาข้าง เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหลักที่เกิดขึ้นบริเวณขากลางจะ แบ่งกระจายออกด้านข้างด้านละเท่า ๆ กัน ส่วนขนาดของช่องพันขดลวดนั้นจะมีขนาดสัดส่วนขึ้น กับเป้าหมายของการออกแบบและลักษณะการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่การออกแบบแกนเหล็กแบบไม่มีการสูญเสียเศษวัสดุจากการตัดจะกำหนดให้ขนาดความกว้างของช่องพันขดลวด (a) เป็นครึ่งหนึ่งของขนาดขากลาง (2E) และความสูง (b) จะมีขนาดเป็นสามเท่าของความกว้าง (a) ซึ่งลักษณะสัดส่วนของแกนเหล็กที่ได้จากการออกแบบนี้จะเรียกว่าแกนแบบประหยัด ขนาดความกว้าง (F) และความสูง (H) ของแกนเหล็กจะมีสัดส่วนกันเป็น 5:6

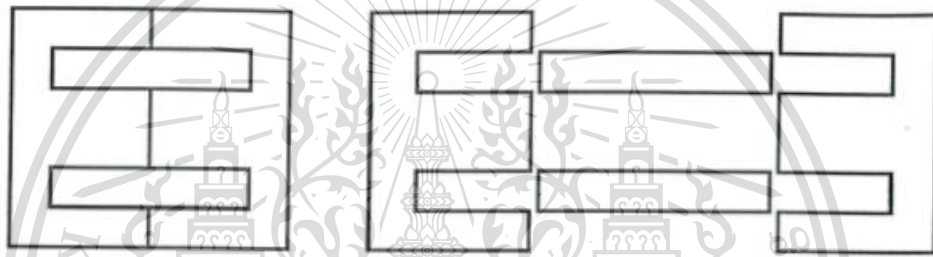
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.2 โครงสร้างวงจรมแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก



รูปที่ 3.3 การตัดแกนเหล็กรูป E และ I อย่างประหยัด

แกนเหล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรมแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำได้ด้วยสาร ferromagnetic ซึ่งมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ดีคือ มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง เพื่อลดค่าความสูญเสียทางแม่เหล็กเนื่องจากวงฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) และเพื่อลดการรั่วของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกระจายอยู่ในส่วนที่เป็นแกนเหล็กเท่านั้น โครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กแผ่นเหล็กที่ประกอบเป็นวงจรมแม่เหล็กจะเป็นแผ่นบาง ๆ มีความหนา 0.35-0.5 มม. วางเรียงอัดซ้อนกันเพื่อเป็นการลดค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (eddy current loss) ซึ่งค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กทั้งสองค่าเรียกรวมกันว่าค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

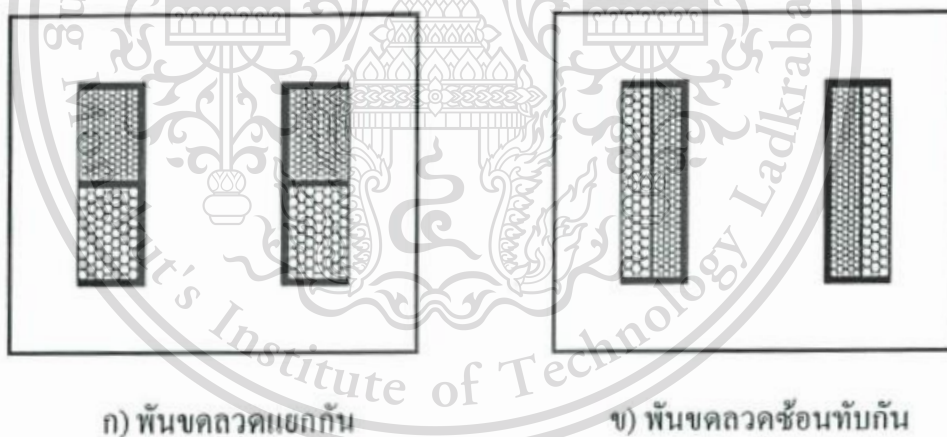
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.2 โครงสร้างขดลวดตัวนำ

ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กมีโครงสร้างเป็นกลุ่มลวดตัวนำพื้นที่หน้าตัดกลมทำด้วยทองแดงหรืออลูมิเนียมจำนวนสองชุดหรือมากกว่าพันอยู่รอบวงจรแม่เหล็กเดียวกันแต่ไม่มีการต่อกันทางไฟฟ้าการเลือกใช้ขนาดของตัวนำขึ้นกับพิกัดกำลังไฟฟ้า แรงดันใช้งานของหม้อแปลง ไฟฟ้า รวมถึงความหนาแน่นกระแส (current density) และวิธีการระบายความร้อน การออกแบบจะคำนวณขนาดของตัวนำที่ต้องการแล้วนำไปเลือกขนาดตัวนำมาตรฐานจากตารางข้อมูลลวดตัวนำซึ่งมาตรฐานที่มีการใช้งานในปัจจุบันได้แก่ AWG (American Wire Gauge), SWG (Standard Wire Gauge) ข้อมูลที่ได้จากตารางข้อมูลลวดตัวนำ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ, mm (รวมฉนวนและไม่รวมฉนวน) พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ, g/m และความต้านทานของตัวนำ, kg/ohm (หรือ ohm/ ความยาว)

ลักษณะการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยทั่วไปมี 2 ลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.3 การพันของขดลวดในรูป 3.3 ก เป็นการพันขดลวดปฐมภูมิแยกกระสวยกับขดลวดทุติยภูมิส่วนการพันขดลวดรูป 3.3 ข เป็นการพันขดลวดปฐมภูมิซ้อนทับกันกับขดลวดทุติยภูมิบนกระสวยเดียวกันการพันขดลวดทั้งสองลักษณะมีข้อได้เปรียบแตกต่างกัน ซึ่งสิ่งที่จะต้องพิจารณาในการเลือกใช้ได้แก่เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล วิธีการฉนวนระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ การระบายความร้อน และการสร้างกระสวยพันขดลวดรวมถึงวิธีการคำนวณความยาวลวดตัวนำ



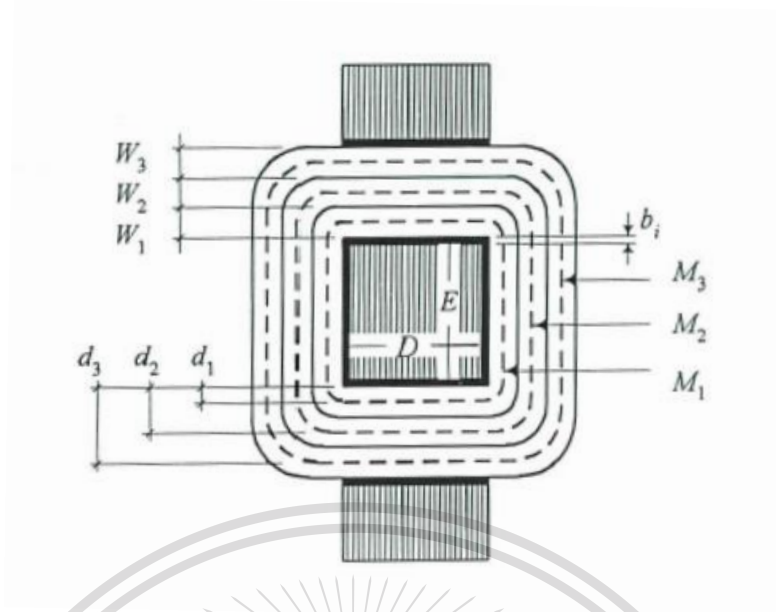
รูปที่ 3.4 ลักษณะการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

3.2.3 การคำนวณความยาวขดลวด

จากรูปที่ 3.5 เป็นภาพตัดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งกำหนดให้มีขดลวด 3 ชุดเป็นขดลวดปฐมภูมิ 1 ชุดและขดลวดทุติยภูมิ 2 ชุดคือ W1 , W2 และ W3 ตามลำดับ โดย M1, M2และM3 เป็นระยะความยาวเฉลี่ยของขดลวดแต่ละชุด ซึ่งความยาวรวมของขดลวดแต่ละชุดสามารถ คำนวณได้จาก ความยาวเฉลี่ยของขดลวดชุดนั้นคูณกับจำนวนรอบของขดลวดชุดที่พิจารณาโดยความยาวเฉลี่ยของขดลวดแต่ละชุดนั้นสามารถกำหนดได้จากโครงสร้างของแกนเหล็ก $f(E, D)$ และความหนาของกระสวยพันขดลวด (bi)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

พิจารณาขดลวดชุดที่ 1 ความยาวเฉลี่ยของขดลวดชุดนี้คือผลรวมของความยาวรอบกระสวย (bi) กับเส้นรอบวงของวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะจากขอบกระสวยพื้นขดลวดถึงกึ่งกลางความหนาของขดลวดชุดนี้คือ $W_1/2$ ดังนั้นความยาวเฉลี่ยของขดลวดปฐมภูมิสามารถแสดงได้ดัง สมการที่ 3.1

$$M_1 = 2(E + D + 4b_i) + 2\pi \frac{W_1}{2} \quad (3.1)$$

ส่วนความยาวเฉลี่ยของขดลวดทุติยภูมิชุดที่ 1 สามารถคำนวณได้ทำนองเดียวกันกับขดลวดปฐมภูมิคือเป็นผลรวมของความยาวรอบกระสวยกับเส้นรอบวงของวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะจากขอบกระสวยพื้นขดลวดถึงกึ่งกลางความหนาของขดลวดชุดนี้สำหรับขดลวดทุติยภูมิชุดที่ 2 หรือมากกว่าสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขดลวดหลายชุดก็สามารถคำนวณได้ใน ทำนองเดียวกัน

$$M_2 = 2(E + D + 4b_i) + 2\pi(W_1 + \frac{W_2}{2}) \quad (3.2)$$

$$M_3 = 2(E + D + 4b_i) + 2\pi(W_1 + W_2 + \frac{W_3}{2}) \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากสมการที่ 3.1-3.3 จะเห็นได้ว่าความยาวเฉลี่ยของขดลวดแต่ละขดนั้นขึ้นอยู่กับระยะความยาวรอบกระสวยพันขดลวดและระยะจากขอบกระสวยพันขดลวดถึงกึ่งกลางความหนาของขดลวดชุดที่พิจารณาดังนั้นสามารถเขียนสมการทั่วไปของการหาระยะความยาวเฉลี่ยของ ขดลวดได้ดังนี้

$$M_i = b_i + 2\pi d_i \quad (3.4)$$

กำหนดให้ N เป็นจำนวนรอบของขดลวดจะได้ความยาวของขดลวดดังนี้

$$l_i = M_i \times N_i \quad (3.5)$$

3.2.4 ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด

การหาความยาวของขดลวดในหัวข้อที่ผ่านมาจะทำให้สามารถคำนวณหาความต้านทานของขดลวดได้โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากตารางข้อมูลลวดตัวนำซึ่งมีความสัมพันธ์ของความต้านทานต่อระยะความยาวหรือความต้านทานต่อน้ำหนักอย่างไรก็ตามความสัมพันธ์นี้จะเป็นค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสแต่ขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายภาระอุณหภูมิภายในขดลวดจะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ความต้านทานภายในขดลวดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยดังสมการที่ 3.6

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{234.5+t_2}{234.5+t_1} \quad (3.6)$$

เมื่อค่า R_1 และ R_2 เป็นค่าความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ t_1 และ t_2 ตามลำดับ

สมการที่ 3.6 นี้เป็นความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของลวดตัวนำทองแดงซึ่งจากการที่ค่าของความต้านทานจะเพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายภาระดังนั้นการออกแบบจะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิขณะใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย

3.3 การเลือกใช้ขดลวดตัวนำ

โดยส่วนใหญ่การเลือกขดลวดตัวนำในการใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่างเช่น การออกแบบ, ความชำนาญผู้ออกแบบ, ราคาต้นทุน, การระบายความร้อน, คุณสมบัติในทางไฟฟ้า และอื่นๆ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะเสนอเทคนิคการเลือกขดลวดตัวนำโดยใช้ค่า current density (J) หรือความหนาแน่นกระแสเป็นตัวออกแบบโดยจากประสบการณ์ของผู้ออกแบบจะมีการใช้งานค่า ความหนาแน่นกระแสอยู่ที่ประมาณ 2-5 A/mm² ซึ่งความแตกต่างของค่าความหนาแน่นกระแสจะมีความหมายว่าถ้าค่าความหนาแน่นกระแสมากขดลวดจะมีขนาดเล็กและถ้าค่าความหนาแน่นกระแสน้อยขดลวดจะมีขนาดใหญ่ซึ่งการเลือกใช้งานนั้นตามจุดประสงค์ของผู้ออกแบบซึ่งในที่นี้ขดลวดขนาดเท่ากันแต่มาตรฐานต่างกันก็อาจให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันด้วยโดยเรานำค่ากระแสที่เราต้องการนำมาออกแบบหารด้วยค่าความหนาแน่นกระแสก็จะทำให้เราได้ขนาดพื้นที่หน้าตัดขดลวดหน่วยเป็นตารางเมตรและทำการเลือกขนาดของขดลวดในขั้นตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หมายเหตุ - ในการเลือกขดลวดแต่ละครั้งไม่จำเป็นต้องใช้ค่าความหนาแน่นกระแสค่าเดิมแม้จะเป็นหม้อแปลงตัวเดียวกัน

3.4 สมการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเบื้องต้น

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้นจะพิจารณาจากพิกัดกำลังไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าความถี่ความหนาแน่นกระแสและคุณลักษณะของแกนเหล็กที่ใช้งานการออกแบบวิธีต่างๆที่ใช้งานโดยส่วนใหญ่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กส่วนใหญ่จะมีการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 1-1.5 Wb/m² มีสมการดังต่อไปนี้

$$V = \sqrt{2\pi fNBAc} \quad (3.7)$$

เมื่อ V เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดด้านที่พิจารณา, V
 f เป็นความถี่ของระบบไฟฟ้า, Hz
 N เป็นจำนวนรอบของขดลวดที่พิจารณา
 B เป็นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, Wb/m²
 Ac เป็นพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก, m²

3.4.1 ออกแบบโดยใช้สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

โครงสร้างหลักของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กจะประกอบไปด้วยโครงสร้างของแกนเหล็กและโครงสร้างของขดลวดตัวนำจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นสมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเมื่อจัดสมการใหม่ตั้งสมการที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าเทอมด้านซ้ายเป็นอัตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อจำนวนรอบเป็นเทอมที่แสดงถึงโครงสร้างของขดลวดตัวนำส่วนเทอมด้านขวาเป็นเทอมที่แสดงถึงโครงสร้างแกนเหล็ก

$$\frac{V}{N} = \sqrt{2\pi fBAc} \quad (3.8)$$

จากโครงสร้างของแกนเหล็กที่เป็นการเรียงอัดซ้อนกันของแผ่นเหล็กซิลิคอน โดยทั่วไปจะมีช่องว่างระหว่างแผ่นอยู่เล็กน้อยดังนั้นปริมาตรและรูปร่างภายนอกกับปริมาตรของเนื้อแกนเหล็กจริงจึงไม่เท่ากันดังนั้นจึงกำหนดค่า s.f. (stacking factor) เป็นอัตราส่วนปริมาตรเหล็กจริงต่อปริมาตรภายนอกเมื่อซ้อนกันค่าอัตราส่วน s.f. นี้จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอโดยทั่วไปค่าอัตราส่วน s.f. ของแกนเหล็กแต่ละชนิดจะต่างกันออกไปตามวิธีการผลิตการฉาบหน้าและการอัดแกนดังนั้นจากสมการที่ 3.8 จะเปลี่ยนเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม กรุณาอย่าแก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\frac{v}{N} = \sqrt{2}\pi f B A_C s. f. \quad (3.9)$$

จากสมการที่ 3.9 เมื่อกำหนดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อจำนวนรอบและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการทำให้ทราบพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็กการพิจารณาเลือกใช้แกนเหล็กจากขนาดของแกนเหล็กมาตรฐานเพื่อประกอบเป็นวงจรมแม่เหล็กจำเป็นต้องพิจารณาพื้นที่ช่องว่างพื้นที่ขดลวดด้วยโดยจะต้องมีพื้นที่เพียงพอสำหรับการวางกลุ่มขดลวด 2 ชุดซึ่งพื้นที่ที่ต้องการในการพันขดลวดพิจารณาได้จากจำนวนรอบของตัวนำความหนาแน่นกระแสของขดลวดตัวนำ

จากวิธีดังกล่าวการออกแบบข้างต้นเห็นได้ว่าสมการที่ใช้ในการออกแบบจะเป็นการพิจารณาออกแบบโครงสร้างของแกนเหล็กก่อนแล้วจึงนำมาตรวจสอบว่าสามารถที่จะพันขดลวดได้หรือไม่ซึ่งวิธีพิจารณาโครงสร้างของแกนเหล็กอาจใช้วิธีแบบง่ายดังสมการ 3.10 เพื่อประมาณโครงสร้างของแกนเหล็ก

$$A_C = \frac{\sqrt{VA}}{5.58} \quad (3.10)$$

เมื่อ A_C เป็นพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก , ตร.นิ้ว
 VA เป็นพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า, VA

3.4.2 การพิจารณาพื้นที่ช่องว่างในหม้อแปลงต่อการพันหม้อแปลง

เนื่องจากการพันหม้อแปลงนั้นเรื่องสำคัญที่ต้องคำนึงถึงด้วยคือพื้นที่ช่องว่างในหม้อแปลงหรือ Window area ซึ่งจะต้องมีพื้นที่มากกว่าหรือเท่ากับพื้นที่ของวัสดุที่ใช้ในการพันหม้อแปลงอาทิ ขดลวด primary, ขดลวด secondary , พื้นที่ขอบ bobbin , พื้นที่ฉนวน , พื้นที่ช่องว่างอากาศ (air gap) และ อื่นๆจึงกำหนดค่ามาตรฐานที่ใช้ในการประมาณ พื้นที่ขอบ bobbin พื้นที่ฉนวน พื้นที่ช่องว่างอากาศ(air gap) และ อื่นๆเป็นค่า window utilization factor (k_w) อยู่ที่ประมาณ 0.3-0.5 ของพื้นที่ window area ขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ออกแบบหม้อแปลงโดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังความสัมพันธ์ 3.11

$$w_a \geq a_{wp} N_p + a_{ws} N_s + k_w w_a \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อ w_a เป็นพื้นที่หน้าตัดของช่องว่างในแกนเหล็ก, ตร.นิ้ว

a_{wp} เป็นพื้นที่หน้าตัดของขดลวด Primary, ตร. นิ้ว

N_p เป็นจำนวนรอบของขดลวด Primary

a_{ws} เป็นพื้นที่หน้าตัดของขดลวดsecondary,ตร.นิ้ว

N_s เป็นจำนวนรอบของขดลวดsecondary

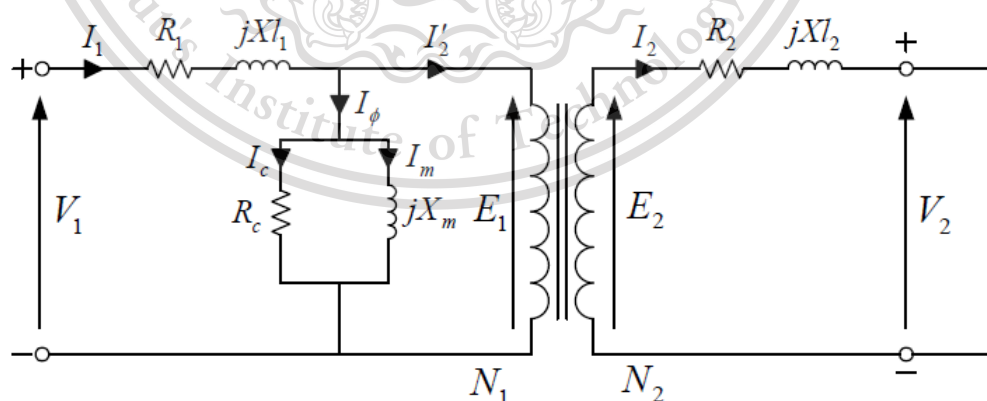
k_w เป็นค่า window utilization factor

หมายเหตุ - การเลือกชนิดของแกนเหล็ก E-I จะมีผลต่อการพิจารณาพื้นที่หน้าตัดช่องว่างในแกนเหล็ก

3.5 รายละเอียดหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบ

ในงานวิจัยนี้หม้อแปลงเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษากระแสอินรัช (Inrush current) จึงมีการออกแบบเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการโดยมีอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นผู้ให้คำแนะนำ

หม้อแปลงที่ใช้มีจุดประสงค์เพื่อวัดค่ากระแสที่ไหลเข้าสู่ขดลวดทั้ง Primary และ Secondary รวมไปถึงแรงดันที่ Input และ Output การออกแบบหม้อแปลงจึงพิจารณาขดลวด Primary และ Secondary ที่จำนวนรอบเท่ากันและเพิ่มพื้นที่ Window Area เพื่อให้หม้อแปลงมีขนาดแรงดัน Input และ Output เท่ากันและทราบค่า Window Utilization Factor ของผู้ออกแบบหม้อแปลง โดยลักษณะการพันขดลวดนั้นคือการพันคู่คู่พร้อมกันไปจนสิ้นสุด



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลหม้อแปลง 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากวงจรสมมูลจะเห็นว่าเมื่อต่อเครื่องมือวัดไว้ที่ V1 และ V2 ค่าที่เราสามารถวัดได้จากอุปกรณ์คือแรงดัน V1 และ V2 แต่เราไม่ทราบค่าแรงดัน E1 และ E2 จากการวัดโดยตรงแนวทางการหาค่าทั้งสองคือการทดสอบแบบ Open Circuit Test กับหม้อแปลงที่มีจำนวนรอบของขดลวด N1=N2 เท่ากันเนื่องจากเมื่อทำการทดสอบ Open Circuit Test แรงดัน V2=E2 ซึ่งเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขดลวด N1 และ N2 เท่ากันจะทำให้แรงดัน E2=E1 ดังอธิบายในสมการที่ 3.12

$$v_2 = E_2 = E_1 \quad (3.12)$$

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลอุปกรณ์และหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาด 1164 VA, 220/220 V, 50Hz, $J \approx 2.7 \text{ A/mm}^2$, $B_{\max} = 1.7 \text{ T}$

ขนาดหม้อแปลง	1164 VA
พิกัดกระแส(A)	2.7
พิกัดแรงดัน(V)	431
พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก(mm ²)	2580
พื้นที่หน้าตัดขดลวด(mm ²)	0.83
เส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด(mm)	1.061
เส้นผ่านศูนย์กลางรวมฉนวน(mm)	1.08
น้ำหนักต่อความยาว(g/m)	0.14
Window Utilization Factor	0.6
พื้นที่ช่องว่างแกนเหล็ก(mm ²)	1935
จำนวนรอบปฐมภูมิ(รอบ)	485
จำนวนรอบทุติยภูมิ(รอบ)	485
ชนิดขดลวดปฐมภูมิ	SWG 19
ชนิดขดลวดทุติยภูมิ	SWG 19
พิกัดกระแสขดลวดปฐมภูมิ(A)	2.701
พิกัดกระแสขดลวดทุติยภูมิ(A)	2.701
น้ำหนักแกนเหล็ก(Kg)	6.04
น้ำหนักขดลวด(Kg)	1.33
น้ำหนักรวม(Kg)	7.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม กรุณาแจ้งให้ชัดเจนก่อน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

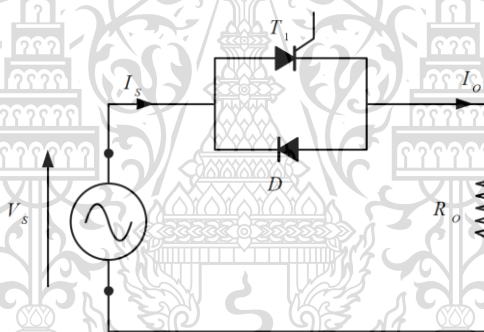
การออกแบบวงจรคอนโทรลมุมแรงดัน

4.1 เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (ac voltage controller) คือ วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตกคร่อมโหลดโดยที่ความถี่ยังคงที่เท่ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ใช้ในงานการควบคุมแสงสว่าง การควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมการเปลี่ยนแท่งหม้อแปลงไฟฟ้า การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับงานพัดลม เป็นต้น สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในวงจร คือ เอ็สซีอาร์หรือไทรแอก มีการควบคุมดังต่อไปนี้

4.1.1 การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวครึ่งคลื่น

วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวครึ่งคลื่น (Single – phase half – wave ac voltage controller) คือ วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตกคร่อมโหลดโดยที่ความถี่ยังคงที่เท่ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการควบคุมเฟส (phase control) มีวงจรได้แสดงในรูปต่อไปนี้



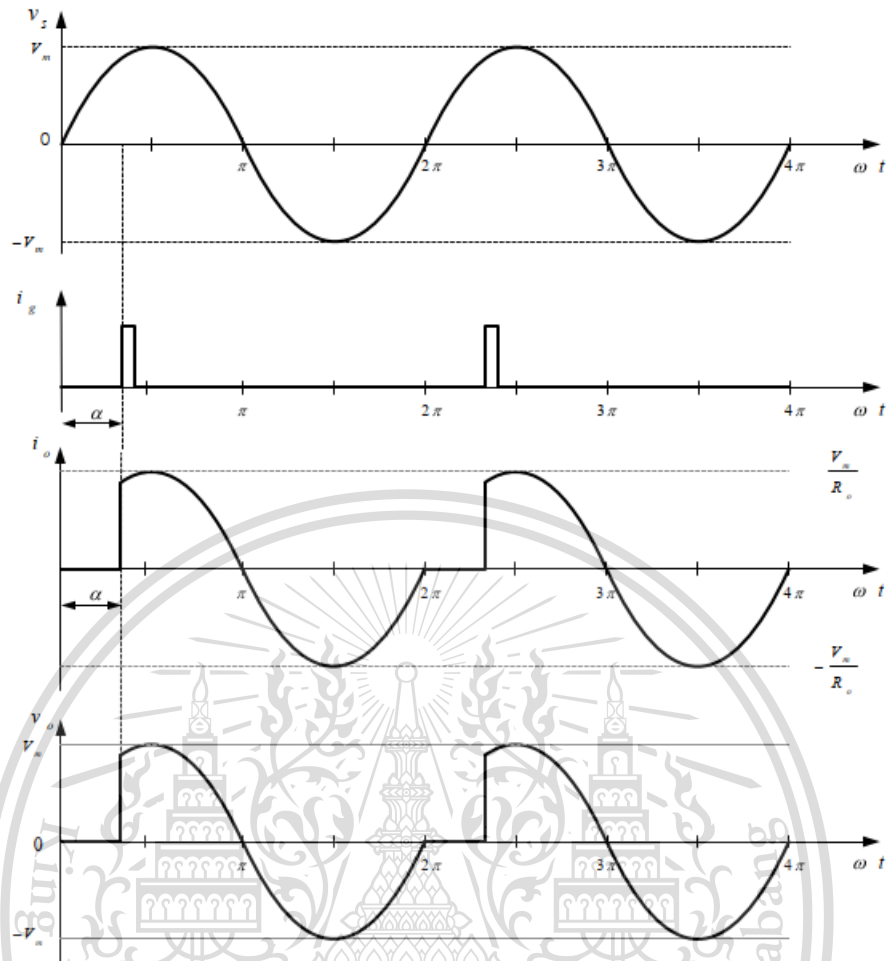
รูปที่ 4.1 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวครึ่งคลื่น

เมื่อพิจารณาจากวงจรในรูปที่ 4.1 การปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตทำได้โดยการปรับมุมเฟสของสัญญาณกระตุ้นที่เรียกว่ามุมกระตุ้น α ดังนั้นจากวงจรเอ็สซีอาร์ T จะทำงานควบคุมแรงดันไฟฟ้าในช่วงครึ่งไซเคิลบวกของรูปคลื่นไซน์เมื่อได้รับสัญญาณกระตุ้นที่มุมกระตุ้น α ส่วนไดโอด D จะนำกระแสไฟฟ้าในช่วงครึ่งไซเคิลลบตลอดช่วงครึ่งไซเคิลดังแสดงรูปคลื่นในรูปที่ 4.2 ดังนั้นวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวครึ่งคลื่นจะควบคุมได้เฉพาะครึ่งไซเคิลบวกเท่านั้นทำให้รูปคลื่นไม่สมมาตรกับระหว่างครึ่งไซเคิลบวกกับครึ่งไซเคิลลบจึงมีผลทำให้เกิดองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวครึ่งไซเคิลจึงไม่นิยมนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.2 คลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวครึ่งคลื่น เมื่อได้รับการกระตุ้นที่มุม α

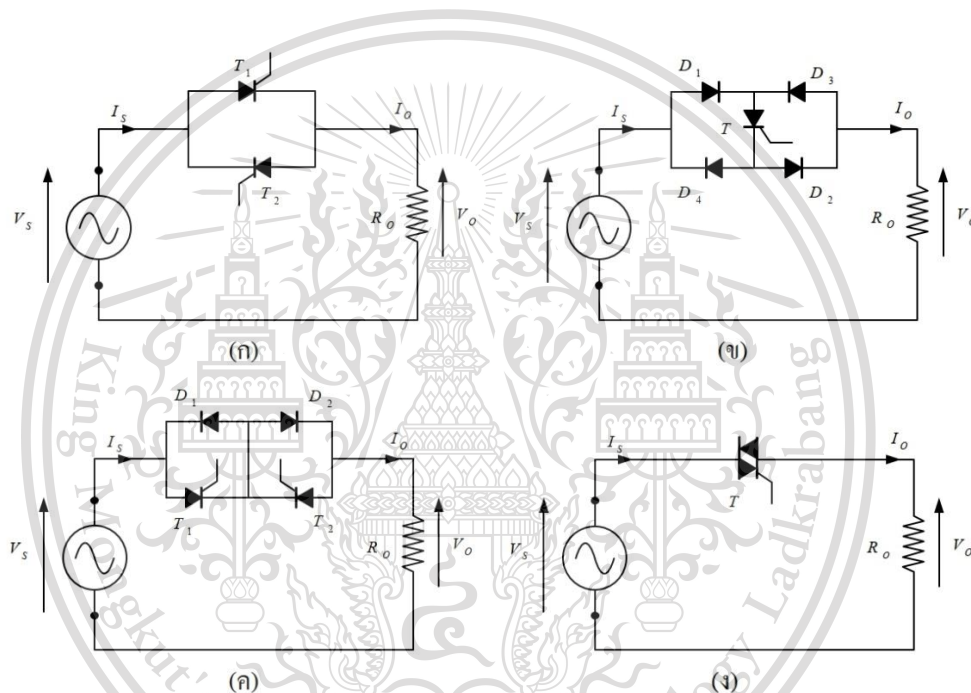
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวเต็มคลื่น

วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเต็มคลื่น (Single – phase full – wave ac voltage controller) คือ วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตกคร่อมโหลดโดยที่ความถี่ยังคงที่เท่ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการควบคุมเฟส (phase control) มีวงจรดังแสดงรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 4.3(ก) วงจรประกอบด้วยเอสซีอาร์สองตัวต่อขนานกันแบบต่อต้าน (anti-parallel) วงจรจะทำงานควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้ในช่วงครึ่งไซเคิลบวกและครึ่งไซเคิลลบของรูปคลื่นไซน์เมื่อเอสซีอาร์ T1 และ T2 ได้รับสัญญาณกระตุ้นที่มุมกระตุ้น α และ $\pi + \alpha$ ตามลำดับ ดังนั้นรูปคลื่นเอาต์พุตครึ่งไซเคิลบวกจะสมมาตรกับรูปคลื่นครึ่งไซเคิลลบทำให้ไม่เกิดองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงในวงจรจึงเหมาะที่นำไปใช้งาน



รูปที่ 4.3 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวเต็มคลื่น

เนื่องด้วยวงจรในรูปที่ 4.3(ก) สัญญาณกระตุ้นให้กับเอสซีอาร์ทั้งสองตัวจะต้องผ่านวงจรแยกสัญญาณกระตุ้นออกจากกัน ถ้าไม่ทำการแยกวงจรจะทำให้แคโทดของเอสซีอาร์ทั้งสองตัวต่อถึงกันเกิดการลัดข้ามเอสซีอาร์แต่สำหรับวงจรรูปที่ 4.3(ข) ใช้เอสซีอาร์เพียงหนึ่งตัวและวงจรรูปที่ 4.3(ค) เอสซีอาร์ทั้งสองตัวต่อแคโทดรวมกันดังนั้นทั้งสองวงจรจึงไม่จำเป็นต้องใช้วงจรแยกสัญญาณกระตุ้น แต่ทั้งสองวงจรจะมีข้อเสียในด้านที่มีการสูญเสียในสภาวะนำกระแสไฟฟ้าสูงกว่าวงจรรูปที่ 4.3(ก) เนื่องจากในขณะที่นำกระแสไฟฟ้ากระแสไฟจะต้องไหลผ่านไดโอดและเอสซีอาร์มากกว่าหนึ่งตัว สำหรับวงจรรูปที่ 4.3(ง) ใช้ไดรแอ็คเหมาะสำหรับนำไปใช้งานควบคุมกำลังไฟฟ้าต่ำๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

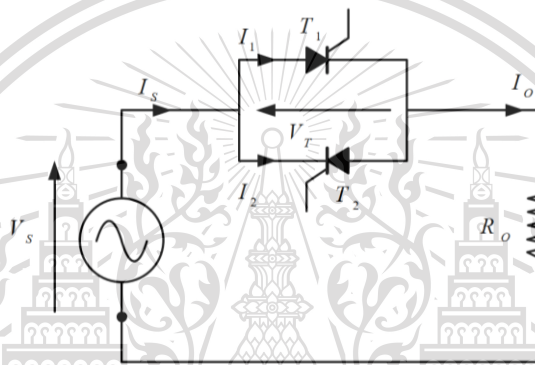
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

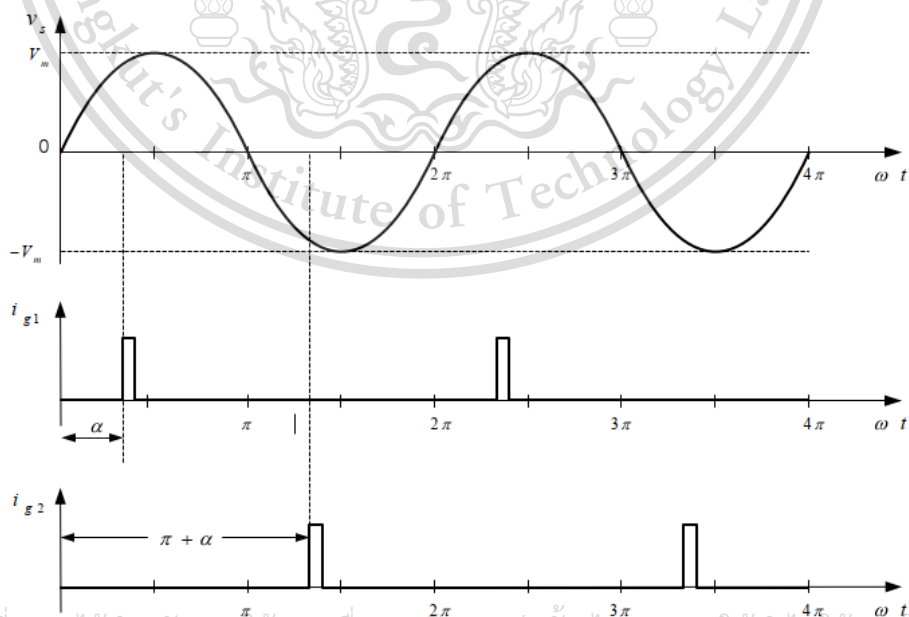
4.2 SCR

4.2.1 การทำงานวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว

วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันอาร์เอ็มเอสที่ตกร่วมโหลดแต่ค่าความถี่ยังคงที่เท่ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการควบคุมเฟส เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 4.4 การไหลของกระแสไฟฟ้าหนึ่งไซเคิลไธสซีอาร์ T1 และ T2 จะสลับกันทำงานโดยที่ไธสซีอาร์ T1 จะทำงานในช่วงครึ่งไซเคิลบวกและไธสซีอาร์ T2 จะทำงานในครึ่งไซเคิลลบ ไธสซีอาร์ทั้งสองตัวนำกระแสจากการกระตุ้นด้วยกระแสเกตโดยมีรูปคลื่นกระแสพัลส์ที่ใช้กระตุ้นมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งไธสซีอาร์ T1 จะนำกระแสเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยกระแสเกตที่มุมกระตุ้น (trigger angle) เท่ากับ α และไธสซีอาร์ T2 จะนำกระแสเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยกระแสเกตที่มุมกระตุ้นเท่ากับ $\pi + \alpha$



รูปที่ 4.4 วงจรเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว



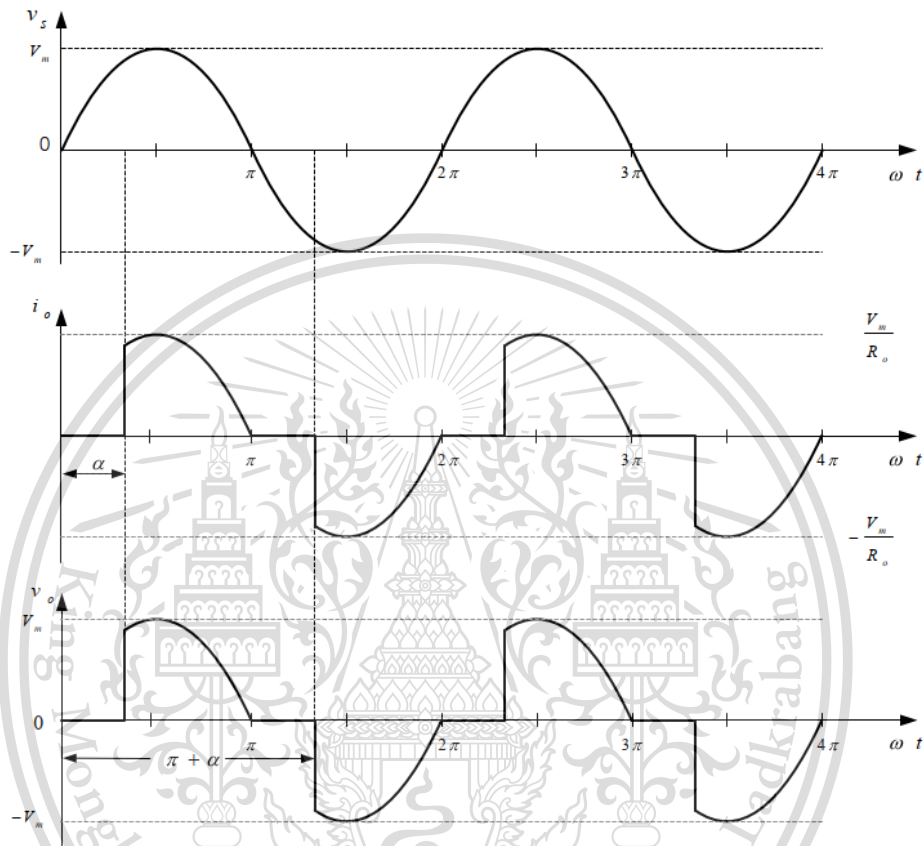
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น **รูปที่ 4.5** สัญญาณกระตุ้นของเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.2 การทำงานกรณีโหนดตัวต้านทาน

เมื่อเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับต่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหนดตัวต้านทานดังแสดงในรูปที่ 4.4 เอสซีอาร์จะได้รับการกระตุ้นด้วยกระแสเกจที่มีมุมกระตุ้นมีค่าเท่ากับ α ทำให้ได้รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหนดและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหนดดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 คลื่นกระแสไฟฟ้าที่ผ่านโหนดและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหนดตัวต้านทาน

ในช่วงครึ่งไซเกิลบวกของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเอสซีอาร์ T1 จะได้แรงดันไบเอสไปหน้าเมื่อได้รับการกระตุ้นที่มุม α เอสซีอาร์ T1จะมีมุมนำกระแสไฟฟ้าอยู่ระหว่างมุม α ถึงมุม π และในช่วงครึ่งไซเกิลลบของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเอสซีอาร์ T2 จะได้แรงดันไบเอสไปหน้าเมื่อได้รับการกระตุ้นที่มุม $\pi+\alpha$ เอสซีอาร์ T2 จะมีมุมนำกระแสไฟฟ้าอยู่ระหว่างมุม $\pi+\alpha$ ถึงมุม 2π รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตในครึ่งไซเกิลบวกและครึ่งไซเกิลลบที่ได้จะสมมาตรกัน จึงมีผลทำให้องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีค่าดังต่อไปนี้

$$V_s = \sqrt{2} V_s \sin \omega t \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อพิจารณารูปคลื่นในรูปที่ 4.6 สมการแรงดันเอาต์พุตชั่วขณะจะมีค่าเท่ากับ

$$V_o = \begin{cases} \sqrt{2}V_s \sin \omega t & \text{เมื่อ } \alpha \leq \omega t \leq \pi ; \pi + \alpha \leq \omega t \leq \pi \\ 0 & \text{เมื่อ } 0 \leq \omega t \leq \alpha ; \pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha \end{cases} \quad (4.2)$$

ปริมาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

เมื่อพิจารณารูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่โหลดสามารถคำนวณหาแรงดันเอาต์พุตอาร์เอ็มเอสได้ดังต่อไปนี้

$$V_o = \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (\sqrt{2}V_s \sin \omega t)^2 d \omega t \right]^{\frac{1}{2}} = V_s \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ 4.3 ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอาร์เอ็มเอสสามารถปรับได้ระหว่างศูนย์ถึง V_s ด้วยการปรับค่ามุมกระตุ้น α สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าเอาต์พุตอาร์เอ็มเอสคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

$$I_o = \frac{V_s}{R_o} \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า (I_s) มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด (I_o) ดังนั้นสามารถคำนวณหาตัวประกอบกำลังในกรณีโหลดตัวต้านทานได้ดังต่อไปนี้

$$p.f. = \frac{P_o}{V_s I_s} = \frac{I_o^2 R_o}{V_s I_o} = \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

หมายเหตุ มุมที่ใช้คำนวณในสมการที่ 4.3 สมการที่ 4.4 และสมการที่ 4.5 เป็นมุมเรเดียน

ปริมาณฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

เมื่อพิจารณารูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่โหลดจะไม่ใช่อุปกรณ์ไซน์ ดังนั้นถ้านำเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไปควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีเฉพาะองค์ประกอบความถี่หลักมูลเท่านั้นที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแรงบิดแต่ในส่วนขององค์ประกอบฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดการสูญเสียเป็นความร้อนในตัวมอเตอร์ จากรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสามารถนำมาเขียนกระจายเป็นอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) ได้ดังต่อไปนี้

$$V_o(\omega t) = V_{o,av} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (4.6)$$

เนื่องจากรูปคลื่นครึ่งไซเคิลบวกและครึ่งไซเคิลลบเหมือนกันทุกประการจึงมีผลทำให้ส่วนประกอบของไฟฟ้ากระแสตรงและส่วนประกอบฮาร์มอนิกมีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นสมการที่ 4.6 สามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการต่อไปนี้

$$V_o(\omega t) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (4.7)$$

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อกำหนดให้

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi V_o(\omega t) \cos n\omega t \, d\omega t \quad (4.8)$$

และ

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi V_o(\omega t) \sin n\omega t \, d\omega t \quad (4.9)$$

แทนค่าแรงดัน $v_o(\omega_1 t)$ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างมุม α ถึงมุม π ลงในสมการที่ 4.8 และสมการที่ 4.9

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi V_{o,m} \sin \omega t \cos n\omega t \, d\omega t$$

$$a_n = \frac{V_{o,m}}{\pi} \left[\frac{\cos(n+1)\alpha - 1}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha - 1}{n-1} \right] \quad (4.10)$$

และ

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi V_{o,m} \sin \omega t \sin n\omega t \, d\omega t$$

$$b_n = \frac{V_{o,m}}{\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} \right] \quad \dots\dots(4.11)$$

สมการที่ 4.10 และสมการที่ 4.11 นำมาใช้คำนวณหาค่าแรงดันชั่วขณะสูงสุดของฮาร์โมนิคลำดับที่ $n(V_{o,n,m})$ และมุมต่างเฟส ϕ_n ของแรงดันฮาร์โมนิคลำดับที่ n ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{o,n,m} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (4.12)$$

และ

$$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{a_n}{b_n} \right) \quad (4.13)$$

และค่ากระแสไฟฟ้าของฮาร์โมนิคที่ไหลผ่านโหลดสามารถคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

$$I_{o,n,m} = \frac{V_{o,n,m}}{R_o} \quad (4.14)$$

จากสมการที่ 4.10, 4.11, 4.12 และสมการที่ 4.13 สามารถคำนวณหาขนาดแรงดันไฟฟ้าหลักมูลและมุมต่างเฟสได้ดังต่อไปนี้

$$V_{l,m} = \frac{V_m}{\pi} \left[\left\{ \frac{\sin 2\alpha}{2} + (\pi - \alpha) \right\} + \left\{ \frac{\cos 2\alpha - 1}{2} \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.15)$$

และ

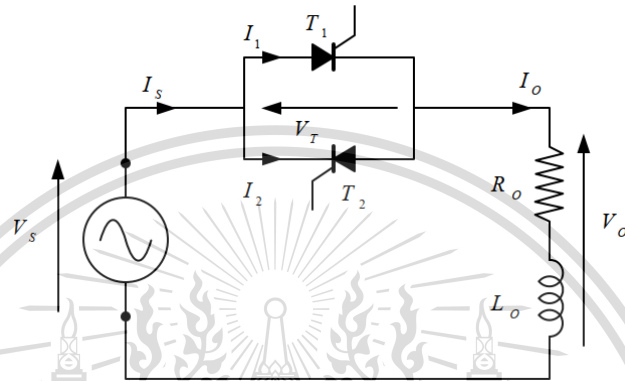
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีการ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

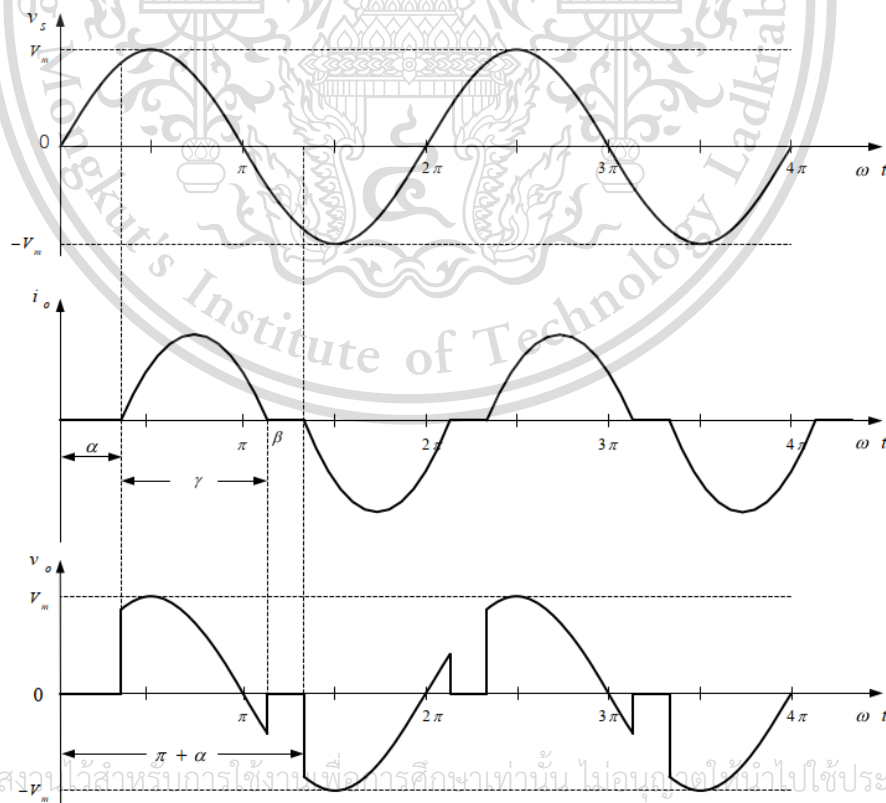
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.3 การทำงานกรณีโหนดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

เมื่อโหนดของเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นตัวต้านทานต่ออยู่กับตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ทรานซิสเตอร์ T1 และ T2 จะสลับการทำงานตัวละครึ่งไซเคิลและแต่ละตัวจะมีมุมนำกระแสไฟฟ้า (γ) ได้ไม่เกินมุม π ด้วยผลของตัวเหนี่ยวนำเอสซีอาร์ T1 จะยังไม่หยุดนำกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายตกลงเป็นศูนย์ที่มุม π แต่จะหยุดนำกระแสที่มุม β รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านโหนดและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหนดได้แสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 วงจรเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวเมื่อโหนดคือ RL



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลีททั้งหมดมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 คลื่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหนดเมื่อโหนดคือ RL

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริมาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

เมื่อเอสซีอาร์ T1 นำกระแสจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านโหลดสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$i_o = \frac{\sqrt{2}V_s}{Z} \left[\sin(\omega t - \theta) - e^{\frac{R_o}{L_o}(\frac{\alpha}{\omega} - t)} \sin(\alpha - \theta) \right] \quad \text{เมื่อ } \alpha < \omega t < \beta \quad (4.17)$$

เมื่อ

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_o}{R_o} \right) \quad \text{และ} \quad Z = \sqrt{R_o^2 + (\omega L_o)^2}$$

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเอสซีอาร์มีค่าเท่ากับศูนย์มีผลทำให้เอสซีอาร์ T1 หยุดนำกระแสไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ 4.17 มาเขียนใหม่เพื่อคำนวณหาค่ามุมหยุดนำกระแสไฟฟ้า β ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{2}V_s}{Z} \left[\sin(\omega t - \theta) - e^{\frac{R_o}{L_o}(\frac{\alpha}{\omega} - t)} \sin(\alpha - \theta) \right] &= 0 \\ \sin(\omega t - \theta) &= e^{\frac{R_o}{L_o}(\frac{\alpha}{\omega} - t)} \sin(\alpha - \theta) \end{aligned} \quad (4.18)$$

เมื่อคำนวณหาค่ามุม β ได้จากสมการที่ 4.18 ก็สามารถคำนวณหาค่ามุมนำกระแสไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้

$$\gamma = \beta - \alpha \quad (4.19)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 4.17 ถ้าปรับค่ามุมกระตุ้น α ให้มีค่าเท่ากับมุมอิมพีแดนซ์ θ จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\sin(\beta - \alpha) = 0 \quad \text{หรือ} \quad \beta - \alpha = 180^\circ$$

ดังนั้นจะคำนวณหามุมนำกระแสเมื่อมุมกระตุ้น α มีค่าเท่ากับมุมอิมพีแดนซ์ θ ได้ดังต่อไปนี้

$$\gamma = \beta - \alpha = 180^\circ$$

จากรูปคลื่นในรูปที่ 4.8 ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอาร์เอ็มเอสคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

$$V_o = \left[\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} (\sqrt{2}V_s \sin \omega t)^2 d \omega t \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{V_s}{\pi} \left[\beta - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\beta \right] \quad (4.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และจากรูปคลื่นในรูปที่ 4.8 ค่ากระแสไฟฟ้าเอาต์พุตอาร์เอ็มเอสคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

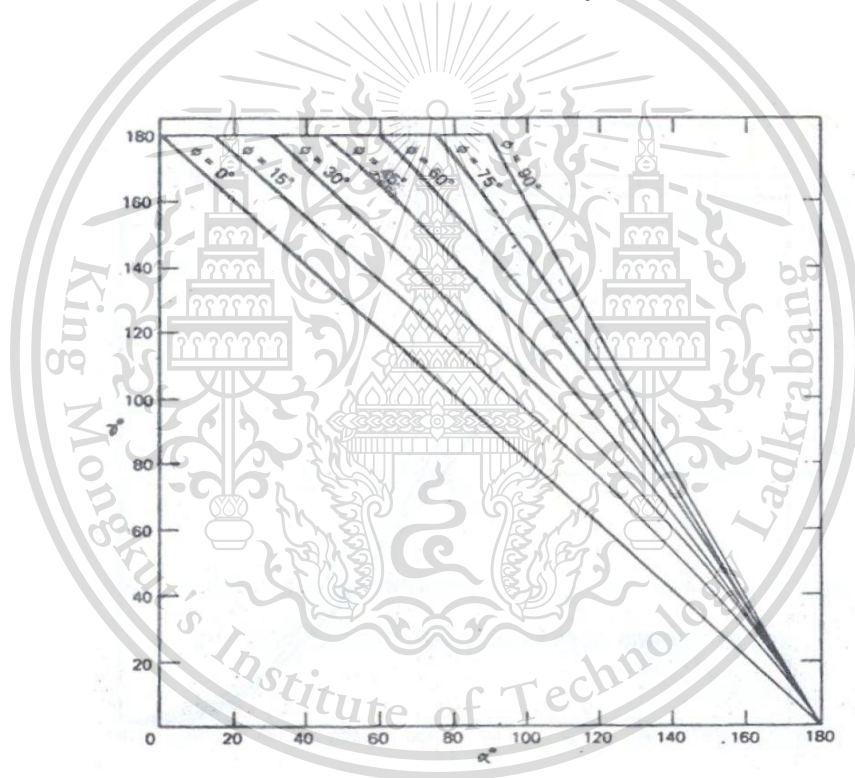
$$I_o = \left[\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} (i_o(\omega t))^2 d \omega t \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$I_o^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \left(\frac{\sqrt{2}V_s}{Z} \left[\sin(\omega t - \theta) - e^{\frac{R_o}{L_o}(\alpha - t)} \sin(\alpha - \theta) \right] \right)^2 d \omega t$$

$$I_o^2 = \int_{\alpha}^{\beta} \left(\frac{\sqrt{2}V_s}{Z} \left[\sin(\omega t - \phi) - e^{\frac{R_o}{\omega L_o}(\alpha - \omega t)} \sin(\alpha - \phi) \right] \right)^2 d \omega t$$

$$I_o^2 = \frac{2V_s^2}{Z^2} \int_{\alpha}^{\beta} \left(\sin(\omega t - \phi) - e^{\frac{R_o}{\omega L_o}(\alpha - \omega t)} \sin(\alpha - \phi) \right)^2 d \omega t \quad (4.21)$$

และจากสมการที่ 4.18 และสมการที่ 4.19 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมนำกระแสและมุมกระตุ้นมุมที่ค่ามอดิมพีแดนซ์ค่าต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมนำกระแสและมุมกระตุ้น

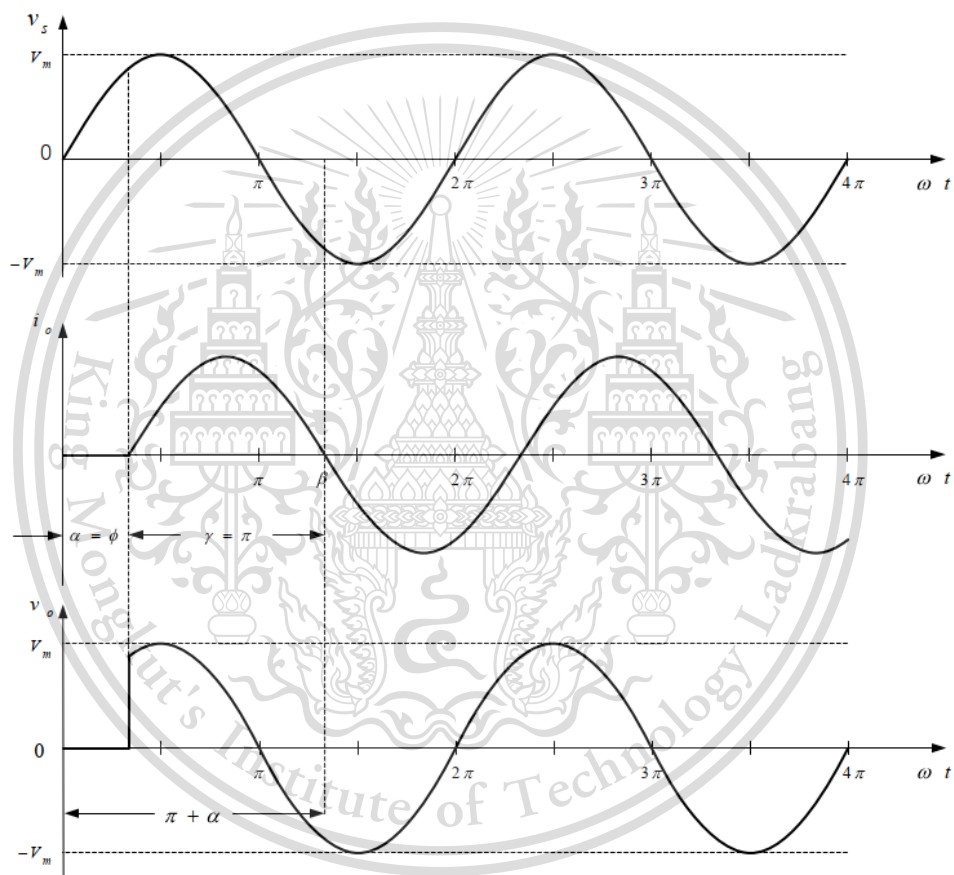
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การกระตุ้นเอสซีอาร์ในกรณีโหลด RL

เนื่องจากเอสซีอาร์ทั้งสองตัวทำงานสลับกันตัวละครึ่งไซเคิลด้วยมุมนำกระแส γ ที่มีค่าได้ไม่เกินมุม π ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปคลื่นในรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าถ้าปรับลดมุมกระตุ้น α ให้มีค่าลดลงจนกระทั่งมุมนำกระแสเท่ากับ π สร้างมุมกระตุ้น α จะมีค่าเท่ากับมุมอิมพีแดนซ์ θ ดังนั้นที่มุมกระตุ้น α เท่ากับมุมอิมพีแดนซ์วงจรจะอยู่ในสถานะเช่นเดียวกันกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่อตรงอยู่กับโหลดและจะทำให้ลูกคลื่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดมีรูปคลื่นเป็นคลื่นไซน์เช่นเดียวกับรูปคลื่นของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าดังรูปคลื่น ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 คลื่นของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดตัวต้านทานต่ออยู่กับตัวเหนี่ยวนำเมื่อมุม α เท่ากับ θ

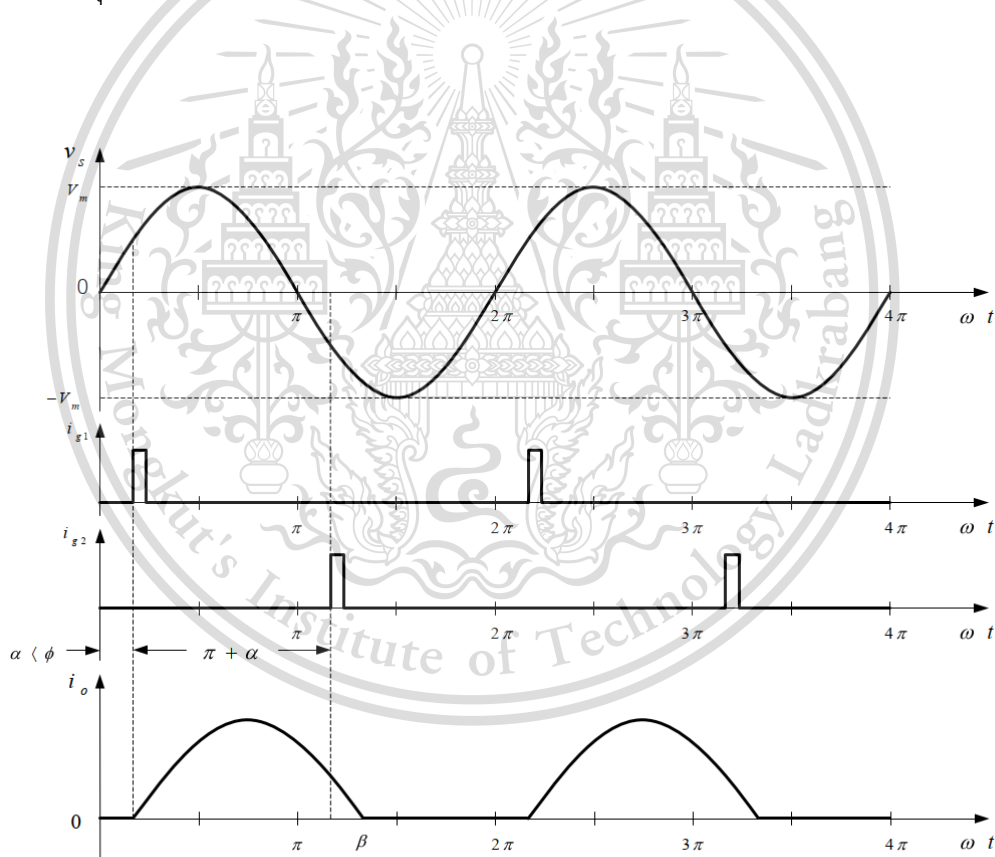
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แต่ถ้าทำการปรับลดมุมกระตุ้น α มีค่าน้อยกว่ามุมอิมพีแดนซ์ θ และสัญญาณกระตุ้นเป็นพัลส์เดี่ยวดังรูปที่ 4.5 จะมีผลทำให้มีเพียงเอสซีอาร์เพียงตัวเดียวนำกระแสไฟฟ้าเนื่องจากเอสซีอาร์อีกตัวหนึ่งที่หยุดนำกระแสได้รับไบแอสกลับในขณะที่ได้รับสัญญาณกระตุ้นจึงไม่สามารถนำกระแสไฟฟ้าส่งผลให้มอดูลประกอบไฟฟ้ากระแสตรงออกสู่โหลดดังแสดงในรูปที่ 4.11

ดังนั้นในวงจรที่มีโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต้องใช้สัญญาณกระตุ้นที่มีความกว้างตลอดช่วง α ถึง π สำหรับเอสซีอาร์ T1 และใช้สัญญาณกระตุ้นตลอดช่วง $\alpha + \pi$ ถึง 2π สำหรับเอสซีอาร์ T2 แต่การที่สัญญาณกระตุ้นมีความกว้างตลอดช่วง α ถึง π สำหรับเอสซีอาร์ T1 และตลอดช่วง $\alpha + \pi$ ถึง 2π สำหรับเอสซีอาร์ T2 จะทำให้เกิดความร้อนที่เกจและเนื่องจากวงจรต้องมีวงจรแยกเกจถ้าเลือกวงจรแยกเกจเป็นหม้อแปลงพัลส์หม้อแปลงก็จะมีขนาดใหญ่ ดังนั้นในการกระตุ้นในวงจรที่โหลดเป็นแบบอินดักทีฟโหลดจะใช้สัญญาณกระตุ้นเป็นชวอนพัลส์แคบๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแม้มุมกระตุ้น α น้อยกว่ามุมอิมพีแดนซ์ θ เมื่อเอสซีอาร์ T1 หยุดนำกระแสไฟฟ้ายังมีพัลส์สำหรับกระตุ้นเอสซีอาร์ T2 ให้นำกระแสไฟฟ้าได้ต่อไป

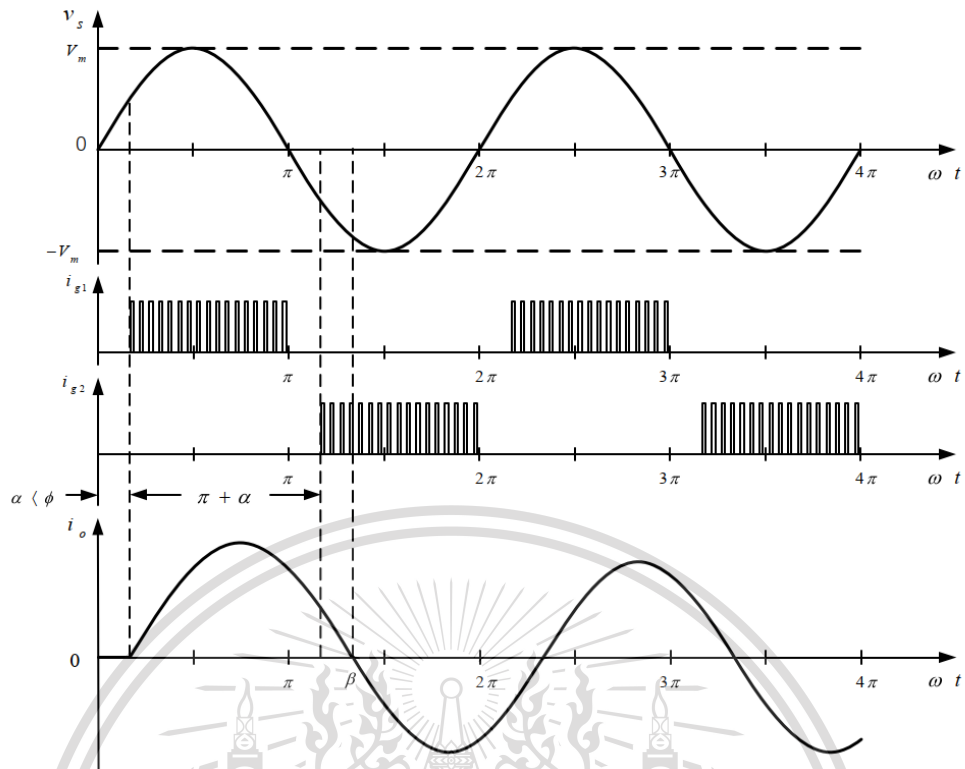


รูปที่ 4.11 คลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดเมื่อมุมจุดชวอนน้อยกว่ามุมอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.12 การกระตุ้นเอสซีอาร์ด้วยกระบวนพัลส์

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.12 ในกรณีโหลดเป็นแบบอินดักทีฟโหลดและสัญญาณกระตุ้นอยู่ระหว่างมุม 0 ถึงมุมอิมพีแดนซ์ θ เอสซีอาร์ T1 จะนำกระแสที่ ωt เท่ากับมุมกระตุ้น α และเอสซีอาร์ T2 จะนำกระแสเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านโหลดตกลงเป็นศูนย์ การทำงานในช่วงไซเคิลแรกๆ รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าจะไม่สมดุลเนื่องจากเป็นช่วงสภาวะชั่วคราวแต่จะลดลงเนื่องจากผลของตัวต้านทานทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ในที่สุด และการควบคุมกำลังไฟฟ้าจะควบคุมได้ในช่วงมุมกระตุ้น α เท่ากับหรือมากกว่ามุมอิมพีแดนซ์ θ เท่านั้น

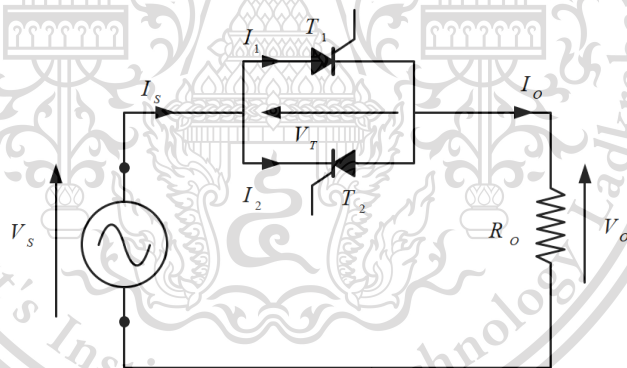
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.4 การควบคุมแบบเปิด-ปิด

วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในหัวข้อ 4.2.2 และ 4.2.3 ใช้เทคนิคการควบคุมเฟสซึ่งค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับมุมเฟสที่เอสซีอาร์เริ่มนำกระแสด้วยการปรับมุมกระตุ้น (α) แต่สำหรับวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้เทคนิคการควบคุมแบบเปิด-ปิด มีวงจรเช่นเดียวกันกับวงจรที่ใช้เทคนิคการควบคุมเฟสดังแสดงในรูปที่ 4.13 แตกต่างกันตรงที่เทคนิคการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจะใช้เทคนิคการเปิดและปิดวงจรเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดที่เอสซีอาร์จะได้รับสัญญาณกระตุ้นเพื่อต่อวงจรที่จุดตัดแรงดันสูงของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (zero-voltage crossing) หลักการทำงานของการทำงานของการควบคุมแบบเปิด-ปิดอธิบายได้ด้วยรูปคลื่นดังแสดงในรูปที่ 4.14 เมื่อเอสซีอาร์ T1 และ T2 ถูกกระตุ้นให้นำกระแสไฟฟ้า n ลูกคลื่นและหยุดการกระตุ้นเพื่อให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสไฟฟ้า m ลูกคลื่น การกระตุ้นจะกระตุ้นสลับต่อเนื่องเป็นวงรอบเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดโดยที่หนึ่งวงรอบของการควบคุมจะเท่ากับ n ลูกคลื่นบวกกับ m ลูกคลื่น ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับเปลี่ยนจำนวนของลูกคลื่น n และ m ด้วยการใช้เทคนิคการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุตแบบเปิดและปิดทำให้สามารถลดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นลงได้ การควบคุมแบบเปิดและปิดใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดที่มีค่าเวลาคงที่ทางกล (mechanical time constant) หรือทางความร้อน (thermal time constant) มีค่าสูงเช่นใช้ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์หรือใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในเตาอบ สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในวงจรคือ เอ็มซีอาร์ ไตรแอสก์

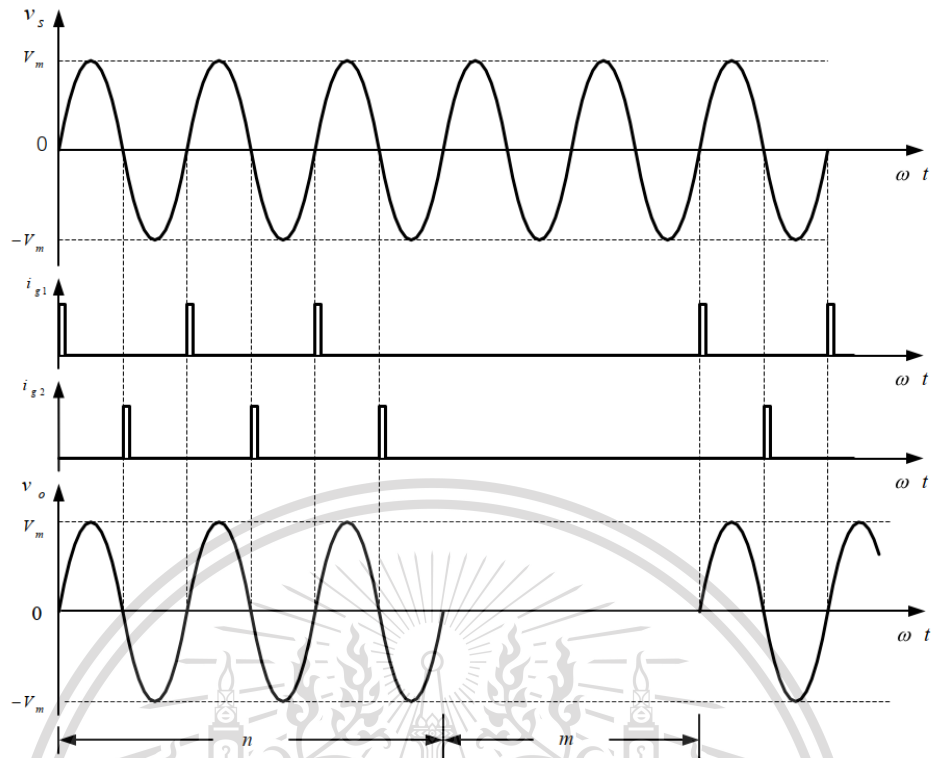


รูปที่ 4.13 วงจรการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบเปิด-ปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.14 คลื่นสัญญาณกระตุ้นและแรงดันตกคร่อมโหลด

ปริมาณแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า

เมื่อ n คือจำนวนลูกคลื่นที่นำกระแส และ m คือจำนวนลูกคลื่นที่หยุดนำกระแส ดังนั้น
คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอาร์เอ็มเอสเอาต์พุตได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 V_o &= \left[\frac{n}{2\pi(n+m)} \int_0^{2\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t \, d(\omega t) \right]^{1/2} \\
 &= \left[\frac{V_m^2}{4\pi(n+m)} \int_0^{2\pi} (1 - \cos 2\omega t) \, d(\omega t) \right]^{1/2} \\
 &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{n}{n+m}} = V_s \sqrt{k} \quad \dots(4.22)
 \end{aligned}$$

เมื่อ V_s คือค่าแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า
 k คือค่าวัฏจักรการทำงานเท่ากับ $n/(n+m)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค่ากระแสไฟฟ้าอาร์เอ็มเอสที่ไหลผ่านโหลดคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

$$I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดตัวต้านทานคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_o} = \frac{kV_s^2}{R_o} \quad (4.23)$$

เมื่อกระแสอาร์เอ็มเอสอินพุตเท่ากับกระแสไฟฟ้าอาร์เอ็มเอสเอาต์พุตดังนั้นคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) ที่จ่ายเข้าวงจรได้ดังต่อไปนี้

$$S_i = V_s I_s = V_s I_o = \frac{\sqrt{k} V_s^2}{R_o} \quad (4.24)$$

เมื่อกำลังไฟฟ้าจ่ายออกจากวงจร (P_o) มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจ่ายเข้าวงจร ดังนั้นคำนวณหาตัวประกอบกำลังทางด้านจ่ายเข้าวงจรแปลงผันได้ดังต่อไปนี้

$$p.f. = \frac{P_o}{S_i} = \frac{P_o}{S_i} = \frac{kV_s^2 R_o}{R_o \sqrt{k} V_s^2} = \sqrt{k} \quad (4.25)$$

เนื่องด้วยในช่วง n ลูกคลื่นในแต่ละไซเคิลของรูปคลื่นไซน์เอสซีอาร์แต่ละตัวนำกระแสเป็นมุม π ดังนั้นคำนวณหากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลผ่านเอสซีอาร์แต่ละตัวได้ดังต่อไปนี้

$$I_{T,av} = \frac{k}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t d(\omega t) = k \frac{I_m}{\pi} \quad (4.26)$$

และค่ากระแสไฟฟ้าอาร์เอ็มเอสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์คำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

$$I_T = \left[\frac{k}{2\pi} \int_0^\pi (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{k} \frac{I_m}{2} \quad (4.27)$$

4.2.5 การกำหนดพิคคของเอสซีอาร์

พิคคแรงดันไฟฟ้าของเอสซีอาร์ กำหนดให้มีค่าสูงกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเอสซีอาร์ในขณะที่ยุคนำกระแส เมื่อพิจารณารูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 เมื่อเอสซีอาร์ยุคนำกระแสจะมีแรงดันไฟฟ้าคร่อมสูงสุด ($V_{sw,max}$) มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะสูงสุดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้างั้นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์สูงสุดมีค่าดังต่อไปนี้

$$V_{sw,max} = V_{max}$$

พิคคกระแสไฟฟ้าของเอสซีอาร์ กำหนดให้มีค่ามากกว่าค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ ($I_{av,max}$) เกิดขึ้นในสภาวะที่เอสซีอาร์ได้รับการกระตุ้นที่มุม α เท่ากับศูนย์ในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและที่มุม α เท่ากับมุมอิมพีแดนซ์ θ ในกรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟโหลด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยไหลผ่านเอสซีอาร์สูงสุดมีค่าดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และนำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.6 รายละเอียด SCR ที่เลือกใช้

SKKT 106/16E



รูปที่ 4.15 SCR SKKT106/16E

คุณสมบัติ

- การถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นฐานโลหะที่แยกได้จากอลูมิเนียมออกไซด์เซรามิก
- ข้อต่อบัดกรีแข็งเพื่อความน่าเชื่อถือสูง
- ได้รับการยอมรับ UL หมายเลข E 63 532

การใช้งานทั่วไป

- ควบคุมมอเตอร์ DC เช่น สำหรับเครื่องมือกล
- ซอฟต์สตาร์ทมอเตอร์ AC
- ควบคุมอุณหภูมิ เช่น เตอบ, กระบวนการทางเคมี
- หรี่แสงหลอดแสงได้อย่างเสถียร (สตูดิโอ, โรงภาพยนตร์)

ตารางที่ 4.1 ค่าความคงทนของ SCR

V_{RSM} V	V_{RRM}, V_{RSM} V	$I_{TRMS} = 180$ A (maximum value for continuous operation) $I_{TAV} = 106$ A (sin 180; $T_C = 85$ °C)		
900	800	SKKT 106/08E	SKKT 106B08E	SKKH 106/08E
1300	1200	SKKT 106/12E	SKKT 106B12E	SKKH 106/12E
1500	1400	SKKT 106/14E	SKKT 106B14E	SKKH 106/14E
1700	1600	SKKT 106/16E	SKKT 106B16E	SKKH 106/16E
1900	1800	SKKT 106/18E	SKKT 106B18E	SKKH 106/18E

ตารางที่ 4.2 สภาวะการทำงานของ SCR

สัญลักษณ์	สภาวะการทำงาน	ค่า	หน่วย
I_{TAV}	sin 180; $T_C = 85(100)$ °C	106(78)	A
I_D	P3/180F; $T_a = 35$ °C; B2/B6	145/180	A
	P16/200F; $T_a = 35$ °C; B2/B6	190/260	A
I_{RMS}	P3/180F; $T_a = 35$ °C; W1/W3	200/3*140	A
I_{TSM}	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	2250	A
	$T_{vj} = 130$ °C; 10 ms	1900	A
i^2t	$T_{vj} = 25$ °C; 8,3 ... 10 ms	25000	A ² s
	$T_{vj} = 130$ °C; 8,3 ... 10 ms	18000	A ² s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สัญลักษณ์	สภาวะการทำงาน	ค่า	หน่วย
V_T	$T_{vj} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}; I_T = 300\text{ A}$	Max. 1,65	V
$V_{T(TO)}$	$T_{vj} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$	Max. 0,9	V
r_T	$T_{vj} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$	Max. 2	m Ω
I_{DD}, I_{RD}	$T_{vj} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}; V_{RD} = V_{RRM}; V_{DD} = V_{DRM}$	Max. 20	mA
t_{gd}	$T_{vj} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}; I_G = 1\text{ A}; di_G/dt = 1\text{ A}/\mu\text{s}$	1	μs
t_{gr}	$V_D = 0,67 * V_{DRM}$	2	μs
$(di/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$	Max. 150	A/ μs
$(dv/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$	Max. 1000	V/ μs
t_q	$T_{vj} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$	100	μs
I_H	$T_{vj} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}; \text{typ./max.}$	150/250	mA
I_L	$T_{vj} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}; R_G = 33\text{ }\Omega; \text{typ./max.}$	300/600	mA
V_{GT}	$T_{vj} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}; \text{d.c.}$	Min. 3	V
I_{GT}	$T_{vj} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}; \text{d.c.}$	Min. 150	mA
V_{GD}	$T_{vj} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}; \text{d.c.}$	Max. 0,25	V
I_{GD}	$T_{vj} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}; \text{d.c.}$	Max. 6	mA
$R_{th(j-c)}$	cont.; per thyristor / per module	0,28/0,14	K/W
$R_{th(j-c)}$	sin. 180; per thyristor / per module	0,3/0,15	K/W
$R_{th(j-c)}$	rec. 120; per thyristor / per module	0,32/0,16	K/W
$R_{th(j-c)}$	per thyristor / per module	0,2/0,1	K/W
T_{vj}		- 40 ... +130	$^{\circ}\text{C}$
T_{stg}		- 40 ... +125	$^{\circ}\text{C}$
V_{isol}	a.c. 50 Hz; r.m.s.; 1s /1 min.	3600/3000	V \sim
M_s	to heatsink	$5 \pm 15\%$ ¹⁾	Nm
M_t	to heatsink	$3 \pm 15\%$	Nm
a		$5 * 9,81$	m/s ²
m	approx..	95	g
Case	SKKT	A 46	
	SKKT ...B	A 48	
	SKKH	A 47	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

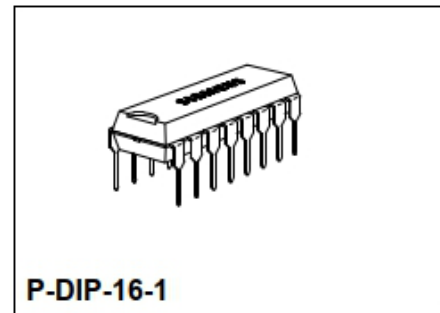
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3 เฟสคอนโทรลไอซีทีซีเอ 785 (Phase Control IC TCA785)

คุณสมบัติ

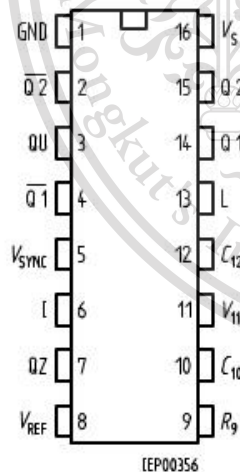
- การรับรู้ค่าศูนย์ที่เชื่อถือได้
- ขอบเขตการใช้งานกว้าง
- อาจใช้เป็นสวิตช์จุดชนวนที่ศูนย์องศา
- เข้ากันได้กับ LSL
- สามารถใช้งานได้สามเฟส (3 Ics)
- กระแสไฟขาออก 250 mA
- ช่วงกระแส ramp กว้าง
- ช่วงอุณหภูมิกว้าง



รูปที่ 4.16 TCA 785

IC ควบคุมเฟสนี้มีไว้เพื่อควบคุมไทรสเตอร์ไตรแอกและทรานซิสเตอร์ ทริกเกอร์พัลส์ สามารถเลื่อนได้ภายในมุมเฟสระหว่าง 0° ถึง 180° การใช้งานทั่วไป ได้แก่ วงจรแปลงตัวควบคุม AC และตัวควบคุมกระแสสามเฟส IC นี้แทนที่ TCA 780 และ TCA 780 D.

ตารางที่ 4.3 ฟังก์ชันการทำงานของขา TCA785



รูปที่ 4.17 การกำหนดขา

ขา	สัญลักษณ์	ฟังก์ชัน
1	GND	กราวด์/ดิน
2	Q2	เอาต์พุต 2 กลับเฟส
3	QU	เอาต์พุต U
4	Q1	เอาต์พุต 1 กลับเฟส
5	V_{SYNC}	แรงดันซิงโครนิส
6	I	กระแสขั้วขั้ว
7	QZ	เอาต์พุต Z
8	V_{REF}	แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง
9	R_9	ความต้านทาน ramp
10	C_{10}	ความจุ ramp
11	V_{11}	แรงดันคอนโทรล
12	C_{12}	ส่วนขยายพัลส์
13	L	พัลส์ยาว
14	Q1	เอาต์พุต 1 (-)
15	Q2	เอาต์พุต 2 (+)
16	V_S	แรงดันแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3.1 คุณสมบัติ TCA785

คุณสมบัติ TCA785 เป็นวงจรรวมเบอร์ TCA785 ผลิตโดย บริษัทซีเมนต์ประเทศไทย สหพันธ์รัฐเยอรมันใช้ในงานควบคุมเฟสโดยเฉพาะหรือใช้กับวงจร Line Commutated Converter ใช้ได้กับระบบไฟฟ้า 1 เฟสและ 3 เฟส สามารถปรับปรุงมุมจุดชววนเกทได้ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 180 องศา และสามารถสร้างลักษณะของพัลส์ได้หลายรูปแบบ ตามลักษณะของโหลด เช่น Single shot pulse เป็นต้น ใช้งานได้ดีในย่านความถี่ระหว่าง 10 Hz ถึง 500 Hz ต้องการไฟเลี้ยง แรงดันไฟฟ้า 8 VDC ถึง 18 VDC และอุณหภูมิใช้งานอยู่ระหว่าง -25°C ถึง $+85^{\circ}\text{C}$ กันกระแสไฟฟ้า ประมาณ 4.5 mA - 10 mA อินเตอร์เฟสได้โดยตรงกับลอจิกเกตที่ใช้แรงดัน +15 VDC (เช่น CMOS) สามารถจ่ายกระแสได้ประมาณ 250 mA ซึ่งเป็นแบบปกติและแบบกลับสัญญาณที่ขา 14 และ ขา 15 สัญญาณด้านออกมีทั้งแบบปกติและแบบกลับสัญญาณ Inhibit Function ควบคุมการกำเนิดสัญญาณและสามารถใช้งานในลักษณะ Zero crossing ได้ด้วย

4.3.2 คุณลักษณะการทำงานของ TCA785

การทำงานของวงจรรวม TCA785 พิจารณาผ่านภาพกรอบแสดงโครงสร้างภายในของ TCA785 ซึ่งเป็นวงจรรวมแบบ LSI มี 16 ขา บรรจุแบบตัวถังพลาสติกขา 16 คือ บวก V_s รับแรงดันไบแอสในย่าน +8 VDC ถึง +18 VDC โดยขาหนึ่งเป็นจุดดิน (Ground) แรงดันควบคุมภายในเป็นแรงดันอ้างอิงคือ $V_{ref} = 3.1$ โวลต์วัดได้ที่ขา 8 โดยตัว C8 ทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวน ขา 5 คือขาที่รับแรงดันซิงโครไนซ์ (V_{syn}) ซึ่งเป็นแรงดันไฟสลับจากแหล่งจ่ายไฟสลับที่ต่อกับวงจรภาคกำลังโดยต่อนิวตรอนกับขา 1, R9 คือตัวต้านสร้างสัญญาณลาดเอียงและ C10 คือตัวเก็บประจุสัญญาณลาดเอียงต่อกับขา 9 และขา 10 ตามลำดับขาของ C10 มีค่าในย่าน 500 pF ถึง 1 μF และ R9 มีค่าเหมาะสมในย่าน 3-300 กิโลโอห์ม

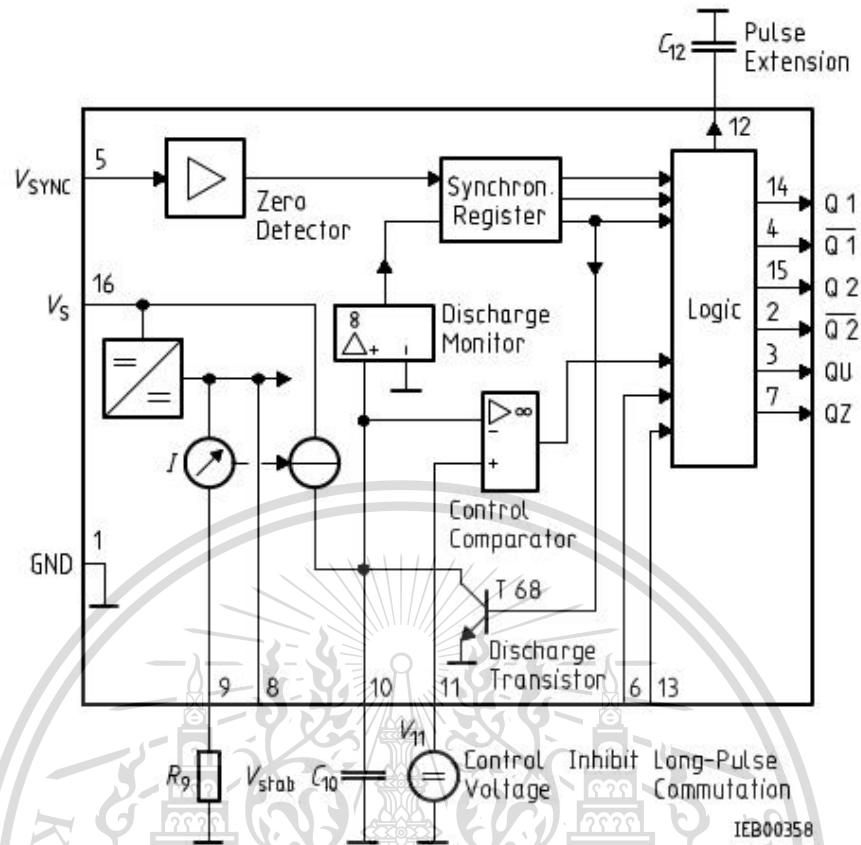
จากรูปที่ 4.17 block diagram แสดงให้เห็นการทำงานของ TCA785 โดยการควบคุมแรงดันภายใน $V = 3.1$ โวลต์ ดังนั้นตัวพารามิเตอร์ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงดัน DC Supply และความกว้างขวางของแรงดันช่วงยินยอมเป็น $U_s = 8$ ถึง 18 โวลต์ช่วงของไฟฟ้าบวกจะต่ออยู่กับขา 16 และขั้วลบจะต่ออยู่กับ 1 (Ground) กระแสที่ใช้งาน (No load) จะมีค่าถึง 10mA เอาต์พุตของการควบคุมแรงดัน $V = 3.1$ โวลต์และให้รายละเอียดที่ขา 8 โดยต่อความต้านทาน DC COUPLING ที่ภายในป้องกัน Noise ทำให้ดีขึ้นโดยใช้ holding 8 คาปาซิเตอร์ C8 สามารถต่อเข้ากับกราวด์ที่นี้ (ระดับแรงดันอ้างอิง)

ในวงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงตามต้องการทั่วไป แล้วชนิดของอุปกรณ์ TCA785 ชนิดของจุดที่มีการขนานในรูปแบบของการควบคุมตามเงื่อนไขในทุกๆ เฟสและการควบคุมแต่ละขาให้ดีสัญญาณของ Synconizin U_{syn} จะเป็นการแสดงให้เห็นจากแรงดันของการใช้ AC โดยผ่านความต้านทานค่ามาก U_{syn} จะมีการต่ออยู่กับขา 5 และกราวด์ต่ออยู่กับขา 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.18 Block Diagram ของ TCA 785

การ Synchronizing เป็นการป้องกันการตอบสนองสูงสุดของ Zero crossing การป้องกันโดยใช้หน่วยความจำซึ่งใช้ในการควบคุมการกำหนดของคลื่นฟันเลื่อยโดยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกระแสคงที่จากแหล่งกำหนด I_{const} โดยประจุภายนอก คาปาซิเตอร์ C_{10} จะมีค่าอยู่ระหว่าง $500 \text{ pF} - 1 \mu\text{F}$ ซึ่งเราทราบอยู่แล้วว่าสัญญาณฟันเลื่อยมีความมากขึ้นหลายเท่าขึ้นอยู่กับและค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ I_o ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงกระแส I_{const} จะถูกปรับโดยความต้านทานภายนอก R_9 และ $R_r = 3$ ถึง 300 กิโลโอห์มโดยผ่านขา 9

วงจร RC R_9, C_{10} จะทำให้ความหมายของสถานะของแรงดันฟันเลื่อย U_1 สัญญาณ Ramp จะเริ่มโดยที่ศูนย์ตัดกับแรงดัน Sync และบางสิ่งที่ได้กล่าวมาโดยการคายประจุ Ramp คาปาซิเตอร์ C_{10} โดยผ่านทรานซิสเตอร์ให้คายประจุภายในวงจร ลอจิกของหน่วยความจำ Sync จะทำหน้าที่เป็นการป้องกันเอาต์พุตมีค่าเป็นโดยเฉพาะการคายประจุของตัวนี้อย่างสมบูรณ์ของ C_{10}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

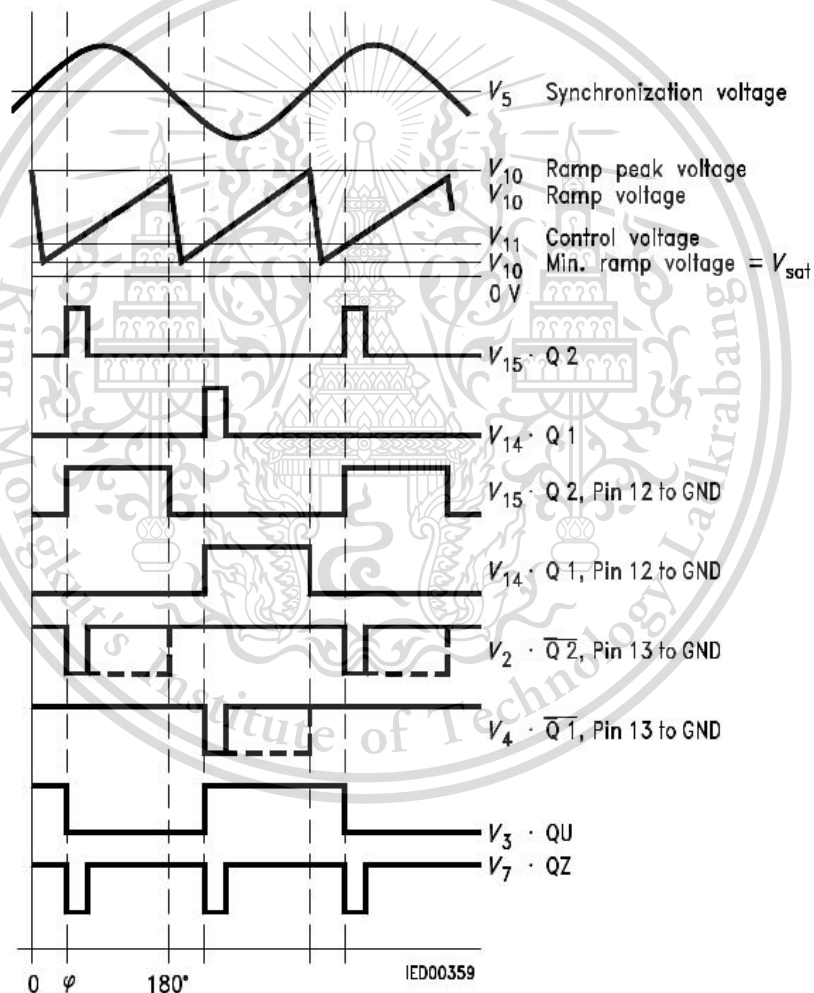
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

นี่เป็นความสำคัญเมื่อเราใช้ IC TCA785 อ่าง Zero crossing switch และการเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์แรงดันซึ่งไหลที่ C10 จะไม่มีผลต่อการควบคุมของไอซี TCA785 และในทางเดียวกันนี้จะเป็นการควบคุมแรงดันที่แหล่งจ่าย(Supply)

ในกรณีของการมีคลื่นรบกวนจะต้องเพิ่ม Op-amp ให้กับตัวไอซีและในขณะเดียวกันนั้นเมื่อทำการควบคุมแรงดันไม่ให้เกิดการรบกวนไหลจะได้รับการควบคุมเฟส 180องฟา และจะประกอบด้วย (เต็มคลื่น) ทุกๆการควบคุมแรงดันซึ่งแรงดันรบกวนไหลมีค่าต่ำและมีค่าเข้าใกล้ 0 โวลต์

การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง U12 ที่ทำการต่ออยู่กับขา 11 (ด้วยกราวด์ขา 1) ซึ่งการควบคุมโดยการเปรียบเทียบของ Comparator จะทำการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันพื้นเลื้อย U10 จะทำการควบคุมแรงดัน U11 ให้เอาต์พุตพัลส์ (บวกหรือกราวด์) ซึ่งมีการเชื่อมโยง (รูปที่ 4.18)



รูปที่ 4.19 Pulse Diagram ของ TCA 785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอาต์พุตส่วนใหญ่ Q1 (ขาที่14) และ Q2 (ขาที่15) จะได้รับโดยวิธีการของ Emitter follower จะค่าสูงสุด 250mA มันจะเป็นการจ่ายให้กับ Half wave ที่มีซ้ำเหมือนกับ Q2 ในขั้วบวกของแรงดัน Sync Q2 จะทำการปล่อยพัลส์เฉพาะครึ่งลบเท่านั้น Pulse Duration จะมีค่าประมาณ 30 S (Pulse ซึ่งปราศจากการต่อกับขา 12) มันจะเป็นอิสระโดยคาปาซิเตอร์นี้จะต่อภายนอก C12

ถ้าอินพุตของ ทริกเกอร์เข้าที่ขา12 ถูกลัดวงจรกับกราวด์ความกว้างของพัลส์ = 180 องศา (Long Pulse) เอาท์พุท Q1 (ขาที่14) และ Q2 (ขาที่2) Open collector จะทำให้เหมือนกับข้อมูลคือ สูงสุด 10 mA

สัญญาณสามารถได้ทั้งคู่ของเอาต์พุตเมื่อความต้านทานของ collector R1 และ R2 (ประมาณ 15 กิโลโอห์ม) จะต้องถูกกระทำระหว่างเอาต์พุตและขั้วบวกสัญญาณที่ออกมาพิจารณาได้จากสัญญาณที่มีลักษณะกลับกันของ Q1 และ Q2 การลัดทอนของพัลส์ (เอาต์พุตที่ออกไปยังขั้วบวก) มีค่าประมาณ 30 s

ถ้าจุดทริกเกอร์ถูกต่อเข้ากับกราวด์ตามความกว้างของ (Pulse Output) ไปยังขั้วบวกของ 180 องศา (Long Pulse Switching) จะเกิดความถี่มากแต่ละเอาต์พุตของ Qu (ขา3) Qz (ขา7) เป็นตัวที่ทำให้กำหนด Open collector

การได้รับสัญญาณ collector จาก R3 และ R7 เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งระหว่างเอาต์พุตและขั้วบวก สัญญาณเอาต์พุต Qu จะเหมือนกับของ Q1 จะมีความกว้างเท่ากับ 180 องศา เท่ากับค่าคงที่สัญญาณที่ออกจาก Q2 การทำให้ปราศจาก Noise ที่ดีนั้นจะมีการต่อเอาท์พุท Qz (ขา 7) กับกราวด์

การยับยั้งพัลส์ (ขา6) สามารถจะจับพร้อมกันหมดทั้งเอาต์พุต (Q1, Q2, Qu) จุดที่ทำการทริกที่ขา6 มีการต่อกราวด์โดยสวิทช์หน้าสัมผัสสี่เหลี่ยม N-P-N ทรานซิสเตอร์ให้เห็นวงจรภายในของ TCA785 แสดงสถานะของเอาต์พุต

การควบคุมไทรสเตอร์ใน Line – commutating or Non-commutating กระแสจะเป็นที่ต้องการทั้งคู่ของแบบจำลองทริกเกอร์ไทรสเตอร์จะถูกทริกเกอร์โดยกระแสพัลส์ที่เป็นบวกระหว่างเกทและคาโทดการควบคุมพัลส์โดยส่วนใหญ่แล้วจะทำอยู่ระหว่างการค้างของกระแส

การทำ Switch off ของไทรสเตอร์จะทำให้โดยการลัดกระแสที่ไหลผ่านแอนโอดและคาโทดให้ต่ำกว่ากระแสไหลตั้ง ความแตกต่างของการลัดทอนซึ่งจะจ่ายไปยังการทริกของไทรสเตอร์ขึ้นอยู่กับารออกแบบวงจรการเปลี่ยนแปลงพัลส์และขึ้นอยู่กับการ On load

การยับยั้งอินพุต (ขา6) ซึ่งอยู่เหนือ +14 โวลต์ ดังนั้นความต้านทาน R10 กิโลโอห์มถูกต่อเข้ากับแรงดันการทำงาน (ขา6) ถ้าแรงดันเอาต์พุตพัลส์ถูกยับยั้งมีค่าลดลงถึง 2.5 โวลต์เอาต์พุตพัลส์จะถูกต้านไว้

วงจรที่ถูก Open ที่ขา6 ไปยังกราวด์หรือ mp ได้ทำได้โดยการใช้สวิทช์หรือวงจรลอจิกการปิดสวิทช์ขณะไหล จะไม่ขึ้นอยู่กับสถานะของสัญญาณของ TCA785 ทั้งหมดนี้ระดับของการยับยั้งทำให้เกิดการเสียหายของเอาต์พุตที่เป็นไปได้ ความจำเป็นที่ตามมาเมื่อพัลส์ที่เกิดขึ้นตรงไทรสเตอร์มันจะเป็นความต้องการของกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นมากเพราะว่าการสูญเสียในความต้านทาน R1 มากกว่า Power supplies และไม่พอเพียงเมื่อสวิสซ์ off ของไอซีและนี่เป็นสาเหตุของการรบกวนที่เกิดขึ้นในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค่า R9 และ C10 จะเป็นตัวกำหนดขนาดของสัญญาณลาดเอียง (V10) ถ้า R9 และ C10 มีค่ามาก ความลาดเอียงของ C10 จะมีค่ามากตามไปด้วย ขา 11 ของ TCA785 คือขาที่ต่อแรงดันควบคุมเป็นแรงดันไปตรงปรับค่าได้แรงดันควบคุม (V11) นี้จะป้อนเข้าขาบวก โดยเทียบกับแรงดัน V10 เพื่อกำหนดขนาดของมุมจุดชนวนที่ด้านออกของวงจรถูก จะเห็นว่าสัญญาณด้านออกของวงจรถูกอยู่ที่ขา 14 และขา 15 โดยพัลส์ที่ขา 15 จะทำงานในช่วงเวลา $t=0$ องศา ถึง 180 องศา และพัลส์ที่ขา 14 จะทำงานที่ $t=180$ องศา ถึง 360 องศา ขนาดความกว้างของพัลส์ด้านออกคือ ปกติถ้าไม่ต่อ C12 จะมีค่า $=30 \mu\text{S}$ แต่สามารถเปลี่ยนค่า β ได้โดยใช้ค่า C12 ต่อเข้ากับขา 12 ดังแสดงความสัมพันธ์ของค่า C12 กับค่าของ β

สำหรับขา 2 และขา 4 คือสัญญาณกลับของ V15 และ V14 สัญญาณลักษณะพัลส์เดี่ยวที่มี $\beta = 30 \mu\text{S}$ นั้นจะเกิดขึ้นเมื่อไม่มีการต่อ C12 เข้าที่ขา 12 แต่ถ้าต้องการให้พัลส์ด้านออกเป็นพัลส์ยาวทำได้โดยการต่อขา 12 กับจุดกราวด์และถ้าต้องการให้สัญญาณด้านออกที่ขา 2 และขา 4 เป็นพัลส์ยาวด้วยจะต้องต่อขา 13 เข้ากับจุดกราวด์ด้วย

4.3.3 ลักษณะของพัลส์ด้านออกของ TCA785

ลักษณะของพัลส์ด้านออกชนิดต่างๆ การสร้างพัลส์ด้านออกให้มีรูปร่างแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของโหลดในวงจรกำลังที่ทรานซิสเตอร์นั้นต่อควบคุม โหลดอยู่กับลักษณะของพัลส์มีหลายแบบ และมีรายละเอียดดังนี้

- Short Pulse ($\beta = 30-100\mu$) สำหรับโหลดตัวต้านทาน
- Long Pulse ($\beta = 100 \mu\text{S} - 1 \text{ mS}$) สำหรับโหลดตัวต้านทานที่เกินกระแสสูงๆหรือโหลดตัวเหนี่ยวนำ
- Continuous Pulse ($\beta = 180 \text{ องศา} - \alpha$) สำหรับโหลดตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงมาก
- Combined Pulse สำหรับวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเกต ($di/dt = 1$ ถึง $3A/\mu\text{S}$) หรือ สำหรับจุดชนวนเกตทรานซิสเตอร์ที่ต่ออนุกรมกัน
- Double Pulse ใช้สำหรับวงจรจุดชนวนเกตทรานซิสเตอร์ในวงจร 3 เฟส บริดจ์

4.3.4 การควบคุมเฟสของ TCA785

การควบคุมทรานซิสเตอร์ในทางปฏิบัติต่างๆไปแล้วเมื่อทำการเปลี่ยนกระแสสลับไปเป็นกระแสตรงและใช้กำลังไฟฟ้าที่ถูกควบคุม ณ เวลาเดียวกัน ถ้าเป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงของทรานซิสเตอร์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นการต้องการโดยอุปกรณ์พิเศษ คือ IC TCA785 การควบคุมเฟสที่มีการพัฒนาสำหรับแต่ละจุดประสงค์โดยการเลือกและจุดภายนอกของสวิตช์ซึ่งโดยสามารถเชื่อมโยงกับภายนอกมันจะถูกจ่ายให้โดยการเปลี่ยนแปลงอย่างมากของหน้าที่ที่ต้องปฏิบัติซึ่งจะดูอุปกรณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวกับพัลส์ทำให้การใช้อุปกรณ์ที่มีราคาสูงในวงจรที่มีการไหลทางเดียวหรือใช้ไฟ DC

ในการแยกแยะ IC TCA785 และการควบคุมทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงในการควบคุมจะใช้ IC TCA785 ในการควบคุมเฟสจะใช้ได้อย่างดีมากในวงจรกระแสไฟฟ้าสำหรับวงจรการเปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความพิเศษของ IC TCA785 เต็มไปด้วยเรื่องประยุกต์การใช้งานในช่วงกว้างเพราะว่าความเป็นไปได้ของแหล่งจ่ายภายนอก 8 ถึง 18 โวลต์อุณหภูมิการใช้งานอยู่ในช่วง -25 ถึง 85 องศาเซลเซียส กระแสการใช้งานเฉพาะ 45 ถึง LSL ตรงกัน ยกตัวอย่าง การควบคุมโดยความเร็วต่ำปราศจากการรบกวนลอจิกด้วยระบบสัญญาณเอาต์พุตจำนวนทั้ง 2 สำหรับการกระตุ้นแต่ละตัวเท่ากับ 250 mA เอาต์พุตทั้งสองจะตรงกันข้ามหน้าที่ของการยับยั้งการกระตุ้นสัญญาณพัลส์การยับยั้งการเกิดการดับอาร์คพัลส์ของการกระตุ้นจะขยายโดยคาปาซิเตอร์ที่อยู่ภายนอก

ตารางที่ 4.4 ค่าสูงสุดที่ทนได้

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าลิมิต		หน่วย
		ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	
แรงดันแหล่งจ่าย	V_s	-0.5	18	V
กระแสเอาต์พุต	I_Q	-10	400	mA
แรงดันยับยั้ง	V_6	-0.5	V_s	V
แรงดันคอนโทรล	V_{11}	-0.5	V_s	V
แรงดันลีดวอร์จ	V_{13}	-0.5	V_s	V
กระแสขาเข้าซิงโครไนซ์	V_5	-200	± 200	μA
แรงดันเอาต์พุตที่ ขา 14,15	I_Q		V_s	V
กระแสเอาต์พุตที่ ขา 2,3,4,7	I_Q		10	mA
แรงดันเอาต์พุตที่ ขา 2,3,4,7	V_Q		V_s	V
อุณหภูมิแยก	T_i		150	$^{\circ}C$
อุณหภูมิที่ยอมรับได้	T_{stg}	-55	125	$^{\circ}C$
ตัวต้านทานความร้อนระบบอากาศ	$R_{th SA}$		80	K/W

ตารางที่ 4.5 ช่วงการดำเนินการ

แรงดันแหล่งจ่าย	V_s	8	18	V
ความถี่ช่วงการดำเนินการ	f	10	500	Hz
อุณหภูมิโดยรอบ	T_A	-25	85	$^{\circ}C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.4 ไอซีสร้างความถี่ LM555

คุณสมบัติ

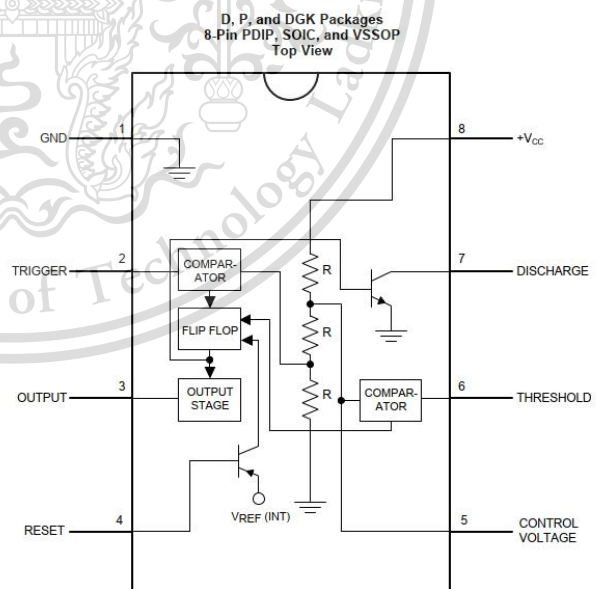
- ใช้แทนโดยตรงสำหรับ SE555 / NE555
- ระยะเวลาตั้งแต่ไมโครวินาทีถึงชั่วโมง
- ทำงานทั้งในโหมด Astable และ Monostable
- วงจรปรับ duty ได้
- เอาต์พุตสามารถเป็นแหล่งจ่ายหรือซิงค์ 200 mA
- เอาต์พุตและแหล่งจ่ายเข้ากันได้กับ TTL
- เสถียรที่อุณหภูมิดีกว่า 0.005% ต่อ °C
- ปกติเปิดและปกติปิดเอาต์พุต
- มี 8 พินในแพ็คเกจ VSSOP

แอปพลิเคชัน

- เวลาที่แม่นยำ
- การสร้างพัลส์
- เวลาตามลำดับ
- การสร้างความล่าช้าตามเวลา
- การปรับความกว้างพัลส์
- การปรับตำแหน่งพัลส์
- กำหนด ramp แบบเชิงเส้น

คำอธิบาย

LM555 เป็นอุปกรณ์ที่มีความเสถียรสูงในการสร้างความล่าช้าหรือการสั้นของเวลาที่แม่นยำ มีเทอร์มินัลเพิ่มเติมสำหรับการทริกเกอร์หรือการรีเซ็ตหากต้องการ ในโหมดหน่วงเวลาของการทำงานเวลาจะถูกควบคุมอย่างแม่นยำโดยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุภายนอกตัวเดียว สำหรับการทำงานที่มั่นคงในฐานอะอสซิลเลเตอร์ ความถี่ในการทำงานฟรีและรอบการทำงานจะถูกควบคุมอย่างแม่นยำด้วยตัวต้านทานภายนอกสองตัวและตัวเก็บประจุหนึ่งตัว วงจรอาจถูกทริกเกอร์และรีเซ็ตบนรูปคลื่นที่ตกลงมาและวงจรเอาต์พุตสามารถจ่ายหรือจมลงได้ถึง 200 mA หรือขับวงจร TTL



รูปที่ 4.20 การกำหนดค่าพินและฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.6 ฟังก์ชันการทำงานของขา LM555

ขา	I/O	คำอธิบาย	
5	แรงดัน คอนโทรล	I	ควบคุมและระดับทริกเกอร์ กำหนดความกว้างพัลส์ของรูปคลื่นเอาต์พุต นอกจากนี้ยังสามารถใช้แรงดันไฟฟ้าภายนอกที่เข้ากับพินนี้เพื่อปรับเอาต์พุตรูปคลื่น
7	คายประจุ	I	เอาต์พุตแบบเปิดซึ่งจะปล่อยตัวเก็บประจุระหว่างช่วงเวลา (ในเฟสที่มีเอาต์พุต) สลับเอาต์พุตจากสูงไปต่ำเมื่อแรงดันไฟฟ้าถึง 2/3 ของแรงดันไฟฟ้า
1	กราวด์	O	แรงดันอ้างอิง
3	เอาต์พุต	O	รูปคลื่นที่ขับเคลื่อนด้วยเอาต์พุต
4	รีเซ็ต	I	ใช้พัลส์เชิงลบกับพินนี้เพื่อปิดใช้งานหรือรีเซ็ตตัวจับเวลา เมื่อไม่ได้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการรีเซ็ตควรเชื่อมต่อกับ Vcc เพื่อหลีกเลี่ยงการทริกเกอร์ที่ผิดพลาด
6	เกมท์	I	เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่เข้ากับเทอร์มินัลกับแรงดันอ้างอิง 2/3 Vcc แอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าที่เข้ากับเทอร์มินัลนี้รองรับต่อสถานะที่ตั้งไว้ของฟลิปฟล็อป
2	ทริกเกอร์	I	รองรับในการเปลี่ยนฟลิปฟล็อปจากเซตเป็นรีเซ็ต เอาต์พุตของตัวจับเวลาขึ้นอยู่กับ แอมพลิจูดของพัลส์ทริกเกอร์ภายนอกที่เข้ากับพินนี้
8	V+	I	แหล่งจ่ายแรงดันที่ขึ้นกับกราวด์

ตารางที่ 4.7 ค่าสูงสุดที่ทนได้ของ LM555

		ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	หน่วย
การสูญเสียพลังงาน		LM555CM, LM555CN	1180	mW
		LM555CMM	613	mW
ข้อมูลการประกอบ	แพ็คเกจ PDIP	ทนการบัดกรี (10 วินาที)	260	°C
	แพ็คเกจโครงร่างขนาด	เฟสการระเหย (60 วินาที)	215	°C
	เล็ก (SOIC และ VSSOP)	อินฟราเรด (15 วินาที)	220	°C
อุณหภูมิที่รองรับได้, T_{stg}		-65	150	°C

ตารางที่ 4.8 เงื่อนไขการใช้งานที่แนะนำของ LM555

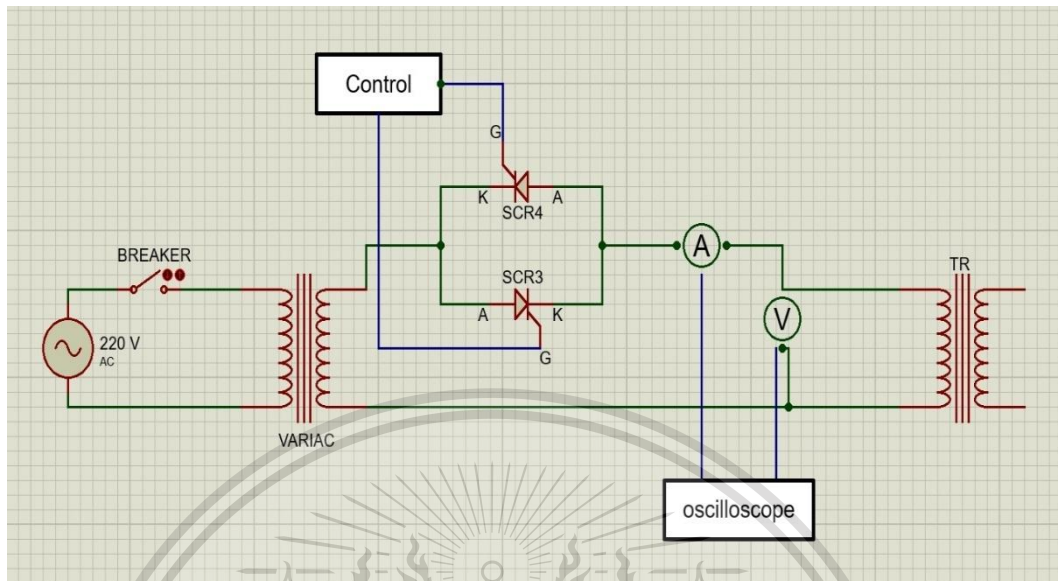
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	หน่วย
แรงดันแหล่งจ่าย		18	V
อุณหภูมิ, T_A	0	70	°C
อุณหภูมิแยกที่ใช้งาน, T_J		70	°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.5 วงจรที่ใช้ในการทดลองวัดกระแสอินรัช



รูปที่ 4.21 วงจรไฟฟ้ากำลัง

4.5.1 วงจรไฟฟ้า 1 เฟสต่อเข้าหม้อแปลง ประกอบด้วย

1. Supply ขนาด 220V ใช้จ่ายไฟผ่านไทรสเตอร์ชนิดเอสซีอาร์ เข้าหม้อแปลงทดสอบ
2. Breaker ใช้ขนาด 20 A ใช้ เปิด-ปิด วงจรทั้งหมด
3. Variac 1 เฟส ใช้ปรับแรงดันตามที่ต้องการป้อนให้โหลด
4. SCR จำนวน 2 ตัว รวมกันอยู่ใน 1 module เพื่อปรับมุมในช่วงครึ่งไซเคิลบวกและช่วงครึ่งไซเคิลลบ
5. Oscilloscope ใช้วัดกระแสอินรัช โดยใส่ไว้ที่ตำแหน่งก่อนเข้าหม้อแปลงทดสอบ
6. โหลดหม้อแปลง 1 : 1

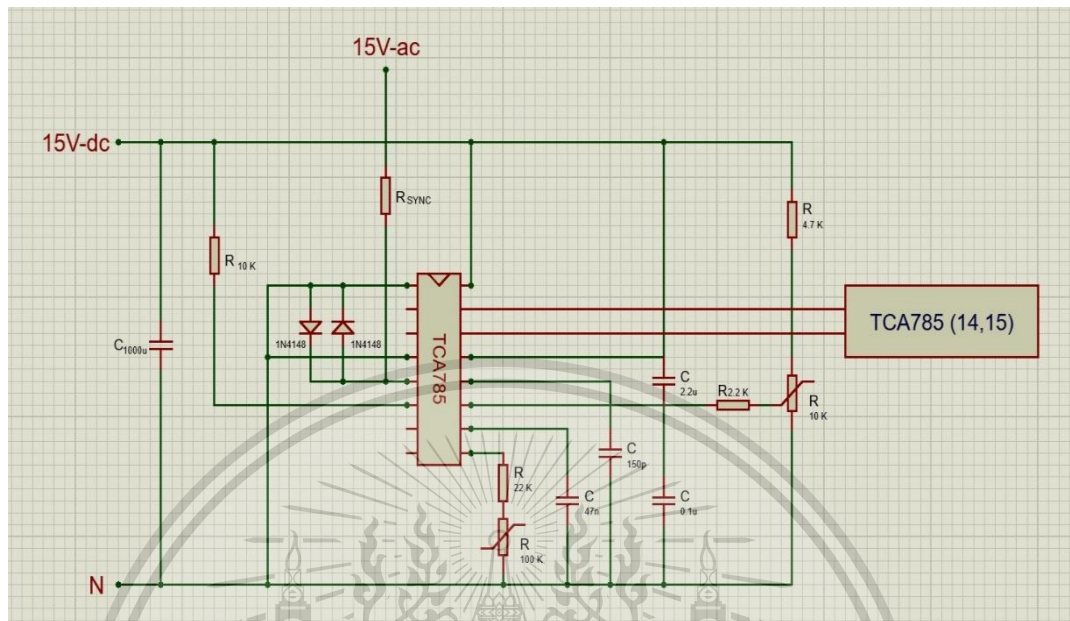
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.5.2 วงจรคอนโทรล ประกอบด้วย 3 วงจรหลัก

4.5.2.1 วงจรควบคุมเฟสของ TCA785



รูปที่ 4.22 วงจรของ TCA785 เอาต์พุตขา 14,15

ประกอบด้วย

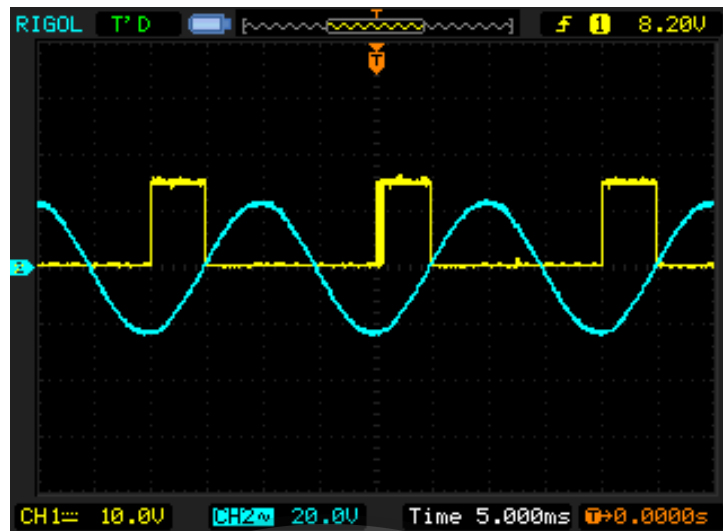
1. หม้อแปลงแรงดันขนาดเล็ก 220/15 โวลต์ เส้นแรกแปลงแรงดันลงเพื่อใช้ในวงจรคอนโทรล
2. เส้นที่สองต้องนำไปผ่าน Bridge rectifier แปลง AC เป็น DC เพื่อเป็นไฟเลี้ยง IC
3. TCA785 ต่อเพื่อใช้งานแบบ full-wave control สำหรับไฟ 1 เฟส ใช้กำหนดขนาดของมุมจุดชนวนที่ด้านออกของวงจร จะเห็นว่าสัญญาณด้านออกของวงจรอยู่ที่
 - ขา 14 จะคุมมุมจุดชนวนทางฝั่งลบ คือ ตั้งแต่ 180 องศา ถึง 360 องศา
 - ขา 15 จะคุมมุมจุดชนวนทางฝั่งบวก คือ ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 180 องศา

หมายเหตุ ไฟที่ต่อเข้าขา 5 จะเป็นไฟกระแสสลับ(AC) ส่วนไฟเลี้ยง IC จะเป็นไฟกระแสตรง(DC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.23 สัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนฝั่งลบ ขา14



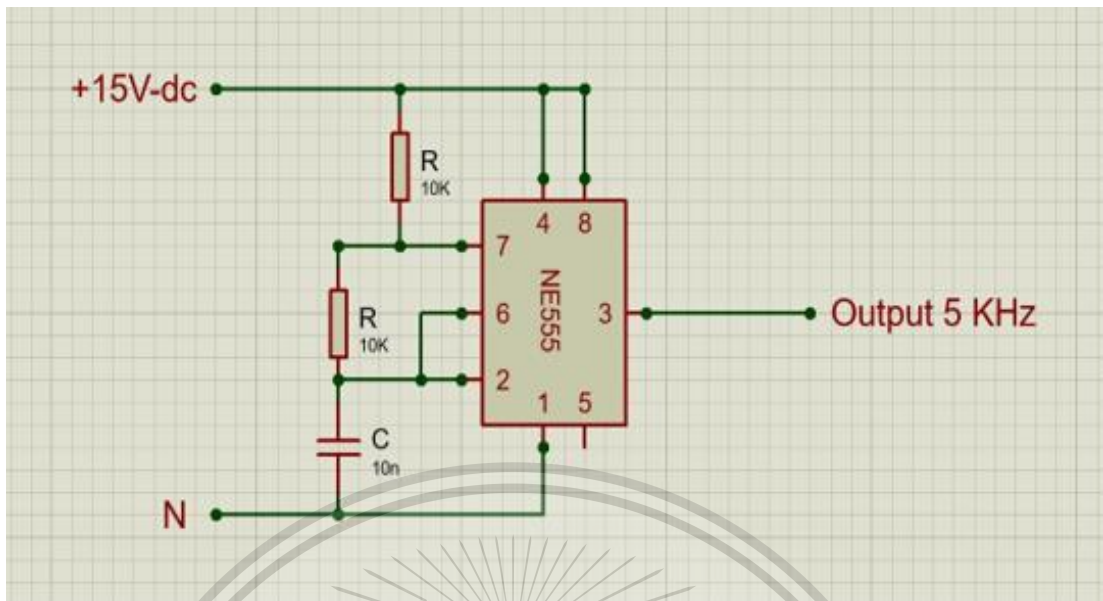
รูปที่ 4.24 สัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนฝั่งบวก ขา15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

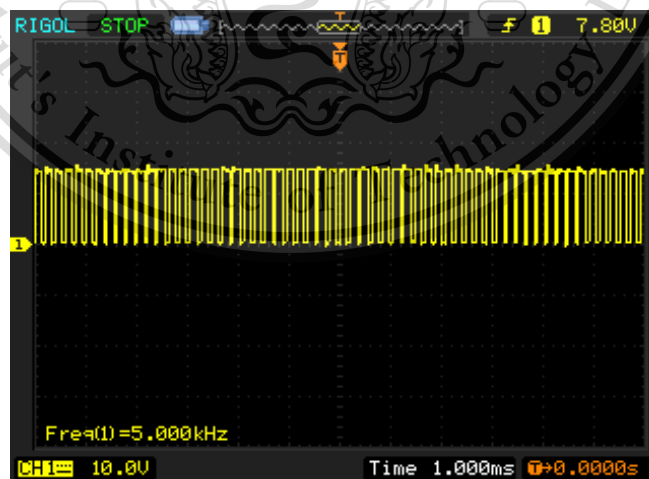
4.5.2.2 วงจรความถี่ 5 กิโลเฮิร์ต



รูปที่ 4.25 วงจรพัลส์เอาต์พุต 5 กิโลเฮิร์ต

ประกอบด้วย

1. หม้อแปลงแรงดันขนาดเล็ก 220/15 โวลต์ แปลงแรงดันลงแล้วนำไปผ่าน Bridge rectifier แปลง AC เป็น DC เพื่อเป็นไฟเลี้ยง IC
2. ต่อ R และ C ที่มีค่าดังรูปเข้าตามขาของ IC ดังรูป จะได้ เอาต์พุตออกมา 5 กิโลเฮิร์ต
3. เมื่อสร้างพัลส์ความถี่นำไป And กับพัลส์ของเอาต์พุตจาก TCA785 (14,15) จะเกิดเป็นพัลส์ซอยย่อยๆ ในสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่ได้จากขา 14 และ 15

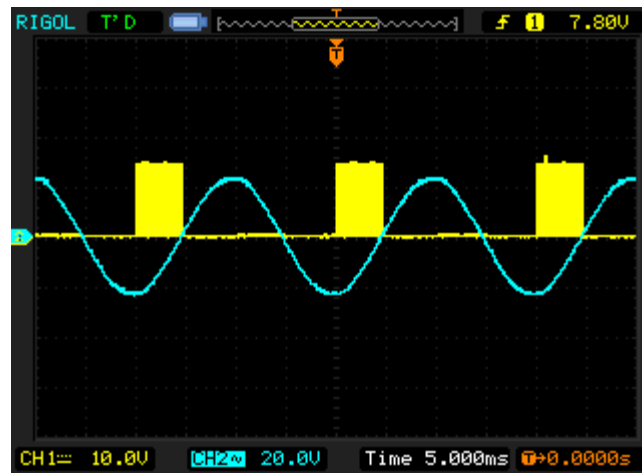


รูปที่ 4.26 สัญญาณพัลส์ 5 กิโลเฮิร์ต

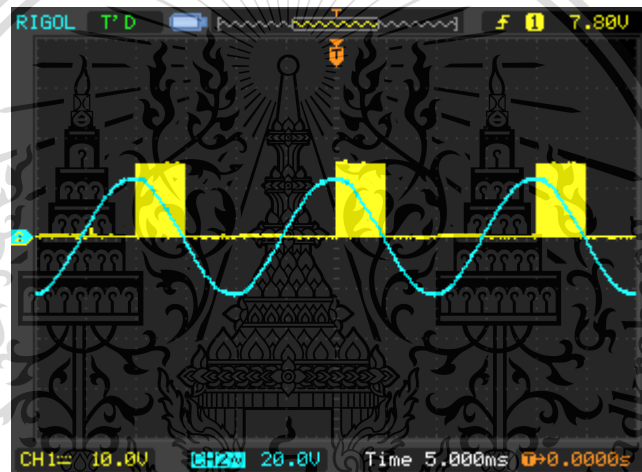
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.27 สัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนฟุ้งลบ ขา14 หลังแอนด์กับพัลส์ 5 กิโลเฮิร์ต



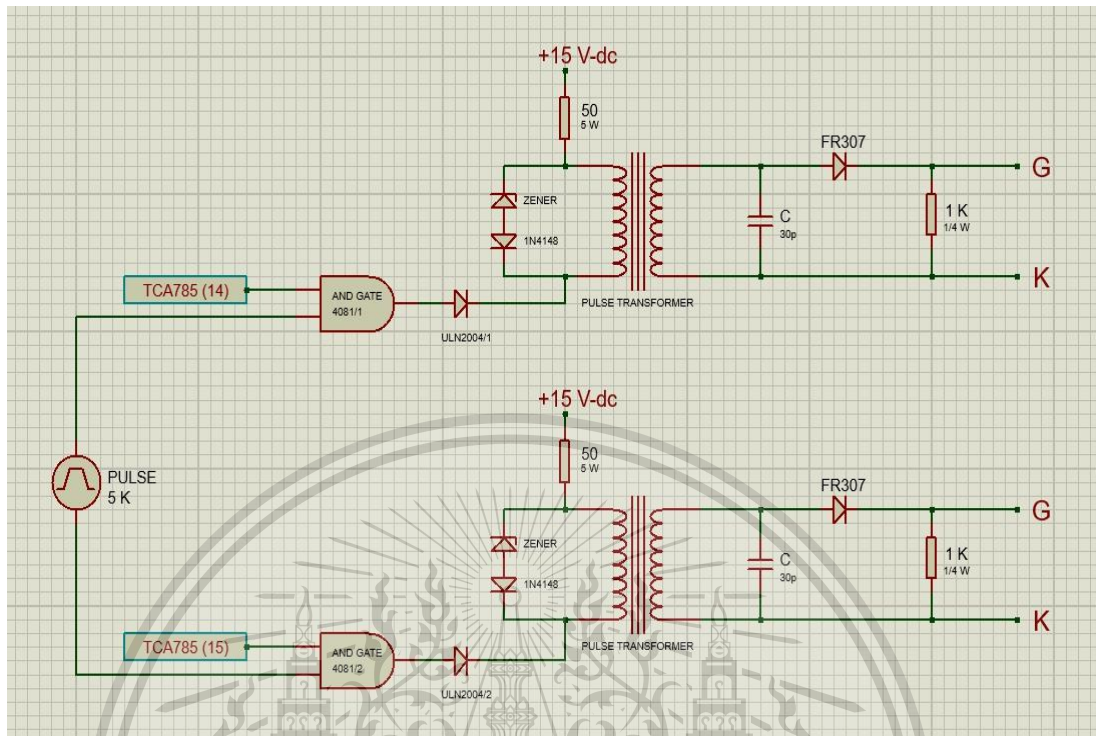
รูปที่ 4.28 สัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนฟุ้งบวก ขา15 หลังแอนด์กับพัลส์ 5 กิโลเฮิร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.5.2.3 วงจรขับ SCR



รูปที่ 4.29 วงจรขับขา G,K ของ SCR

ประกอบด้วย

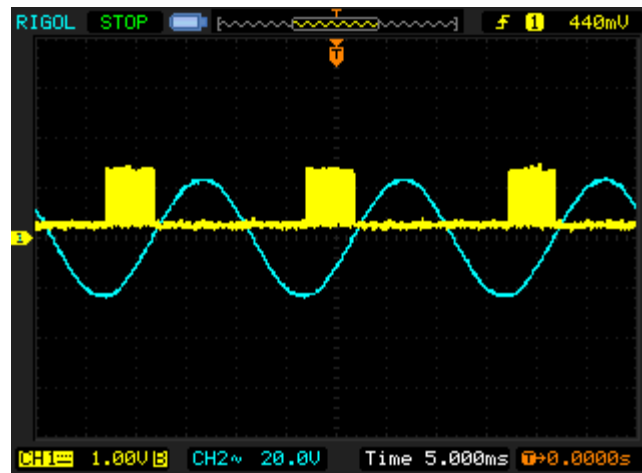
1. หม้อแปลงแรงดันขนาดเล็ก 220/15 โวลต์ แปลงแรงดันลงแล้วนำไปผ่าน Bridge rectifier แปลง AC เป็น DC เพื่อจ่ายไปยังหม้อแปลง Pulse Transformer
2. นำพัลส์ 5 กิโลเฮิรท์ ที่ And กับเอาต์พุตของ TCA785 (14,15) ไปผ่านหม้อแปลง Pulse Transformer
3. นำเอาต์พุต G และ K ไปขับ SCR ให้ทำงานที่ฝั่งบวกหรือฝั่งลบตามขา TCA785

หมายเหตุ Pulse Transformer มีหน้าที่ส่งพัลส์ที่มีเวลาตกและเวลาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อมกับแอมพลิจูดคงที่ พัลส์เหล่านี้มักเรียกกันว่าพัลส์ไฟฟ้าแบบสี่เหลี่ยม เพื่อลดปริมาณความถี่ของรูปร่าง พัลส์หม้อแปลงพัลส์จะต้องมีความอดทนต่ำมากสำหรับการกระจายความจุและการเหนี่ยวนำการรั่วไหล

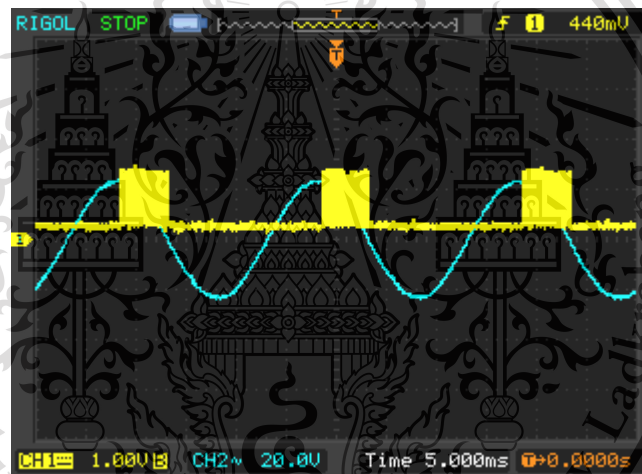
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.30 สัญญาณขั้วขา G,K ของ SCR ฝั่งลบ



รูปที่ 4.31 สัญญาณขั้วขา G,K ของ SCR ฝั่งบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

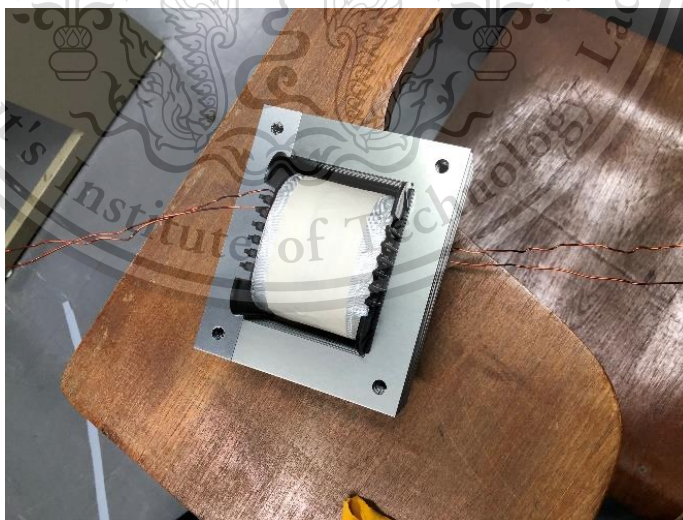
บทที่ 5

การศึกษาคุณลักษณะรูปคลื่นสัญญาณกระแสอินรีชในหม้อแปลงไฟฟ้า

5.1 บทนำ

เนื่องจากงานวิจัยนี้ศึกษากระแสอินรีชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาพฤติกรรมความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุแม่เหล็กซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งจะส่งผลกระทบต่อขนาดและลักษณะการเกิดของกระแสอินรีชในหม้อแปลงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาและความเสียหายในระบบไฟฟ้าทำให้ระบบป้องกันในระบบไฟฟ้าอาจเกิดความผิดพลาดได้ตั้งนั้นจึงได้ทำการออกแบบการทดสอบเพื่อประเมินและวิเคราะห์คุณลักษณะของแกนเหล็กที่ใช้สร้างหม้อแปลงเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้ได้ซึ่ง B-H curve ซึ่งจะทำให้ทราบถึง ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่จุดสำคัญ 3 จุดคือจุดที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเป็นเชิงเส้น (Liner Point), จุดที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กช่วงหัวเข่า (Knee Point) และจุดที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturated Point) เพื่อนำค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กทั้ง 3 จุดนี้มาหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่จะใช้ในการทดสอบกระแสอินรีชในหม้อแปลงโดยการทดสอบเพื่อวิเคราะห์กระแสอินรีชในหม้อแปลงนั้นจะมีวงจรควบคุมมุมแรงดันหรือชุดทดสอบที่ผู้ทดลองออกแบบและกล่าวไว้ในบทก่อนหน้ามาเพื่อปรับมุมแรงดันที่จะเกิดขึ้นในการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่วงจรทดสอบโดยเกิดมุมต่างๆเมื่อจ่ายแรงดันสู่หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสหลังจากนั้นบันทึกค่ากระแสอินรีชที่ตำแหน่งแรงดันต่างๆ

5.2 รายละเอียดและโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

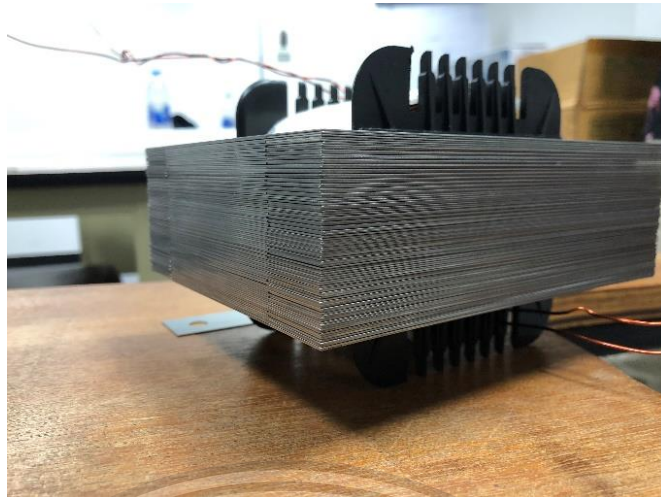


รูปที่ 5.1 หม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.2 หม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ (ความหนา)

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบมีพิกัด 1164 VA, 220/220V, 50Hz, 2.7A โดยเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ามีลักษณะจำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิเท่ากับทุติยภูมิ เพื่อให้ได้คุณลักษณะดังที่กล่าวในบทก่อนหน้าซึ่งเป็นหม้อแปลงที่เราจะนำมาทดสอบเปิดวงจร (Open circuit) เพื่อหา B-H curve

5.3 การทดสอบเปิดวงจร (Open circuit)

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาค่ากระแสที่ไหลเข้าสู่ขดลวดปฐมภูมิ (Input voltage) และแรงดันตกคร่อมขดลวดทุติยภูมิ (Output voltage) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและค่าความเข้มสนามแม่เหล็กดังสมการ

$$V = 4.44 f N B A F_s \quad (5.1)$$

และ

$$NI = Hl \quad (5.2)$$

เมื่อ N เป็น จำนวนรอบของขดลวด

I เป็น ค่ากระแสไฟฟ้าในขดลวด, A

H เป็น ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก, A/m

l เป็น ค่าความยาวของขดลวด, m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

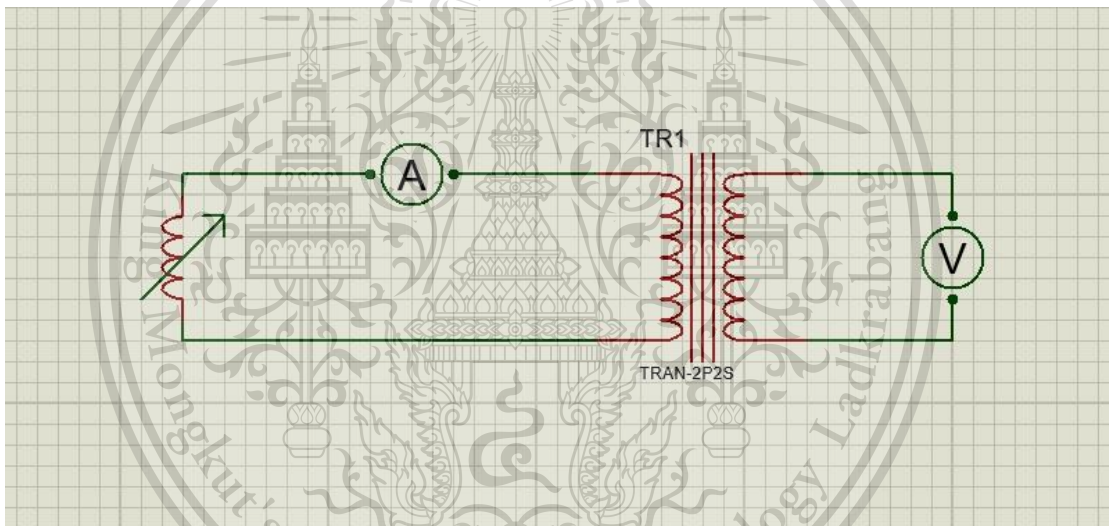
5.3.1 การทดสอบคุณลักษณะแกนเหล็กในหม้อแปลงทดสอบ

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อดวงจรถอดลองตามรูปที่ 5.3 โดยให้ขดลวดฝั่งใดก็ได้เป็นขดลวดปฐมภูมิและเปิดวงจรด้านขดลวดทุติยภูมิ โดยที่ต่อโวลต์มิเตอร์ขนานกับขดลวดด้านทุติยภูมิ และแอมมิเตอร์อนุกรมกับขดลวดด้านปฐมภูมิ

2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดปฐมภูมิจนค่ากระแสถึงค่าพิกัดที่ขดลวดทนได้ บันทึกผลการทดลองตามค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด

3. นำค่าที่ได้มาคำนวณและสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก และ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับกำลังทางไฟฟ้าต่อน้ำหนักหม้อแปลง



รูปที่ 5.3 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า (Open circuit test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบคุณลักษณะแกนเหล็กในหม้อแปลงทดสอบ

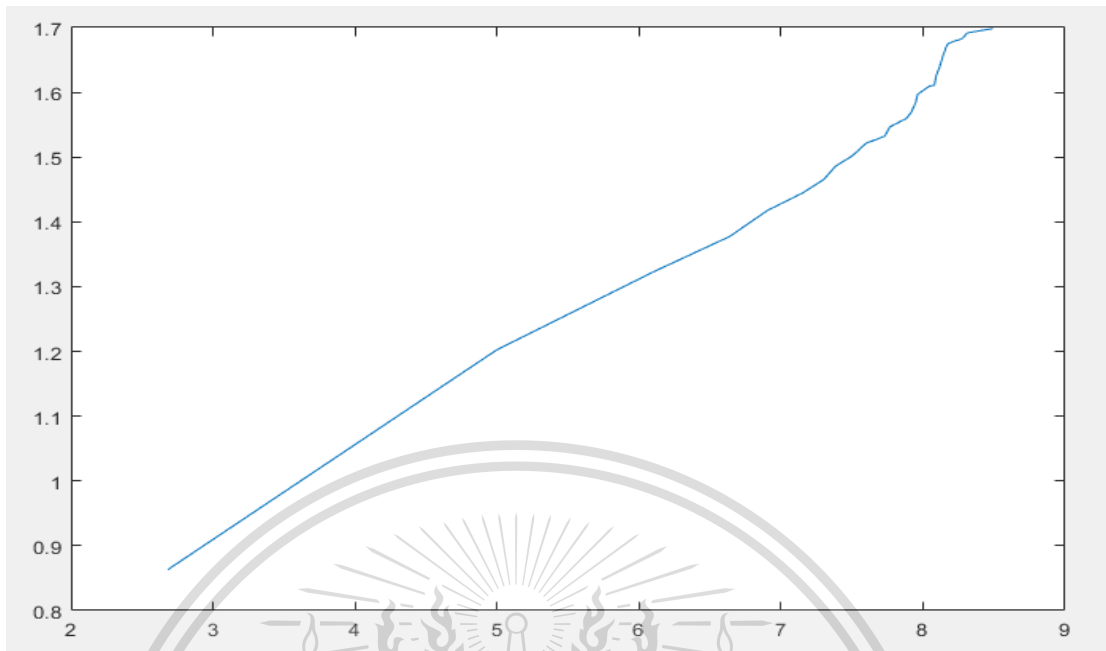
V (V)	I (A)	P (W)	B (Wb/m ²)	H A/m	P/m (W/kg)
219.7	0.101	16.20	0.863	86.72	2.682
306.1	0.200	30.20	1.203	171.73	5.000
336.9	0.304	36.90	1.324	261.03	6.109
350.6	0.400	40.10	1.378	343.46	6.639
360.8	0.505	41.70	1.418	433.61	6.904
367.7	0.605	43.20	1.445	519.48	7.152
373.0	0.701	44.10	1.466	601.91	7.301
378.2	0.807	44.60	1.486	692.92	7.384
382.2	0.902	45.30	1.502	774.50	7.500
387.2	1.010	45.90	1.521	867.23	7.599
390.0	1.100	46.70	1.532	944.51	7.732
393.6	1.208	46.90	1.546	1037.24	7.765
396.9	1.303	47.60	1.559	1118.81	7.881
399.1	1.403	47.80	1.568	1204.68	7.914
402.9	1.504	48.00	1.583	1291.40	7.947
406.5	1.612	48.10	1.597	1384.13	7.964
409.7	1.715	48.60	1.610	1472.57	8.046
410.0	1.809	48.80	1.611	1553.28	8.079
414.4	1.902	48.90	1.628	1633.14	8.096
416.5	2.000	49.00	1.636	1717.29	8.113
419.5	2.130	49.10	1.648	1828.91	8.129
422.3	2.240	49.20	1.659	1923.36	8.146
425.0	2.350	49.30	1.670	2017.81	8.162
426.5	2.420	49.40	1.676	2077.92	8.179
428.4	2.510	50.00	1.683	2155.19	8.278
430.6	2.610	50.20	1.692	2241.06	8.311
432.3	2.700	51.30	1.699	2318.34	8.493

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

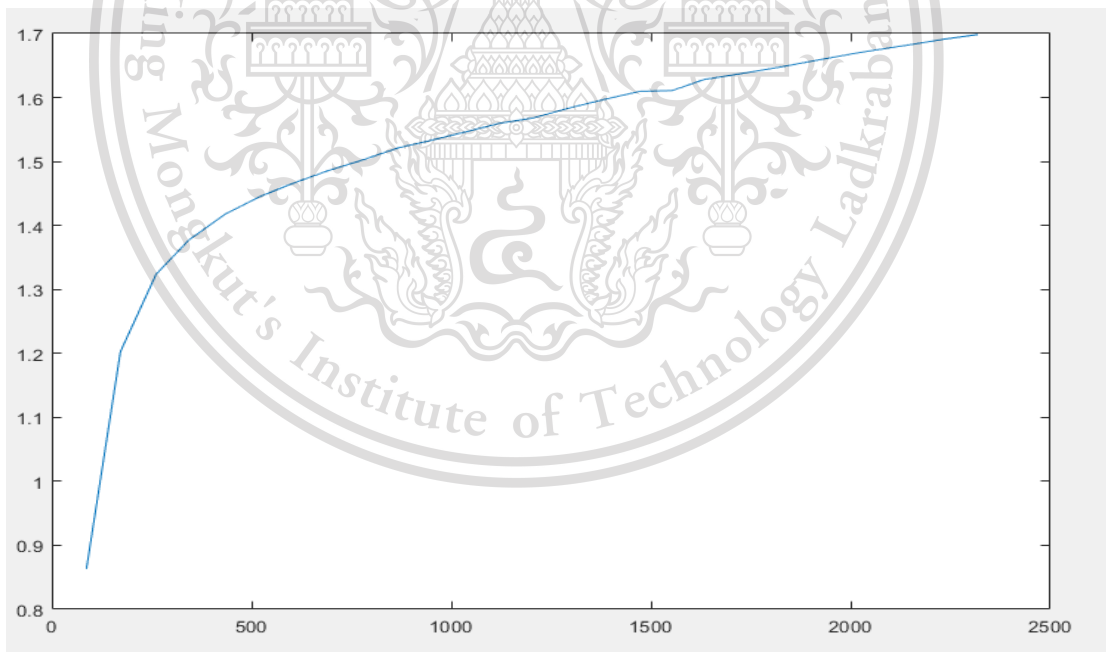
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค่าที่ได้จากการคำนวณและการทดลองสามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ใน 2 ลักษณะดังนี้



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับกำลังทางไฟฟ้าต่อน้ำหนักหม้อแปลง



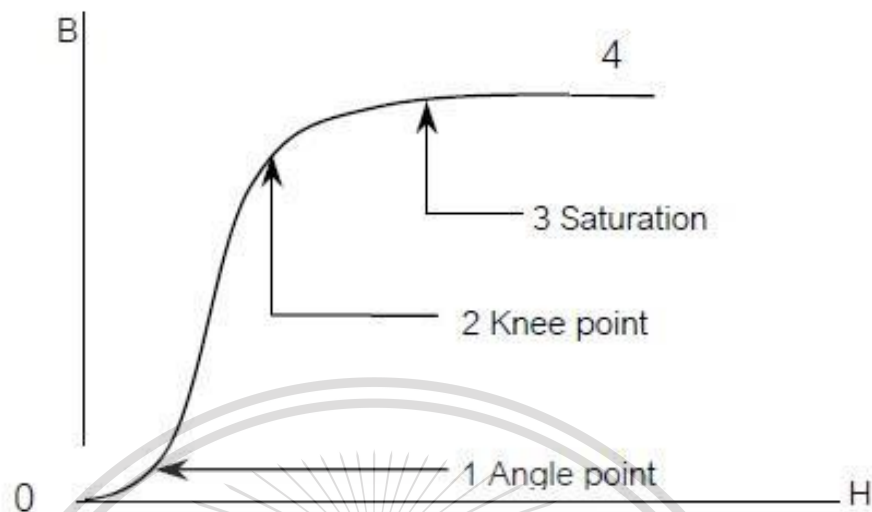
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.3.2 การหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่สำคัญ 3 จุด



รูปที่ 5.4 Magnetizing Curve

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่อ Flux Density สูงขึ้นจะต้องใช้กระแสมากขึ้นในการสร้าง Flux และเมื่อเลยจากจุด Knee Point กระแสจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วโดยที่ Flux เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือเรียกว่าโลหะมีสภาพอิ่มตัว (Saturation)

จาก Curve แสดงถึง Oriented Electrical Steel ซึ่งความสัมพันธ์แบ่งได้เป็น 4 ช่วง

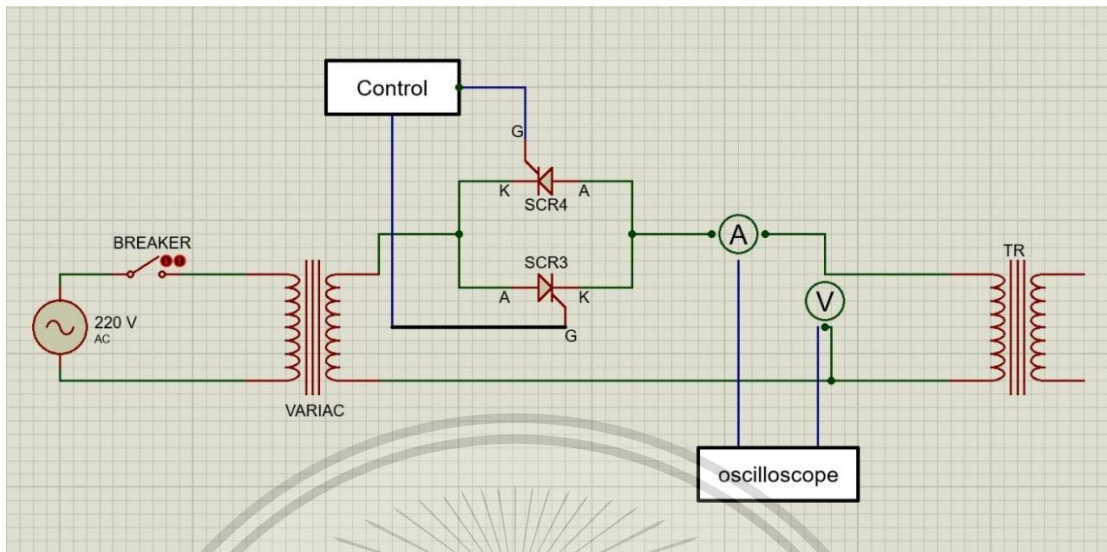
- ช่วงที่ 0-1 เป็นช่วงแรก Origin ตอนเริ่มต้นของ Curve จนถึงจุดที่ 1 เรียกว่า Angle point ความสัมพันธ์ระหว่าง B-H ไม่ Linear ช่วงนี้ Flux และ Exciting Current ยังต่ำมาก
- ช่วงที่ 1-2 หลังจากจุดที่ 1 จนถึงจุดที่ 2 เป็นช่วงที่มีความสัมพันธ์เป็น Linear จึงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่อความเข้มสนามแม่เหล็กค่อนข้างคงที่
- จุดที่ 2 เป็นจุดที่อยู่หลังช่วงที่ 1-2 เรียกว่า Knee Point ช่วงนี้ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นโดยนิยามของจุดนี้นั้นคือ Flux Density เพิ่มขึ้น 10% ขณะที่กระแสเพิ่มขึ้น 50%
- ช่วง 2-3 หลังจากจุดที่ 2 จนถึงจุดที่ 3 เรียกจุดนี้ว่าจุดอิ่มตัว Saturation ช่วงนี้ Flux Density เปลี่ยนเพิ่มขึ้นน้อยมากแต่ต้องการกระแสเพิ่ม
- ช่วงหลังจากช่วงอิ่มตัว Saturation ไปแล้ว ช่วงนี้ Flux Density แทบไม่เปลี่ยนแต่ต้องการกระแสเพิ่มเรียกจุดนี้ว่า Saturated Point

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.4 วงจรทดสอบและการใช้ Oscilloscope เพื่อศึกษาขนาดและลักษณะสัญญาณกระแสอินรัช



รูปที่ 5.5 วงจรทดสอบกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการทดลองจะแบ่งเป็น 2 กรณีคือ

1. การทดลองเพื่อพิสูจน์การปรับมุมแรงดันด้วยวงจรที่ถูกออกแบบโดยผู้ทดลอง
2. การทดลองเพื่อวัดสัญญาณกระแสอินรัชในหม้อแปลง

โดยในกรณีที่ 2 นั้น จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ แล้วเปิดวงจรด้านทุติยภูมิ จากนั้นใช้ออสซิลโลสโคปตรวจจึรูปคลื่นสัญญาณและบันทึกลักษณะการเกิดและขนาดของกระแสอินรัชในหม้อแปลงโดยจะเปลี่ยนค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการปรับแรงดันไฟฟ้า 3 ค่าและเปลี่ยนมุมแรงดัน 4 มุมโดยใช้ SCR 2 ตัวในการควบคุมมุมเมื่อจ่ายแรงดันในระบบและนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับทฤษฎีบท จากนั้นทำการวิเคราะห์หามุมแรงดันไฟฟ้าและเปรียบเทียบกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ค่าต่างๆโดยหม้อแปลงมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเป็นไปตามกราฟ B-H curve ของแกนเหล็ก

กำหนดให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่จุดพิจารณา 3 ค่าคือ

- ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่จุด Linear point : $B = 1.1 \text{ T}$
- ซึ่งมีค่าแรงดัน $V = 35 \text{ V}$
- ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่จุด Knee point : $B = 1.4 \text{ T}$
- ซึ่งมีค่าแรงดัน $V = 45 \text{ V}$
- ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่จุด Saturated point : $B = 1.7 \text{ T}$
- ซึ่งมีค่าแรงดัน $V = 54 \text{ V}$

หมายเหตุ- หม้อแปลงที่ออกแบบมานั้นต้องจ่ายแรงดันในค่าสูงมากเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กทั้ง 3 จุด จึงทำการลดพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กลง 8 เท่า ซึ่งค่าแรงดันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.1

ไม่ว่ากรณีใดก็ตามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.5 ขั้นตอนการทดลอง

ทดลองการปรับมุมแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรควบคุมโดยเชื่อมต่อวงจรทั้งหมดเข้าด้วยกัน ได้แก่

- วงจรถวลคุม - เพื่อเป็นคำสั่งควบคุม SCR ทั้ง 2 ตัว
- วงจรถวลิ่ง - เพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบสัญญาณกระแสอินรัชหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส

ปรับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไปที่ 1.1T, 1.4T, 1.7T ซึ่งสามารถคำนวณออกมาเป็นแรงดันที่ค่า 35V, 45V, 54V เริ่มจากการป้อนค่ามุมของแรงดันตั้งแต่ 0, 45, 90, 135 องศาต่อเครื่องมือวัดตามรูปที่ 5.6 บันทึกสัญญาณแรงดันและกระแสที่ได้ด้วย Oscilloscope จากนั้นบันทึกค่าสัญญาณที่ได้ในรูปแบบ Bitmap (รูปภาพ) และรายงานผลการทดลอง

วิธีการเซฟไฟล์ข้อมูลจาก Oscilloscope

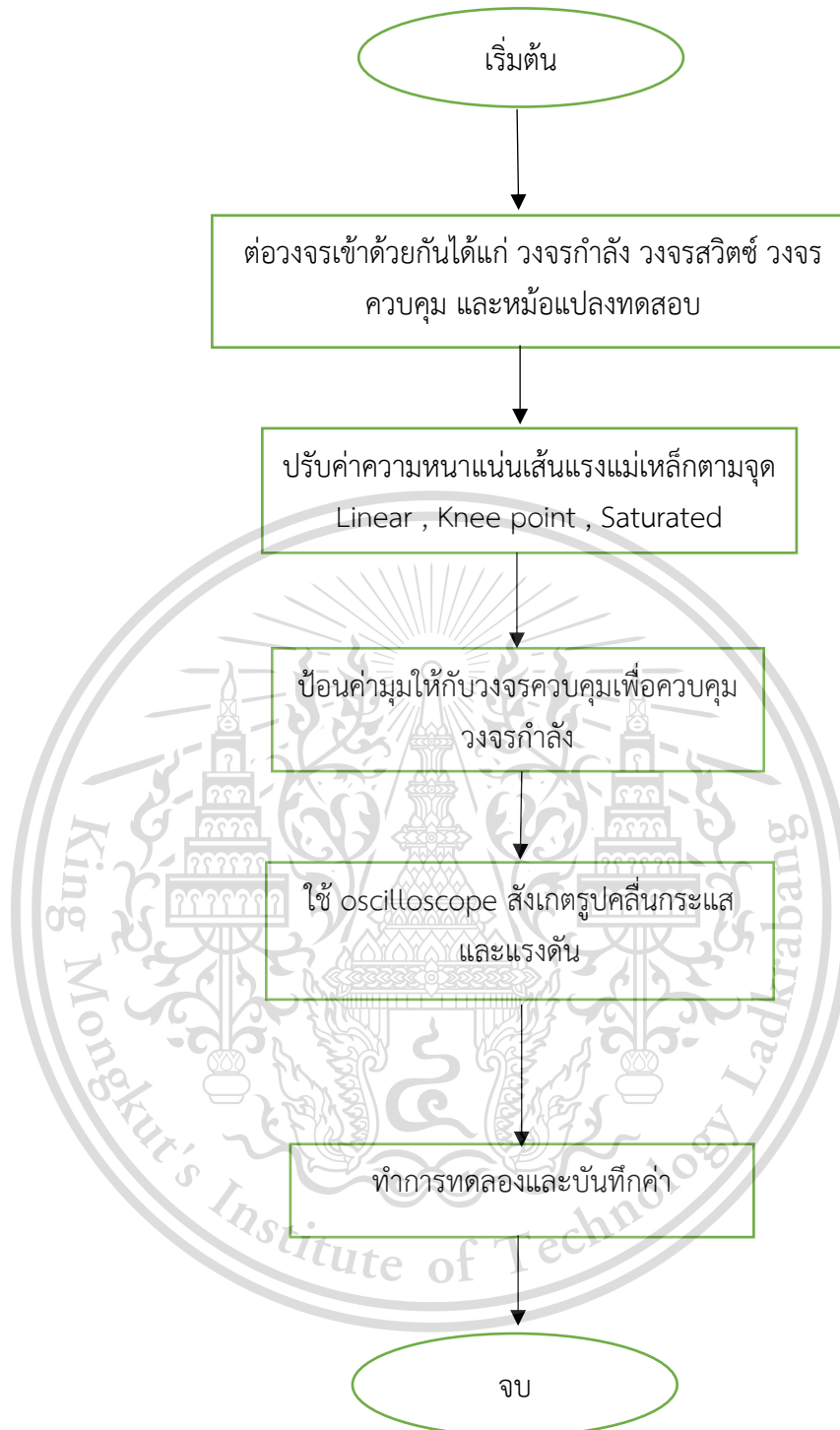
- ต่อแพลตฟอร์มแล้วกดปุ่ม Storage เลือกไฟล์รูปแบบที่ต้องการเปลี่ยนจาก Display เป็น Maximum (เก็บข้อมูลที่ละเอียดที่สุด)ถ้ามีแล้วเลือก External แล้วตั้งชื่อไฟล์แล้วกด Save



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.6 แผนภาพขั้นตอนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.6 ผลการทดลอง

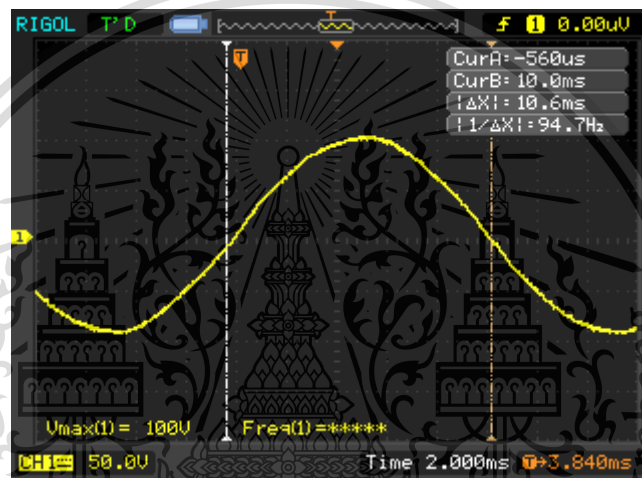
ในส่วนของบทนี้นั้นถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

1. การทดลองเพื่อทดสอบการปรับมุมแรงดันไฟฟ้า
2. การทดลองเพื่อตรวจวัดสัญญาณกระแสอินรัชในหม้อแปลง

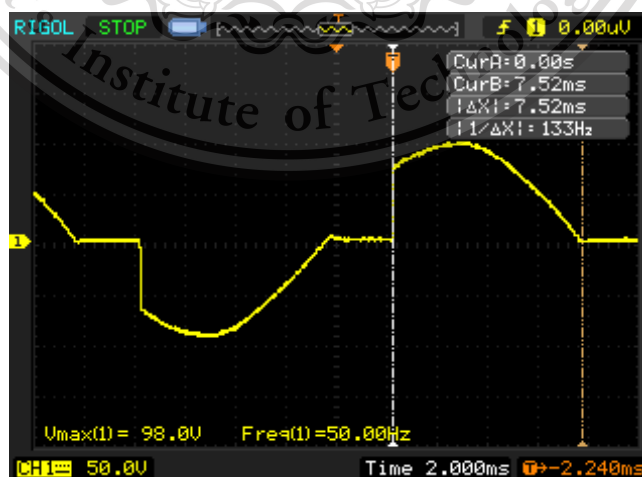
5.6.1 การทดลองที่ 1 ทดสอบความสามารถของวงจรควบคุมมุมแรงดัน

– ทำการทดสอบความสามารถของวงจรควบคุมมุมแรงดันเพื่อให้มั่นใจว่าจะสามารถจ่ายแรงดันที่มุม 0, 45, 90, 135, 180 ตามที่ต้องการได้

โดยการต่อวงจรตามรูปที่ 5.7 ต่อภาระทางไฟฟ้าด้วยหลอดไฟเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุม ปรับมุมแรงดันค่าต่างๆ บันทึกผลการทดลองในรูปแบบไฟล์ Bitmap



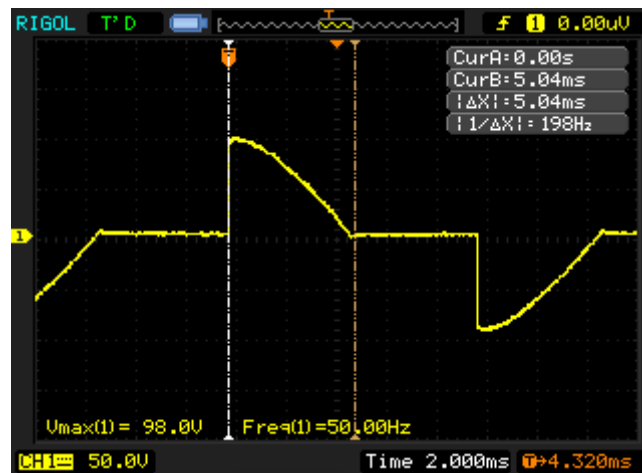
รูปที่ 5.7 สัญญาณแรงดันเมื่อจ่ายไฟฟ้าสู่วงจรกำลัง โดยควบคุมมุมแรงดันที่ 0 องศา



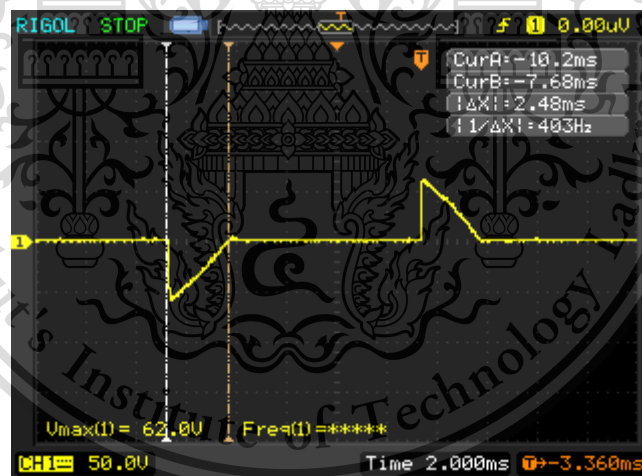
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 5.8 สัญญาณแรงดันเมื่อจ่ายไฟฟ้าสู่วงจรกำลัง โดยควบคุมใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.9 สัญญาณแรงดันเมื่อจ่ายไฟฟ้าสู่วงจรกำลัง โดยควบคุม มุมแรงดันที่ 90 องศา

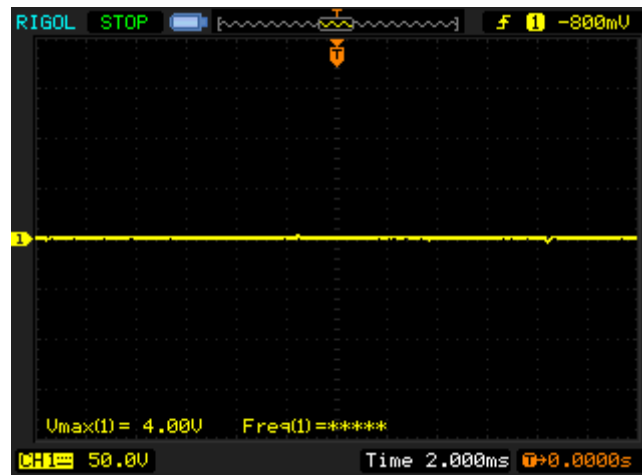


รูปที่ 5.10 สัญญาณแรงดันเมื่อจ่ายไฟฟ้าสู่วงจรกำลัง โดยควบคุม มุมแรงดันที่ 135 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.11 สัญญาณแรงดันเมื่อจ่ายไฟฟ้าสู่วงจรกำลัง โดยควบคุม มุมแรงดันที่ 180 องศา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

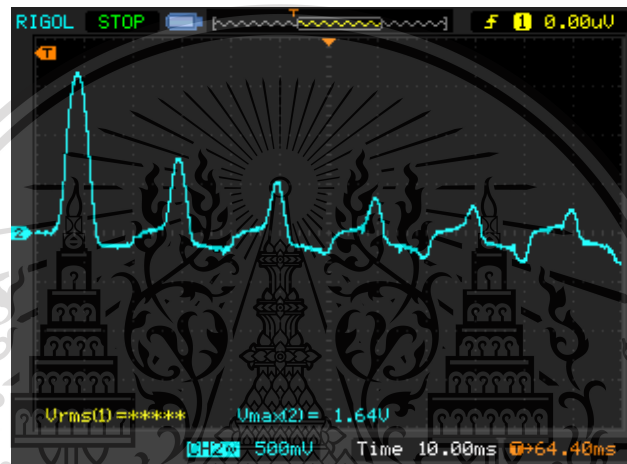
5.6.2 การทดลองที่ 2 ตรวจจับสัญญาณกระแสอินรัชในหม้อแปลง

- การทดลองเพื่อตรวจจับสัญญาณกระแสอินรัชในหม้อแปลงที่แรงดันค่า 35V, 45V, 54V โดยแต่ละค่าจะมีการทดสอบที่มุม 0, 45, 90, 135 องศา

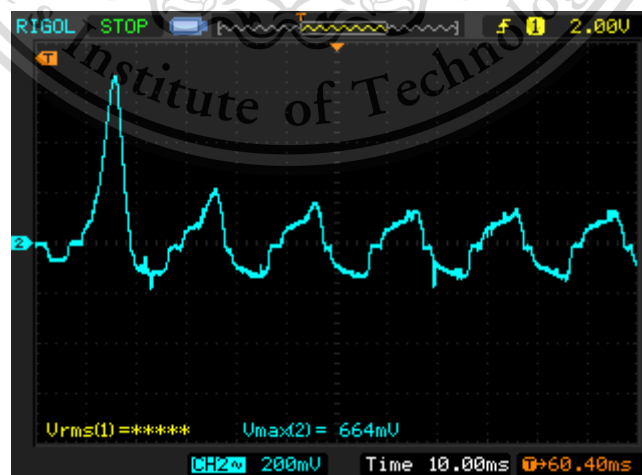
หมายเหตุ - เนื่องจากที่มุม 180 องศาไม่มีเนื้อแรงดันอยู่หรืออาจเรียกได้ว่าไม่มีการจ่ายแรงดันสู่ระบบจึงไม่สามารถทดสอบได้

โดยทำการต่อวงจรตามรูปที่ 5.7 เริ่มต้นจ่ายแรงดันที่ค่าน้อยไปมากในแต่ละค่าปรับมุมค่าต่างๆแล้วบันทึกผลเป็นไฟล์ Bitmap

- 1.บันทึกสัญญาณกระแส
- 2.บันทึกสัญญาณกระแสและแรงดัน



รูปที่ 5.12 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.1T$ และปรับมุมแรงดันที่ 0 องศา

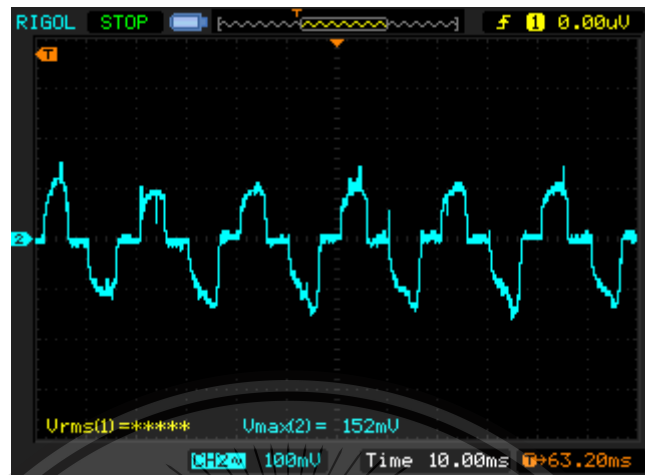


รูปที่ 5.13 สัญญาณกระแสอินรัชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.1T$ และปรับมุมแรงดันที่ 45 องศา

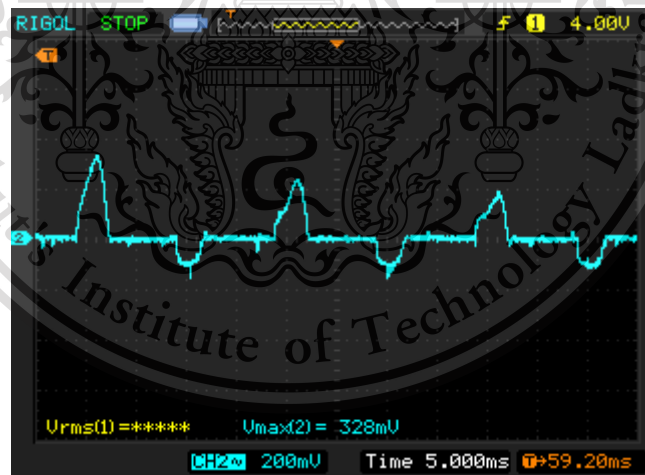
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงบนสื่อ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.14 สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.1T$ และปรับมุมแรงดันที่ 90 องศา

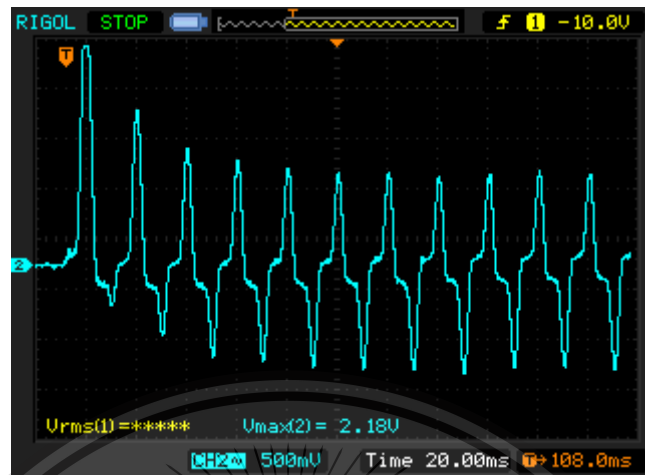


รูปที่ 5.15 สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.1T$ และปรับมุมแรงดันที่ 135 องศา

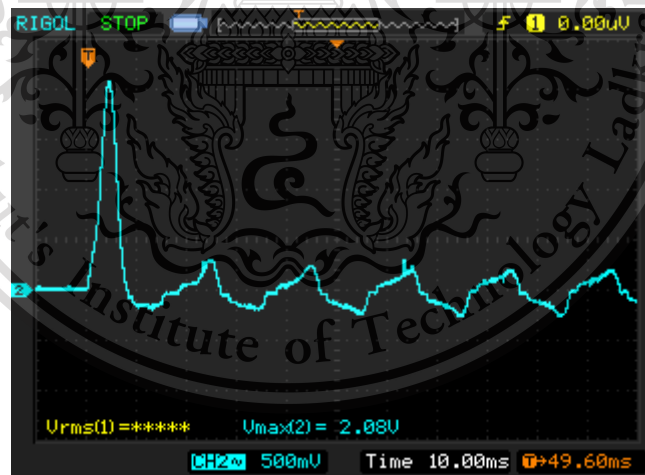
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.16 สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.4T$ และปรับมุมแรงดันที่ 0 องศา

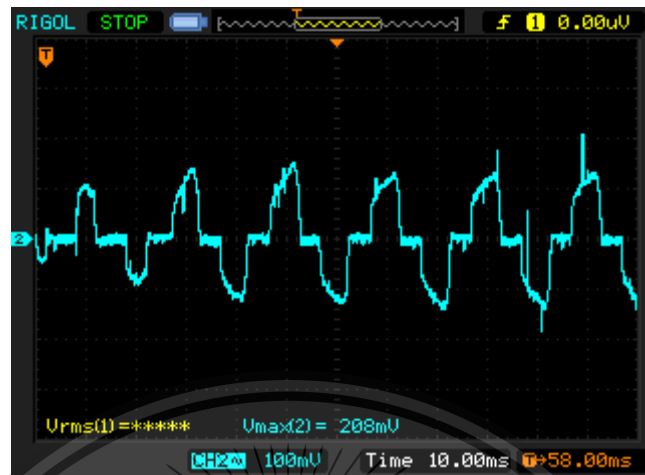


รูปที่ 5.17 สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.4T$ และปรับมุมแรงดันที่ 45 องศา

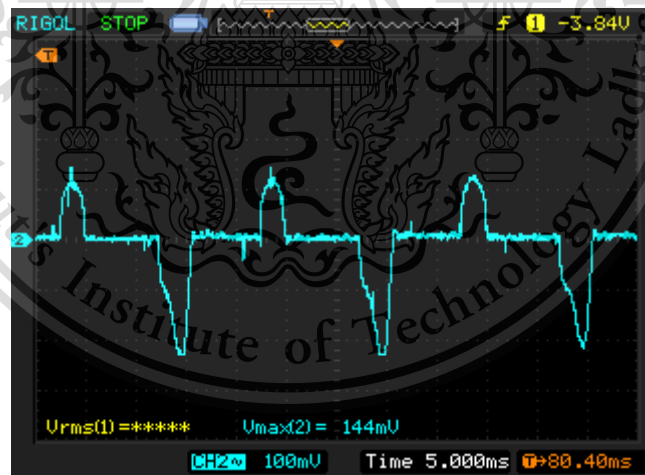
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.18 สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.4T$ และปรับมุมแรงดันที่ 90 องศา

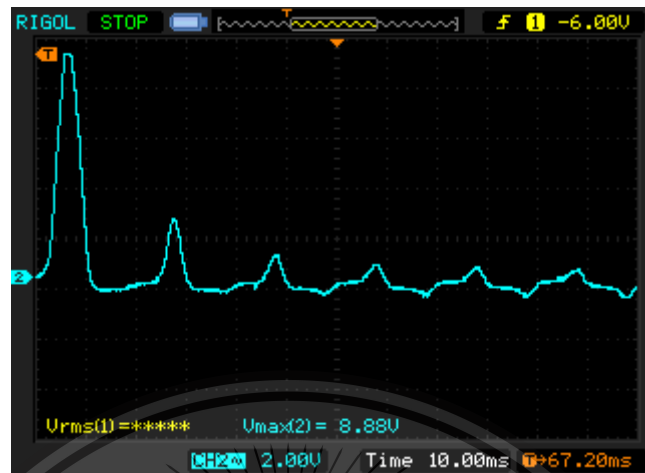


รูปที่ 5.19 สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.4T$ และปรับมุมแรงดันที่ 135 องศา

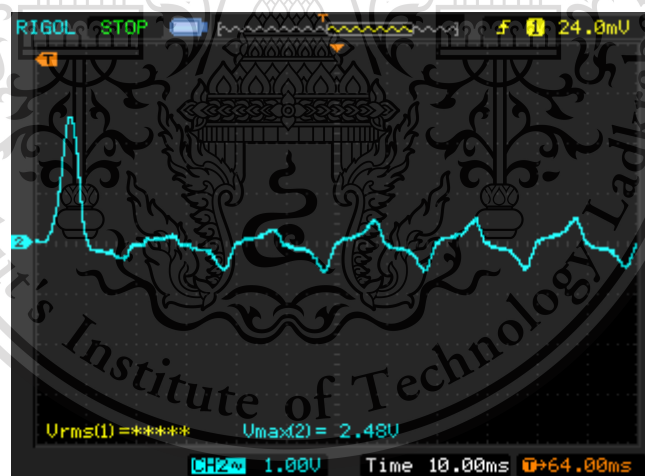
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.20 สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.7T$ และปรับมุมแรงดันที่ 0 องศา

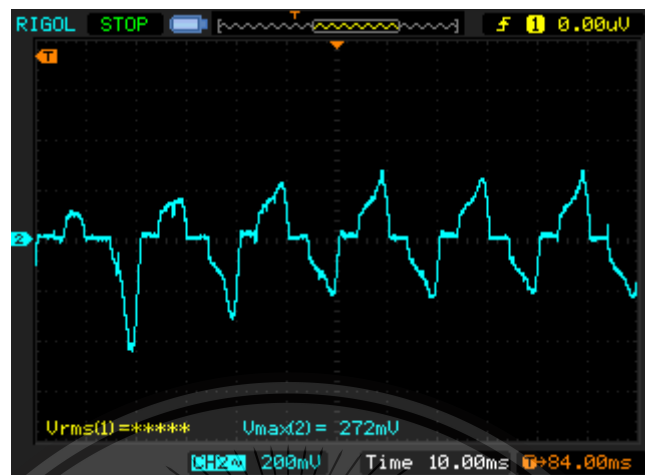


รูปที่ 5.21 สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.7T$ และปรับมุมแรงดันที่ 45 องศา

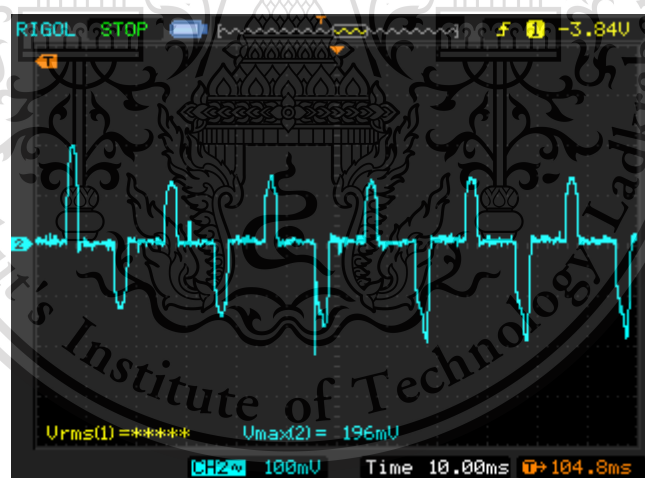
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.22 สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.7T$ และปรับมุมแรงดันที่ 90 องศา

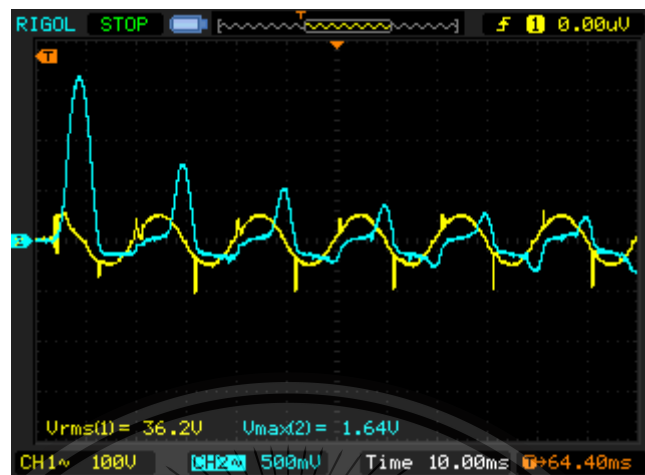


รูปที่ 5.23 สัญญาณกระแสอินรีชเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.7T$ และปรับมุมแรงดันที่ 135 องศา

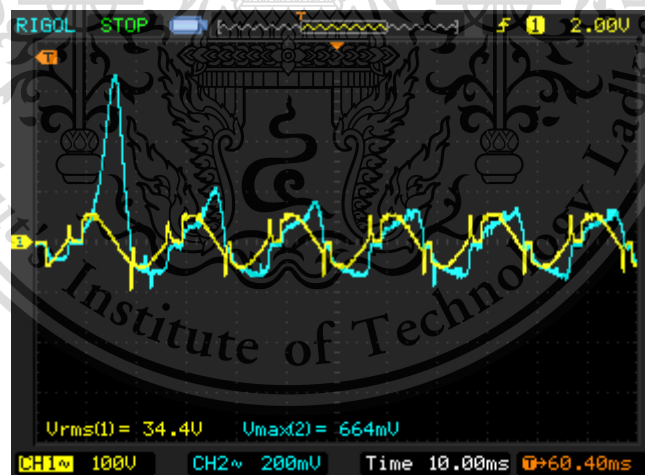
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.24 สัญญาณกระแสอินรีชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.1T$ และปรับมุมแรงดันที่ 0 องศา

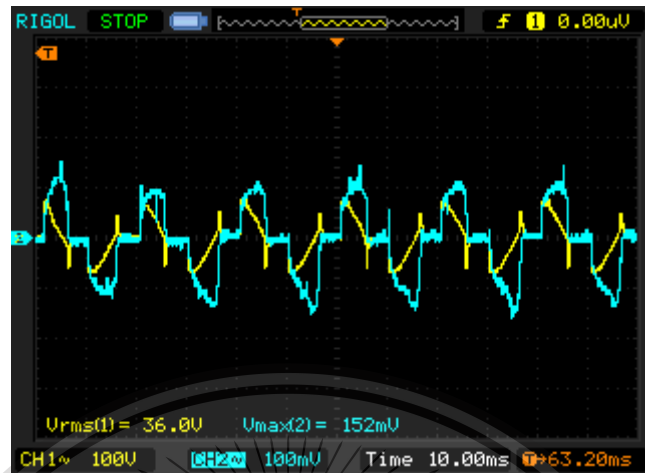


รูปที่ 5.25 สัญญาณกระแสอินรีชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.1T$ และปรับมุมแรงดันที่ 45 องศา

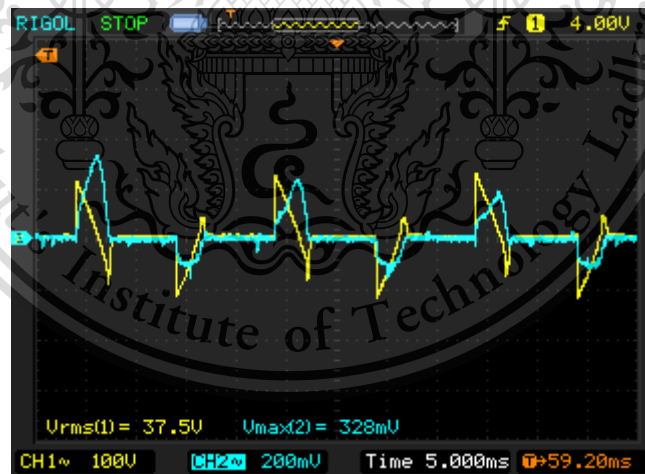
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.26 สัญญาณกระแสอินรีชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.1T$ และปรับมุมแรงดันที่ 90 องศา

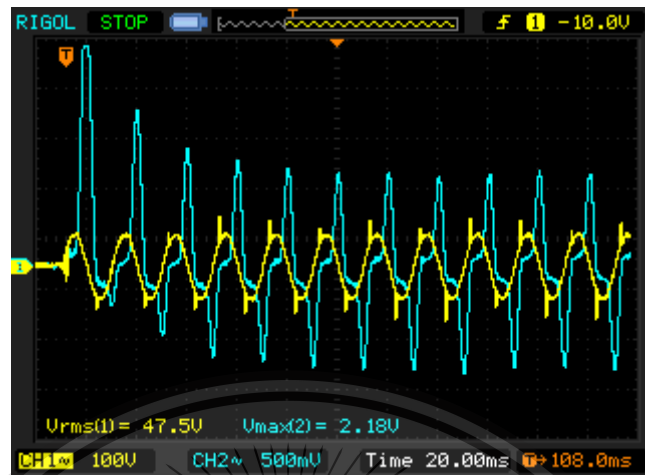


รูปที่ 5.27 สัญญาณกระแสอินรีชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.1T$ และปรับมุมแรงดันที่ 135 องศา

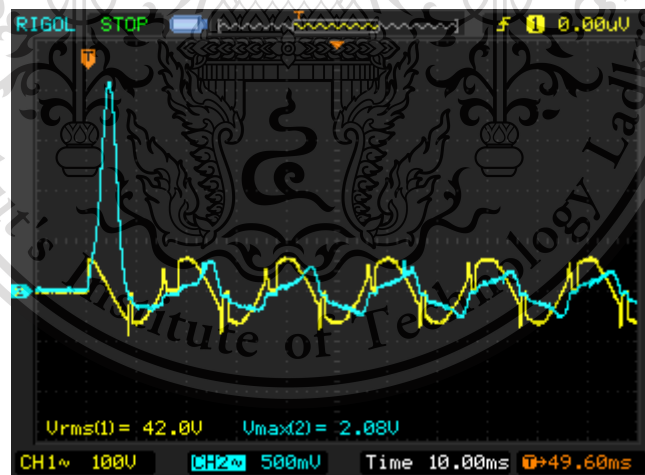
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.28 สัญญาณกระแสอินรีชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.4T$ และปรับมุมแรงดันที่ 0 องศา

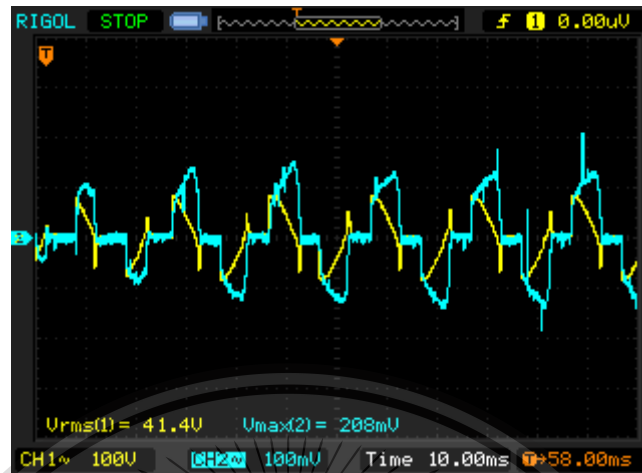


รูปที่ 5.29 สัญญาณกระแสอินรีชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.4T$ และปรับมุมแรงดันที่ 45 องศา

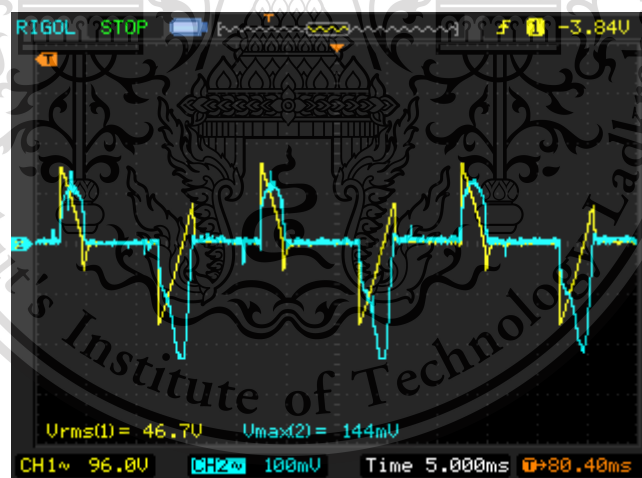
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.30 สัญญาณกระแสอินรีชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.4T$ และปรับมุมที่ 90 องศา

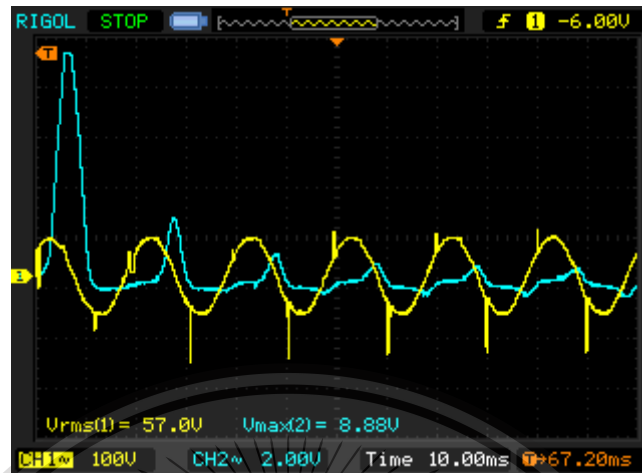


รูปที่ 5.31 สัญญาณกระแสอินรีชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.4T$ และปรับมุมแรงดันที่ 135 องศา

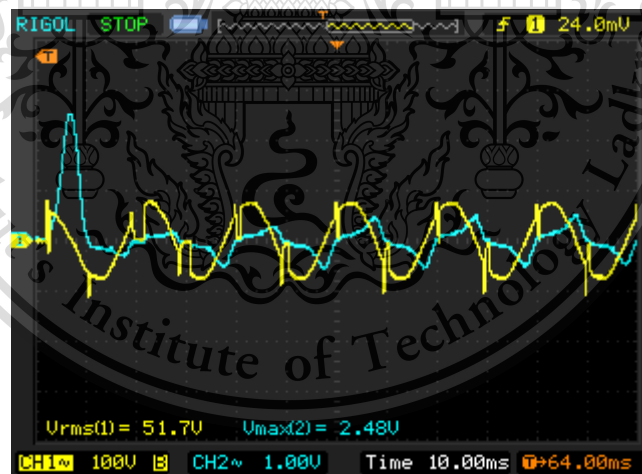
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.32 สัญญาณกระแสอินรีชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.7T$ และปรับมุมแรงดันที่ 0 องศา

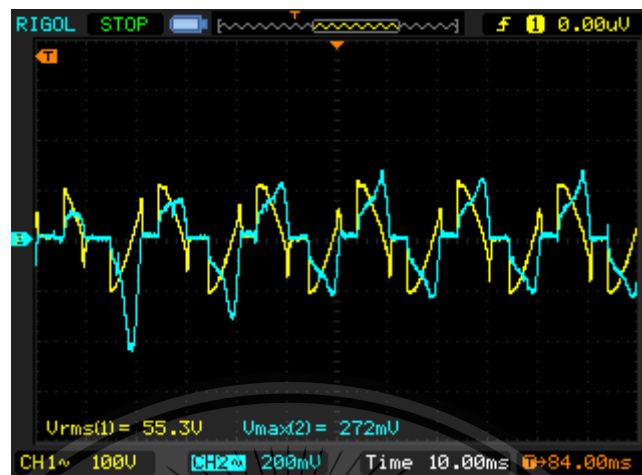


รูปที่ 5.33 สัญญาณกระแสอินรีชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.7T$ และปรับมุมแรงดันที่ 45 องศา

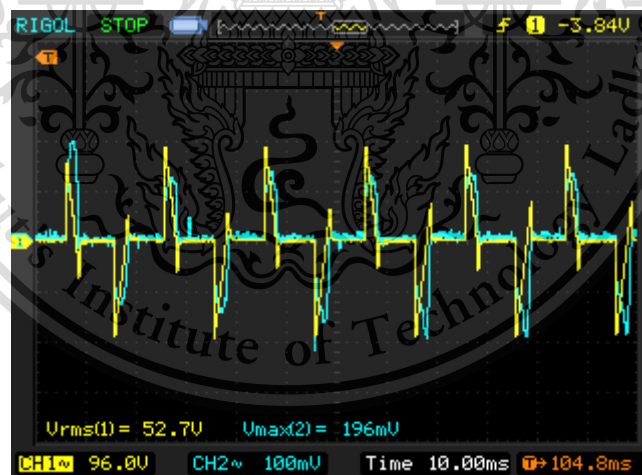
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.34 สัญญาณกระแสอินรีชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.7T$ และปรับมุมแรงดันที่ 90 องศา



รูปที่ 5.35 สัญญาณกระแสอินรีชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.7T$ และปรับมุมแรงดันที่ 135 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

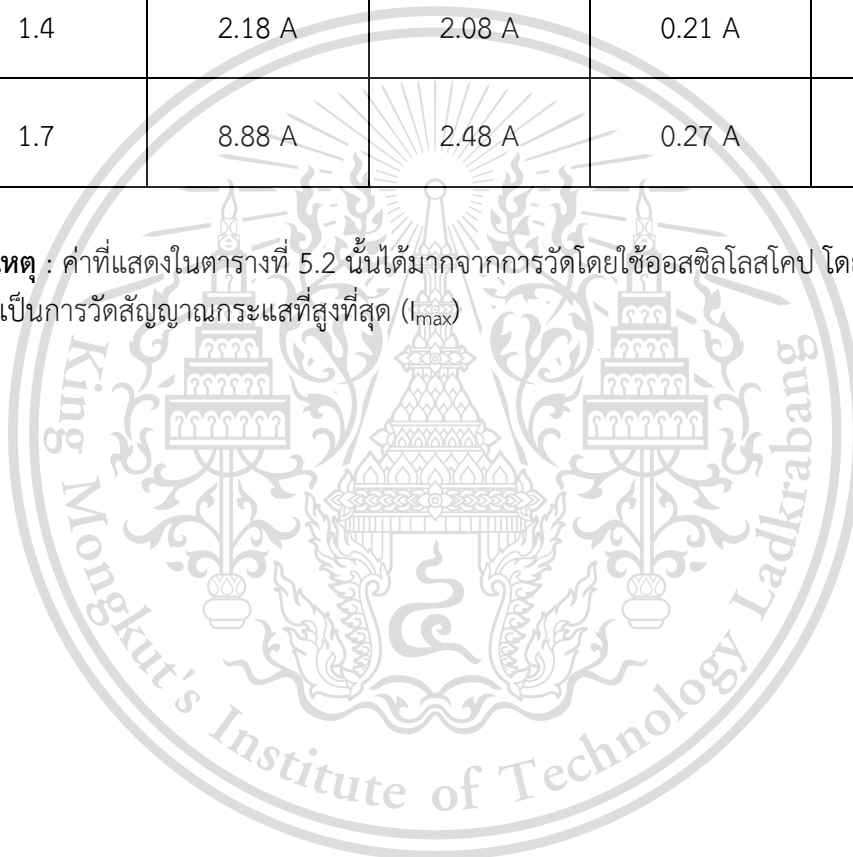
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 5.2 ค่ากระแสอินรัชที่มุมและค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กค่าต่างๆ

ค่า B (T)	ค่ามุมแรงดัน(องศา)			
	0 °	45 °	90 °	135 °
1.1	1.64 A	0.66 A	0.15 A	0.33 A
1.4	2.18 A	2.08 A	0.21 A	0.14 A
1.7	8.88 A	2.48 A	0.27 A	0.2 A

หมายเหตุ : ค่าที่แสดงในตารางที่ 5.2 นั้นได้มากจากการวัดโดยใช้ออสซิลโลสโคป โดยที่ชาแนลที่ 2 (สีฟ้า) เป็นการวัดสัญญาณกระแสที่สูงที่สุด (I_{max})



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองวิจารณ์และปัญหาที่เกิดในการทดลอง

6.1 บทนำ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับขนาดและลักษณะการเกิดกระแสอินรัช ขณะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งกระแสอินรัชนี้จะส่งผลให้ระบบป้องกันไฟฟ้าทำงานผิดพลาด เนื่องจากกระแสอินรัชมีลักษณะคล้ายกับฟอลต์จึงอาจมีขนาดกระแสอินรัชพุ่งสูงขึ้นในช่วงเริ่มจ่ายไฟฟ้า ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างมุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสกับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กค่าต่างๆว่ามีผลต่อลักษณะการเกิดและขนาดของสัญญาณกระแสอินรัชอย่างไร โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 การทดลอง ดังนี้

1. การทดลองใช้งานวงจรควบคุม SCR 2 ตัว เพื่อปรับมุมแรงดันให้ได้ค่ามุมต่างๆตามที่ต้องการ
2. การทดลองจ่ายแรงดันที่มุมต่างๆเพื่อศึกษาลักษณะการเกิดกระแสอินรัชที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่กำหนด

6.2 สรุปผลการทดลอง

กรณี 1 การทดลองใช้งานวงจรควบคุม (control) เพื่อ สั่งการที่ขา G และ K ของ SCR 2 ตัว เพื่อปรับมุมแรงดัน ที่ค่า 0, 45, 90, 135, 180 องศา ได้ผลออกมาแม่นยำโดยวงจรควบคุมนี้สามารถปรับมุมได้ละเอียดและแม่นยำในทุกค่าตั้งแต่ 0 – 180 องศาเช่นกัน

หมายเหตุ – ไม่มีมุมตั้งแต่ 180 – 360 องศาเนื่องจากวงจรที่ออกแบบมานั้นเป็นการควบคุมแบบ Half-Controlled Single-Phase Bridge Circuit ซึ่งจะปรับมุมพร้อมๆกันทั้งในคลื่นแรงดันฝั่งบวกและลบทำให้ขอบเขตในการควบคุมมุมแรงดันเหลือแค่ครึ่งคลื่นเท่านั้น

กรณี 2 การทดลองจ่ายแรงดันที่มุมต่างๆเพื่อศึกษาลักษณะการเกิดกระแสอินรัชที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 3 จุด จากการทดลองพบว่ามุมและค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กค่าต่างๆ มีผลต่อลักษณะการเกิดและขนาดของสัญญาณกระแสอินรัชจริง โดยสามารถสรุปได้เป็น 2 ความสัมพันธ์ดังนี้

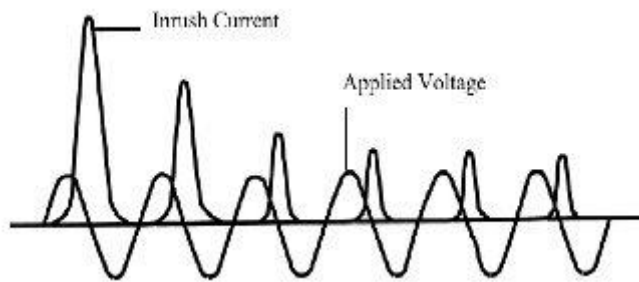
1. ความสัมพันธ์ระหว่างมุมแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากับการเกิดกระแสอินรัช
จากการทดลองเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มุม 0 องศาจะเกิดค่ากระแสอินรัชที่สูงและเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มุม 90 องศาจะเกิดค่ากระแสอินรัชที่ต่ำซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า
เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มุม 0 องศาจะได้ค่ากระแสอินรัชที่สูงสุดโดยปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดจนเป็นสองเท่าของค่ายอดปกติส่งผลให้แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวทำให้เกิดกระแสอินรัชขึ้นหลังจากนั้นกระแสจะเข้าสู่สภาวะคงตัวเนื่องจากการสูญเสียในวงจรไฟฟ้าแต่เมื่อจ่าย

แรงดันไฟฟ้าที่มุม 90 องศากระแสอินรัชจะเกิดน้อยมากหรือแทบจะไม่เกิดขึ้นเลยไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 6.1 ลักษณะการเกิดกระแสอินรัชเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มูม 0 องศา

2. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับการเกิดกระแสอินรัช

เมื่อเปรียบเทียบการเกิดกระแสอินรัชที่มูมแรงดันเดียวกันแต่ต่างค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกันแล้วนั้น พบว่าที่มูมแรงดันเดียวกันจะทำให้เกิดขนาดของกระแสอินรัชที่แตกต่างกันโดยที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กน้อยสุด ($B = 1.1T$) จะเกิดค่ากระแสอินรัชที่น้อยที่สุดและที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมากที่สุด ($B = 1.7T$) จะเกิดค่ากระแสอินรัชมากที่สุดด้วยเช่นกัน

6.3 วิจารณ์ผลการทดลอง

- จากการทดลองนั้นค่าที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการทดลองอาจมีความผิดพลาดที่มาจากผู้ทดลอง (Human error) และความผิดพลาดที่มาจากอุปกรณ์โดยเฉพาะหน้าสัมผัสที่เบรกเกอร์ซึ่งที่ตำแหน่งมูมแรงดัน 135 องศาสามารถเกิดความผิดพลาดได้เนื่องจากมีพื้นที่เนื้อแรงดันน้อยที่สุด

- จากผลการทดลองสังเกตได้ที่มีความผิดพลาดใน 2 กรณีคือ

1. ที่มูมแรงดัน 135 องศาขนาดของกระแสอินรัชควรมีค่ามากกว่าที่มูม 90 องศา ซึ่งผิดพลาดใน 2 ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กคือ ที่จุด 1.4T และ 1.7T
2. ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กน้อยควรมีขนาดกระแสอินรัชน้อย ณ ตำแหน่งมูมแรงดันเดียวกัน ซึ่งที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ 1.1T ตำแหน่งมูมแรงดัน 135 องศาควรมีขนาดกระแสอินรัชน้อยที่สุด

6.4 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัญหา

1. เมื่อใช้งานเป็นเวลานานตัว IC ในวงจรควบคุมละลาย เนื่องจากปริมาณกระแสที่ไหลเข้าวงจรสูงเกินไปทำให้เกิดความร้อนและละลาย แก้ปัญหาโดยการต่อตัวต้านทานเข้าไปในวงจรเพื่อลดกระแสเข้าสู่วงจร
2. ขา 14 และ 15 ที่มาจาก TCA 785 เมื่อ AND กับความถี่ 5K แล้วสัญญาณที่ได้ไม่เสถียร
3. เมื่อต้องการปรับมูมแรงดันที่ตำแหน่งนั้นอย่างเดียวนั้น (ไม่สมมาตร) จะต้องออกแบบวงจรเพิ่ม โดยหากต้องการมูมตั้งแต่ 0 – 180 องศาจะต้องออกแบบวงจรเพื่อ on ขา 14 และหากต้องการมูมตั้งแต่ 180 – 360 องศาจะต้องออกแบบวงจรเพื่อ off ขา 15 ที่มีการนำไปใช้ ทั้งนี้การทำงานดังกล่าวจะต้องเกิดขึ้นในลูกคลื่นแรกของสัญญาณแรงดันที่จ่ายเข้าสู่ระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกนอกระบบได้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น และหากต้องการมูมตั้งแต่ 180 – 360 องศาจะต้องออกแบบวงจรเพื่อ off ขา 15 ที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4. การควบคุมมมแรงดันเมื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบนั้นจะเกิดขึ้นในลูกคลื่นแรกเท่านั้นทำให้ในตั้งแต่ลูกคลื่นที่ 2 เป็นต้นไปจะต้องใช้วงจร Bypass ซึ่งทำมาจาก Magnetic Contactor ซึ่งจะทำงานทันทีเมื่อมีการจ่ายไฟฟ้าให้ระบบโดยจะต้องมี การหน่วงเวลา 20 ms จึงเป็นปัญหาในการหาอุปกรณ์ดังกล่าว
5. การจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่กำหนดนั้นต้องใช้แรงดันสูงมากเนื่องจากที่มุมแรงดันค่าสูงๆพื้นที่เนื้อแรงดันจะน้อยมากซึ่งทำให้ต้องใช้แรงดันค่าสูงตาม โดยวิธีแก้คือการลดพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กกลางในการทดลองนี้ผู้ทดลองได้ทำการลดพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กกลางจากขนาดเดิมในบทที่ 3 ลง 8 เท่า
6. เป้าหมายและข้อสันนิษฐานในการวิจัยไม่สอดคล้องกับเวลาในการทดลองทำให้ได้ผลการทดลองน้อยและปัจจัยไม่ครบตามหัวข้อที่กำหนดเนื่องด้วยเวลาและสถานการณ์ Covid 19

ข้อเสนอแนะ

1. ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการเกิดกระแสอินรัชในหม้อแปลงอีกนอกเหนือจากที่ทดลองเช่น พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า, ขนาดพิกัดของระบบไฟฟ้า, ค่าความต้านทานภายในวงจรระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลง, ชนิดของแกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า, วิธีการจ่ายไฟฟ้า เป็นต้น จึงควรขยายขอบเขตในการศึกษาเพิ่มขึ้น
2. การจ่ายแรงดันเพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กจำต้องคำนึงถึงค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยหรือควรทำการลดสนามแม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงก่อนจึงจะเริ่มทดลองจะเป็นการทำให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

6.5 เป้าหมายในอนาคต

เนื่องจากสถานการณ์โรคระบาดในปี 2564 ทำให้เวลาและแผนการทำงานทั้งหมดที่ผู้ทำงานวิจัยนี้ได้วางแผนไว้คลาดเคลื่อนจึงมีหลายสิ่งที่คุณทำงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำได้จึงเขียนหัวข้อนี้ขึ้นเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้สนใจหรือต้องการศึกษาเรื่องนี้เพิ่มเติม ได้ทราบโดยแบ่งเป็นข้อๆดังนี้

1. ออกแบบวงจรเพิ่มเพื่อให้สามารถปรับมุมได้ตั้งแต่ 0 – 360 องศาตั้งอธิบายก่อนหน้า
2. เขียนโปรแกรมเพื่อให้สามารถปรับมุมแรงดันไฟฟ้าได้โดยการคีย์ตัวเลขลงคอมพิวเตอร์เท่านั้น
3. สร้างวงจร Bypass ที่สามารถทำงานที่ลูกคลื่นที่ 2 เป็นต้นไปได้อย่างแม่นยำ
4. ลดปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างทุกครั้งก่อนเริ่มทำการทดลองเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำ
5. ทำการทดลองซ้ำหลายๆครั้งเพื่อให้ได้ผลกลับที่มีความน่าเชื่อถือ
6. ใช้งานอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงช่วยให้การจ่ายไฟได้อย่างแม่นยำในตอนเริ่มจ่ายไฟฟ้าในการทดลองทุกครั้ง
7. นำวงจรคอนโทรลที่มีลงแผ่นปริ้นซ์เพื่อให้ง่ายต่อการพกพา
8. เพิ่มปัจจัยการศึกษามากขึ้นดังที่กล่าวมาข้างต้นเพื่อให้ผลงานวิจัยที่แม่นยำมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บรรณานุกรม

- 1.Applied Protective Relaying , First Edition , Westinghouse-Electric Corporation. 1976.
H.J.Li and J.L.Blackburn.Protective Relaying , First Edition. Westinghouse-Electric Corporation , 1976
- 2.ธีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (Design of small transformers using optimization techniques) วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 3.เกรียงไกร กิตติวารวุฒิ การศึกษาและวิเคราะห์กระแสอินรัชของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้วิธีแปลงเวฟเล็ต (A study and analysis of transformer inrush current using wavelet transform) วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 4.เศกสรรค์ งามศรีตระกูล การวิเคราะห์กระแสซิมพาเทติกอินรัชระหว่างหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP (Analysis of Sympathetic inrush current between transformer using ATP/EMTP) วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 5.Gopika R , Deepa Sankar. Study on Power Transformer Inrush Current. Department of Electrical & Electronics Engineering , Adi Shankara Institute of Engineering Technology , Kalady , India

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

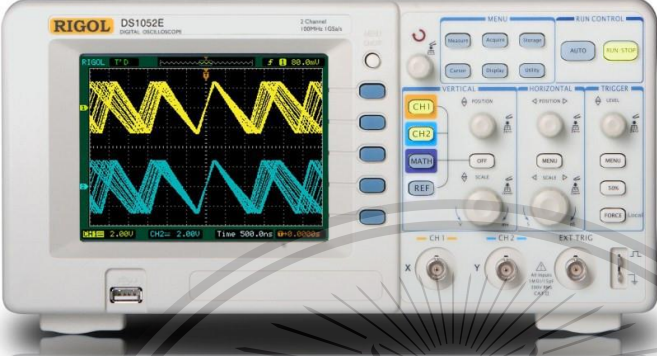
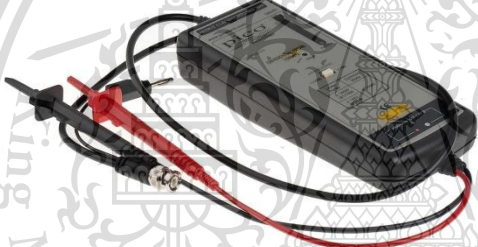


This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ก.

รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ในการทดลอง

ตารางที่ ก.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

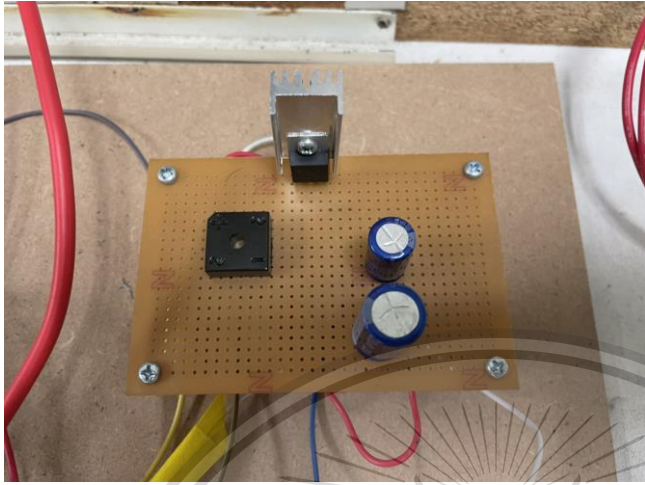
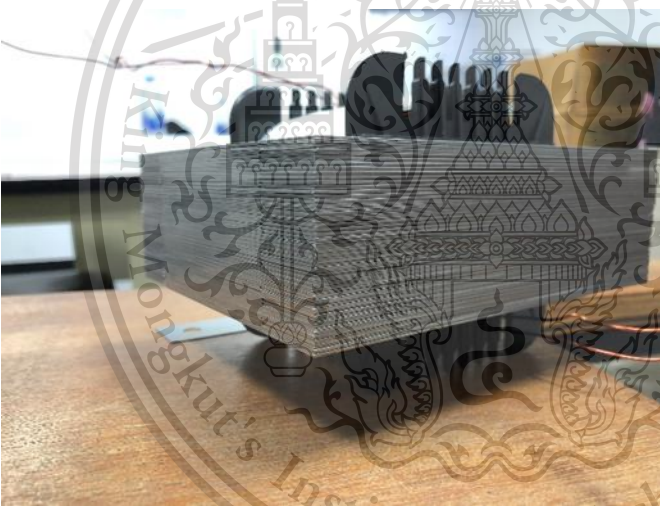
รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>Oscilloscope 2 Chanel ยี่ห้อ : Rigol 2 Channel รุ่น : DS1052E</p>
	<p>Differential Probe ยี่ห้อ : Pico Technology</p>
	<p>Current Probe ยี่ห้อ : Rohde & Schwarz HZO50</p>
	<p>Variac 1 Phase ขนาดพิกัด 1kVA , 0-250 V</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

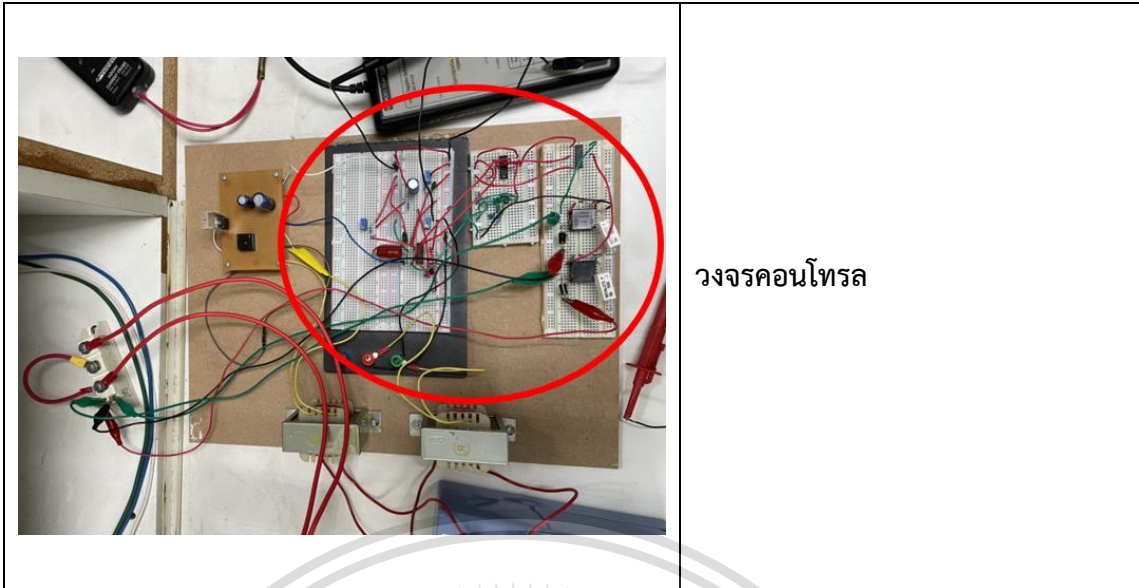
ตารางที่ ก.2 รูปถ่ายชิ้นงาน

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>DC Supply</p> <ul style="list-style-type: none"> - Transformer 220/15V 1A - Bridge Rectifier 400V 2A - IC 7815 + heatsink - Capacitor 2200 μF - Capacitor 1000 μF
	<p>หม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ</p> <ul style="list-style-type: none"> - AWG 19 inch² - E – I core - Bobbin - Mylar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



วงจรคอนโทรล

รายละเอียดของวงจรคอนโทรล

- | | |
|-----------------------------------|---|
| - Transformer 220/15V 1A | - Variable Resistor 10k Ω (TrimPot) |
| - Pulse Transformer | - Variable Resistor 100k Ω (TrimPot) |
| - TCA 785 | - Capacitor 1000 μ F 25V (Electrolyte) |
| - IC 4081 (And Gate) | - Capacitor 10 nF 50/63V (Mylar) |
| - ULN 2004 | - Capacitor 30 pF 50V (Ceramic) |
| - IC 555 | - Capacitor 0.475 μ F 100V (Mylar) |
| - FR 307 | - Capacitor 0.1 μ F 100V (Mylar) |
| - Diode 1N 4148 | - Capacitor 2.2 μ F 100V (Mylar) |
| - Zener Diode 18V 1W | - Capacitor 47 nF 100V (Mylar) |
| - Resistor 50 Ω 5W | - Capacitor 150 pF 50V (Ceramic) |
| - Resistor 1 k Ω 1/4W 5% | - SCR Semikron SKKT 106/16E |
| - Resistor 2.2 k Ω 1/4W 1% | |
| - Resistor 4.7 k Ω 1/4W 1% | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขข้อมูลเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การศึกษากระแสอินรัชในหม้อแปลง

A STUDY OF INRUSH CURRENT IN TRANSFORMERS

ภควัต ตั้งปกาศิต , ภูริณัฐ ยิ้มละม้าย , สุทวิส จตุรภูษารณ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 0-2739-2478

บทคัดย่อ

ปัญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอปรากฏการณ์กระแสอินรัชในหม้อแปลงซึ่งเกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้จ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถทำให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาดได้โดยเทคโนโลยีของอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์รูปแบบลักษณะการเกิดและผลของกระแสอินรัชโดยกรณีศึกษานี้จะจำลองกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นบนหม้อแปลงที่มีขดลวด Primary และ Secondary เท่ากันโดยจ่ายแรงดันที่มุมตามที่กำหนดไว้โดยใช้ความรู้ทางด้าน Power Electronics ช่วยเพื่อหาผลตอบสนองชั่วคราวของระบบและอธิบายผลกระทบจากเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็ก รวมไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับกำลังทางไฟฟ้าต่อน้ำหนักหม้อแปลงโดยใช้ค่าการทดลองจริงแสดงบนกราฟเพื่อวิเคราะห์ลักษณะกระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลงความเปลี่ยนแปลงต่างๆหลังเกิดกระแสอินรัชนอกจากนี้ผลงานวิจัยดังกล่าวยังสามารถนำไปใช้ต่อยอดเพื่อประโยชน์ของระบบป้องกันที่รวดเร็วและแม่นยำในการแบ่งแยกระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ภายในหม้อแปลงเป็นประโยชน์สำหรับประสิทธิภาพในระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป

ABSTRACT

This thesis presents the inrush current phenomenon in transformers, which occurs when power transformers energized by supply electricity to the power system. This inrush current is important because the effect can lead protection devices to misoperation. The technology of protection devices used in power systems are continually being developed to analyze the form of the formation and effect of the inrush current. This research simulates the inrush currents that occur on transformers with same primary and secondary windings. By applying voltage at the specified angle using knowledge of Power Electronics to determine the transient response of the system and explain the effect of the relationship between magnetic field density and magnetic field intensity, as well as the relationship between magnetic field density and power to weight. Transformers using actual experimental values shown on a graph to analyze the characteristics of the transformer inrush current, changes after the inrush current occurs. The separation between the intrinsic and faulty currents within the transformer is useful for further efficiency in power systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. บทนำ

คงปฏิเสธไม่ได้ว่าปัจจุบันไฟฟ้ามีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก และแน่นอนว่าความต่อเนื่องของพลังงานเป็นสิ่งทีทุกคนปรารถนาไม่เฉพาะเพียงผู้ใช้งานไฟฟ้าแต่ยังรวมไปถึงผู้ปฏิบัติงานทางไฟฟ้าและออกแบบระบบไฟฟ้าด้วยแต่อย่างไรก็ตามความผิดปกติในระบบไฟฟ้า (Fault) เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นจึงมีการเชื่อมโยงโครงข่ายของระบบไฟฟ้าเข้าด้วยกันโดยที่สายส่งเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากโรงงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้โดยผ่านส่วนต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น สถานีไฟฟ้า เขตชุมชน เป็นต้น ในขณะเดียวกันหม้อแปลงไฟฟ้า (Power Transformer) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญและมีราคาสูงซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากต่ำไปสูงเพื่อให้สามารถส่งจ่ายพลังงานไปได้ระยะไกลและแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากสูงมาต่ำเพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าปลายทาง ดังนั้นระบบป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีความสำคัญในการตัดแยกหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจากฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งตัวอย่างความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรภายในคือ ขดลวดภายในเสียหายและอาจทำให้โครงสร้างภายนอกเสียหายจากแรงดันของน้ำมันหม้อแปลงที่ขยายตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรภายใน และเมื่อโครงสร้างภายนอกเสียหายจะทำให้น้ำมันซึ่งมีอุณหภูมิสูงรั่วออกมาสู่ภายนอกและอาจเกิดการลุกไหม้สร้างความเสียหายต่อไปได้อีก

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการทดลอง

2.1 ทฤษฎี

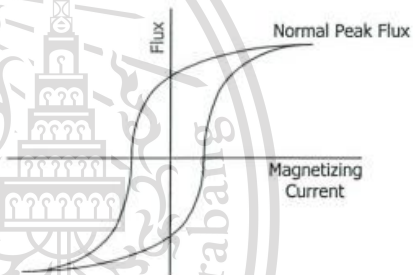
กระแสอินรัช (Magnetizing Inrush Current)

ปรากฏการณ์ที่มีกระแสรานขึ้นตันท่วงเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิในช่วงแรก ขณะที่หม้อแปลงเริ่มมีการจ่ายไฟ (Energizing) และยังคง

สภาพของขนาดกระแสที่พุ่งเข้าดังกล่าวในช่วงเวลา 100 ms ไปจนถึงหลายวินาทีซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้เกิดจากความผิดพลาดของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่เนื่องจากการเกิดกระแสที่ผลต่างระหว่างขดลวดทั้งสองของหม้อแปลงซึ่งจะเปรียบเทียบกับคล้ายกับการเกิดฟอลต์ จึงอาจทำให้ระบบป้องกันไฟฟ้าทำงานผิดพลาดได้

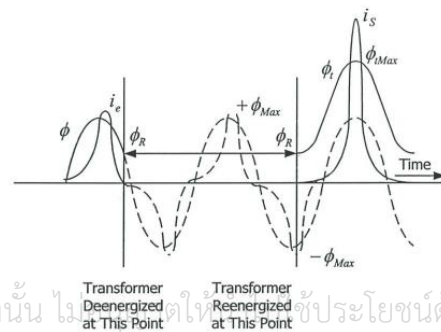
กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟ (Initial Inrush)

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าถูกปลดออกจากระบบไฟฟ้า กระแสกระตุ้นแม่เหล็กจะลดลงเป็นศูนย์ ส่วนฟลักซ์แม่เหล็กจะค่อยลดลงตาม Hysterisis Loop จนเหลือค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ϕ_R ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นแม่เหล็กกับฟลักซ์แม่เหล็ก

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟอีกครั้ง ณ ตำแหน่งที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อเนื่องจากตำแหน่งที่ปลดหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบจะไม่ปรากฏกระแสกระตุ้นแม่เหล็ก แต่ถ้ามีฟลักซ์ตกค้าง ขนาดกระแสอินรัชจะมีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะจ่ายไฟ

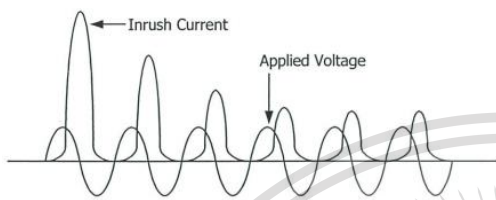
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปใช้จะต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่จะถูกนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างมีค่ามากกว่าช่วงการทำงานปกติและเข้าช่วงสนามแม่เหล็กอิ่มตัวสูงค่าความเหนี่ยวนำที่จะได้จะลดลง แต่ขนาดของกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว รูปคลื่นของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะซ้ำกัน โดยรูปคลื่นจะค่อยๆ เข้าสู่สภาวะคงตัวโดยอาศัยความสูญเสียในวงจรไฟฟ้าที่เกิดจากความต้านทานระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้างรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระแสอินรัชที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กทั่วไป

ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสอินรัช

1. ขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ขนาดพิกัดของระบบไฟฟ้า
3. ค่าความต้านทานในระบบไฟฟ้าระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลง
4. ชนิดของแกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นในการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก (Saturation Density)
5. ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงไฟฟ้า (Residual Flux)
6. วิธีการจ่ายไฟฟ้า

2.2 การทดลอง

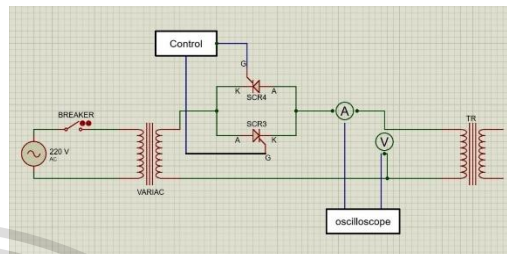
ทดลองการปรับมุมแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรควบคุมโดยเชื่อมต่อวงจรทั้งหมดเข้าด้วยกัน ได้แก่

- วงจรควบคุม
 - เพื่อเป็นคำสั่งควบคุม SCR ทั้ง 2 ตัว
- วงจรกำลัง
 - เพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อ

ตรวจสอบสัญญาณกระแสอินรัชหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส

ปรับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไปที่ 1.1T, 1.4T, 1.7T ซึ่งสามารถคำนวณออกมาเป็นแรงดันที่ค่า 35V, 45V, 54V เริ่มจากการป้อนค่ามุมของแรงดัน

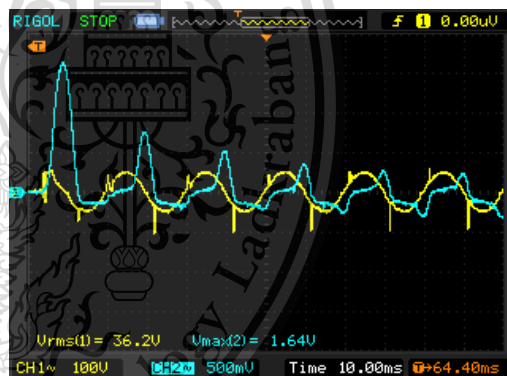
ตั้งแต่ 0, 45, 90, 135 องศาต่อเครื่องมือวัดตามรูปที่ 5.6 บันทึกสัญญาณแรงดันและกระแสที่ได้ด้วย Oscilloscope จากนั้นบันทึกค่าสัญญาณที่ได้ใน 2 รูปแบบคือ Bitmap (รูปภาพ) และ CSV (สร้างกราฟในโปรแกรม Matlab)และรายงานผลการทดลอง



รูปที่ 2.4 วงจรทดสอบกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้า

2.3 ยกตัวอย่างผลการทดลอง

กรณีค่า $B=1.1T$ มุมแรงดัน 0 องศา



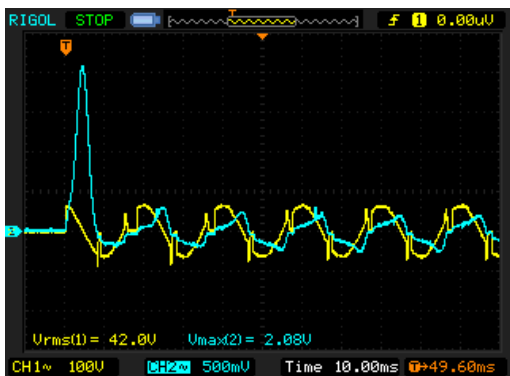
รูปที่ 2.5 สัญญาณกระแสอินรัชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.1T$ และปรับมุมแรงดันที่ 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ภายใต้การศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นแต่กรณีที่มีเหตุจำเป็นที่ถูกต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กรณีค่า $B=1.4T$ มุมแรงดัน 45 องศา



รูปที่ 2.5 สัญญาณกระแสอินรีชและแรงดันเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นที่ $B=1.4T$ และปรับมุมแรงดันที่ 45 องศา

3.สรุป

การทดลองนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับขนาดและลักษณะการเกิดกระแสอินรีช ขณะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งกระแสอินรีชนี้จะส่งผลให้ระบบป้องกันไฟฟ้าทำงานผิดพลาด เนื่องจากกระแสอินรีชมีลักษณะคล้ายกับฟอลต์จึงอาจมีขนาดกระแสอินรีชพุ่งสูงขึ้นในช่วงเริ่มจ่ายไฟฟ้า ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างมุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสกับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กค่าต่างๆว่ามีผลต่อลักษณะการเกิดและขนาดของสัญญาณกระแสอินรีชอย่างไร

โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 การทดลอง ดังนี้

1. การทดลองใช้งานวงจรควบคุม SCR 2 ตัว เพื่อปรับมุมแรงดันให้ได้ค่ามุมต่างๆตามที่ต้องการ
2. การทดลองจ่ายแรงดันที่มุมต่างๆเพื่อศึกษา ลักษณะการเกิดกระแสอินรีชที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่กำหนด

การทดลองที่ 1

การทดลองใช้งานวงจรควบคุม (control) เพื่อสั่งการที่ขา G และ K ของ SCR 2 ตัว เพื่อปรับมุมแรงดัน ที่ค่า 0, 45, 90, 135, 180 องศา ได้ผลออกมาแม่นยำโดยวงจรควบคุมนี้สามารถปรับมุมได้ละเอียดและแม่นยำในทุกค่าตั้งแต่ 0 – 180 องศา เช่นกัน

การทดลองที่ 2

การทดลองจ่ายแรงดันที่มุมต่างๆเพื่อศึกษา ลักษณะการเกิดกระแสอินรีชที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 3 จุด จากการทดลองพบว่ามุมและค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กค่าต่างๆ มีผลต่อลักษณะการเกิดและขนาดของสัญญาณกระแสอินรีชจริง โดยสามารถสรุปได้เป็น 2 ความสัมพันธ์ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่างมุมแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากับการเกิดกระแสอินรีช

จากการทดลองเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มุม 0 องศาจะเกิดค่ากระแสอินรีชที่สูงและเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มุม 90 องศาจะเกิดค่ากระแสอินรีชที่ต่ำซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มุม 0 องศาจะได้ค่ากระแสอินรีชที่สูงสุดโดยปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดจนเป็นสองเท่าของค่ายอดปกติส่งผลให้แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวทำให้เกิดกระแสอินรีชขึ้นหลังจากนั้นกระแสจะเข้าสู่สภาวะคงตัวเนื่องจากการสูญเสียในวงจรไฟฟ้าแต่เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มุม 90 องศากระแสอินรีชจะเกิดน้อยมากหรือแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย

2. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับการเกิดกระแสอินรีช

เมื่อเปรียบเทียบการเกิดกระแสอินรีชที่มุมแรงดันเดียวกันแต่ต่างค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกันแล้วนั้น พบว่าที่มุมแรงดันเดียวกันจะทำให้เกิดขนาดของกระแสอินรีชที่แตกต่างกันโดยที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กน้อยสุด ($B= 1.1T$) จะเกิดค่ากระแสอินรีชที่น้อยที่สุดและที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมากที่สุด ($B= 1.7T$) จะเกิดค่ากระแสอินรีชมากที่สุดด้วยเช่นกัน

4.วิจารณ์ผลการทดลอง

- จากการทดลองนั้นค่าที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการทดลองอาจมีความผิดพลาดที่มาจากผู้ทดลอง (Human error) และความผิดพลาดที่มาจากอุปกรณ์โดยเฉพาะหน้าสัมผัสที่เบรกเกอร์ซึ่งที่ตำแหน่งมุมแรงดัน 135 องศาสามารถเกิดความผิดพลาดได้เนื่องจากมีพื้นที่เนื้อแรงดันน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- จากผลการทดลองสังเกตได้ว่ามีความผิดพลาดใน 2 กรณีคือ

1. ที่มุมแรงดัน 135 องศาขนาดของกระแสอินรัชควมมีค่ามากกว่าที่มุม 90 องศา ซึ่งผิดพลาดใน 2 ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กคือ ที่จุด 1.4T และ 1.7T

2. ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กน้อยควมมีขนาดกระแสอินรัชน้อย ณ ตำแหน่งมุมแรงดันเดียวกัน ซึ่งที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ 1.1T ตำแหน่งมุมแรงดัน 135 องศาควมมีขนาดกระแสอินรัชน้อยที่สุด

5.ข้อเสนอแนะ

1. ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการเกิดกระแสอินรัชในหม้อแปลงอีกนอกเหนือจากที่ทดลองเช่นพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า, ขนาดพิกัดของระบบไฟฟ้า, ค่าความต้านทานภายในวงจรระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลง, ชนิดของแกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า, วิธีการจ่ายไฟฟ้า เป็นต้น จึงควรขยายขอบเขตในการศึกษาเพิ่มขึ้น

2. การจ่ายแรงดันเพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กจำต้องคำนึงถึงค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยหรือควรทำการลดสนามแม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงก่อนจึงจะเริ่มทดลองจะเป็นการทำให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

6.บรรณานุกรม

1.Applied Protective Relaying , First Edition , Westinghouse-Electric Corporation.

1976.H.J.Li and J.L.Blackburn.Protective Relaying , First Edition. Westinghouse-Electric Corporation , 1976

2.ธีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (Design of small transformers using optimization techniques) วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.เกรียงไกร กิตติวาราวุฒิ การศึกษาและวิเคราะห์กระแสอินรัชของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้วิธีแปลงเวฟเล็ต (A study and analysis of transformer inrush current using wavelet transform)

วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

4.เศกสรรค์ งามศรีตระกูล การวิเคราะห์กระแสซิมพาเทติกอินรัชระหว่างหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP (Analysis of Sympathetic inrush current between transformer using ATP/EMTP) วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

5.Gopika R , Deepa Sankar. Study on Power Transformer Inrush Current. Department of Electrical & Electronics Engineering , Adi Shankara Institute of Engineering Technology , Kalady , India

ประวัติผู้เขียนบทความ

	<p>นายภควัต ตั้งปกาศิต 60010752 เกิดวันที่ 11/01/2542 โทรศัพท์ : 095-551-6139 E-mail : earth20098@gmail.com</p>
	<p>นายภูริณัฐ ยิ้มละม้าย 60010809 เกิดวันที่ 23/09/2541 โทรศัพท์ : 090-647-3461 E-mail : phoorinat23@gmail.com</p>
	<p>นายสุทิวส จตุรภูษารณ 60011091 เกิดวันที่ 12/08/2541 โทรศัพท์ : 094-254-7915 E-mail : suthiwat.f@gmail.com</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้