

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดการทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส  
PRACTICE EXPERIMENT OF WINDING FAULT WITHIN 1 PHASE TRANSFORMER



T129583



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....129583  
วัน,เดือน,ปี. 9.8.ค. 2557

b. 12958360  
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# PRACTICE EXPERIMENT OF WINDING FAULT WITHIN 1 PHASE TRANSFORMER



A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE  
OF BECHELOR OF ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2555

ชุดการทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส  
PRACTICE EXPERIMENT OF WINDING FAULT WITHIN 1 PHASE TRANSFORMER



ผศ.ดร. อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

ผศ. ชายชาญ โภธิสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดการทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส

ผู้จัดทำ

- |          |          |               |
|----------|----------|---------------|
| 1.นางสาว | เบญจวรรณ | จิตรแจ่ม      |
| 2.นาย    | ปณิธาน   | พงษ์ศรีธธาสิน |
| 3.นาย    | ภาณุ     | วิจิตรเอกฉันท |
| 4.นาย    | ภาณุพงศ์ | คัมภีรานนท์   |



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผศ.ดร. อรรถพล เเงาพิทักษ์กุล )

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผศ. ชชายชาญ โปธิสาร )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชุดการทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส

นางสาว	เบญจวรรณ	จิตรีแจ้ง	
นาย	ปณิธาน	พงษ์ศรีธธาสิน	
นาย	ภาณุ	วิจิตรเอกฉันท	
นาย	ภาณุพงศ์	คัมภีรานนท์	
ผศ.ดร.	อรรถพล	เง่าพิทักษ์กุล	อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.	ชายชาญ	โพธิสาร	อาจารย์ที่ปรึกษา
			ปีการศึกษา 2555

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ศึกษาวิจัยชุดทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส แบบแห้ง (Conventional Dry Type) พิกัดขนาด 15 kVA พิกัดแรงดันไฟฟ้า 220/440 โวลต์ ที่ทำการแทบขดลวดด้านไฟฟ้าแรงดันสูงทุก ๆ 10% หรือทุก ๆ 44 โวลต์ ในการทดลองได้ทำการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ซึ่งประกอบด้วย การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด และการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ปริญญานิพนธ์นี้ได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งทางด้านปฐมภูมิ ทางด้านทุติยภูมิ และทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจร รวมไปถึงกระแสผลต่าง ซึ่งผลจากการทดลองแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรม และความรุนแรงของการเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

**คำสำคัญ:** หม้อแปลงไฟฟ้า การลัดวงจร

## PRACTICE EXPERIMENT OF WINDING FAULT WITHIN 1 PHASE TRANSFORMER

Benjawan Chitrchang

Panithan Pongsatthasin

Panu Wijitakeachun

Panupong Kumpiranonde

Asst.Prof.Dr. Atthapol Ngaopitakkul Supervisor

Asst.Prof Chaichan Pothisarn Supervisor

Year 2012

### ABSTRACT

This thesis is focuses on an experimental test set of winding fault within conventional dry-type 1-phase transformer, rated at 15 kVA and Voltage of 220/440 V. This transformer has tap winding on the high voltage every 10% or every 44 V. For the experiment, the short-circuit within the 1-phase transformer has been performed; it consists of short-circuit between the winding and short-circuit of the winding to ground. This thesis has demonstrated the effects on primary, secondary, secondary side that is short-circuited and differential current when winding fault occurs within the transformer. The results of the experiments show the behavior and the severity of the winding fault within transformer.

Keywords: transformer, short circuit

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการสนับสนุนจากอาจารย์หลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.อรรถพล เก่งพิทักษ์กุล และ ผศ.ชายชาญ โปธิสาร อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึง ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน ดร.พีรุฒิ ยุทธโกวิท และ รศ.พิชิต ล้ายอง ตลอดจนจนอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณจิตติพงษ์ กล่อมจิตต์ ที่คอยให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำ และคอยช่วยเหลือในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณบริษัทไทย จำกัด (มหาชน) คุณอวยชัย ศิริวงษา, คุณวินัย มุลสถาพร, คุณจิรวุฒิ เกษมวงศ์จิตร, และเจ้าหน้าที่ห้องทดสอบหม้อแปลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณอาภรณ์ ไพฑูลย์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าให้กับการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ และขอขอบคุณทางบริษัทที่อนุญาตให้นักศึกษาเข้าเยี่ยมชม อีกทั้งทางบริษัทยังให้การสนับสนุน และให้ความสะดวกในการติดต่อประสานงานด้วยดี

นอกจากนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือ ตลอดจน คุณกมลวรรณ และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการออกหนังสือติดต่อประสานงาน ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จในการทำปริญญานิพนธ์

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำโครงการครั้งนี้

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	10
1.3 ขอบเขต และข้อกำหนดของปริญญานิพนธ์	10
1.4 วิธีการที่ใช้ในปริญญานิพนธ์	11
1.5 แผนการดำเนินปริญญานิพนธ์	11
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำปริญญานิพนธ์	13
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	14
2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า	14
2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า	14
2.3 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า	15
2.3.1 สภาวะไม่มีภาระทางไฟฟ้า	15
2.3.2 สภาวะมีภาระทางไฟฟ้า	17
2.4 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า	19
2.4.1 การทดสอบแบบเปิดวงจร	19
2.4.2 การทดสอบแบบลัดวงจร	20
2.5 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง	21
2.5.1 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง	21
2.5.2 การระบายความร้อน (Cooling) ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง	22
2.5.3 อายุฉนวน (Insulation life) ของหม้อแปลงไฟฟ้า	23
2.6 ความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า	24
2.6.1 การคำนวณกระแสลัดวงจร	29
2.6.2 ผลกระทบของการเกิดลัดวงจร	31
2.6.3 ปัจจัยที่ส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้าเสื่อมสภาพ	32
2.6.4 ความแข็งแรงทางกลของขดลวดขณะเกิดลัดวงจร	33

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การป้องกันกระแสลัดวงจรในหม้อแปลงไฟฟ้า	34
2.8 หลักการทำงานของวงจรรีโวลต์ครอสซิง (Zero crossing)	37
บทที่ 3 การออกแบบชุดทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า	38
3.1. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของชุดทดลอง	40
3.2. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า	41
3.3. โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า	42
3.4. อุปกรณ์วัดปริมาณทางไฟฟ้า	43
3.5. ชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุมเริ่มต้นการลัดวงจร	46
3.6. การป้องกันชุดทดลอง	48
บทที่ 4 ผลการทดลอง	49
4.1 การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด	49
4.1.1 กรณีขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์	50
4.1.1.1 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 44-88	50
4.1.1.2 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 88-132	54
4.1.1.3 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 132-176	58
4.1.1.4 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 176-220	62
4.1.1.5 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 220-264	66
4.1.1.6 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 264-308	70
4.1.1.7 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 308-352	74
4.1.1.8 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 352-396	78
4.1.1.9 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 396-440	82
4.1.2 กรณีขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์	87
4.1.2.1 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 44-132	87
4.1.2.2 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 88-176	91
4.1.2.3 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 132-220	95
4.1.2.4 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 176-264	99
4.1.2.5 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 220-308	103
4.1.2.6 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 264-352	107
4.1.2.7 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 308-396	111
4.1.2.8 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 352-440	115

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 กรณีขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์	120
4.1.3.1 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 44-176	120
4.1.3.2 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 88-220	124
4.1.3.3 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 132-264	128
4.1.3.4 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 176-308	132
4.1.3.5 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 220-352	136
4.1.3.6 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 264-396	140
4.1.3.7 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 308-440	144
4.1.4 กรณีขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์	149
4.1.4.1 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 44-220	149
4.1.4.2 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 88-264	153
4.1.4.3 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 132-308	157
4.1.4.4 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 176-352	161
4.1.4.5 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 220-396	165
4.1.4.6 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 264-440	169
4.2 การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน	174
4.2.1 การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 44 – ดิน	174
4.2.2 การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 88 – ดิน	178
4.2.3 การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 132 – ดิน	182
4.2.4 การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 176 – ดิน	186
4.2.5 การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 220 – ดิน	190
4.2.6 การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 264 – ดิน	194
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	199
เอกสารอ้างอิง	203
ภาคผนวก	205
ประวัติผู้เขียน	272

## สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแกน (Core type) และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปลือกกรอบ (Shell type)	14
2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า	15
2.3 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะไม่มีภาระทางไฟฟ้า	15
2.4 ส่วนประกอบของค่ากระแสกระตุ้น	17
2.6 การทดสอบแบบเปิดวงจร	19
2.7 การทดสอบแบบลัดวงจร	20
2.8 ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ	25
2.9 ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด	26
2.10 ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน	28
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของการเกิดความเสียหาย กับ ค่าความเสียหาย	32
2.12 อัตราส่วนของการเกิดความเสียหายในหม้อแปลงไฟฟ้า	32
2.13 การทำงานของรีเลย์กระแสต่าง (Differential relay) สภาวะปกติ	34
2.14 การเกิดการลัดวงจรภายนอกโซนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้า	34
2.15 การเกิดการลัดวงจรภายในโซนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้า	35
2.16 คุณลักษณะการส่งปลดวงจรของรีเลย์กระแสต่างอย่างง่าย	35
2.17 คุณลักษณะการส่งปลดวงจรของรีเลย์กระแสต่างแบบสองส่วน	36
2.18 สัญญาณซีโรครอสซิง (Zero crossing)	37
3.1 วงจรการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า	39
3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ 3 เฟส 420 โวลต์ 30 แอมแปร์	40
3.3 หม้อแปลงไฟฟ้า 15 kVA	41
3.4 โหลดความต้านทานความเหนี่ยวนำ	42
3.5 อุปกรณ์วัดปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ	43
3.6 หม้อแปลงกระแส (Current Transformer: CT)	44
3.7 วงจรการต่อหม้อแปลงกระแส	45
3.8 ชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุมเริ่มต้นการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า	46
3.9 วงจรกำลังของชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุมเริ่มต้นการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า	47
3.10 วงจรควบคุมของชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุมเริ่มต้นการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า	47
3.11 การป้องกันชุดทดลอง	48
4.1 กรณีการทดลองการลัดวงจร	49
4.2 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88	50
4.3 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 88-132	54

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.4 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 132-176	58
4.5 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 176-220	62
4.6 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 220-264	66
4.7 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 264-308	70
4.8 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 308-352	74
4.9 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 352-396	78
4.10 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 396-440	82
4.11 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-132	87
4.12 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 88-176	91
4.13 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 132-220	95
4.14 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 176-264	99
4.15 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 220-308	103
4.16 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 264-352	107
4.17 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 308-396	111
4.18 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 352-440	115
4.19 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-176	120

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.20	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 88-220	124
4.21	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 132-264	128
4.22	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 176-308	132
4.23	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 220-352	136
4.24	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 264-396	140
4.25	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 308-440	144
4.26	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-220	149
4.27	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 88-264	153
4.28	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 132-308	157
4.29	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 176-352	161
4.30	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 220-396	165
4.31	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 264-440	169
4.32	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 44 – ดิน	174
4.33	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 88 – ดิน	178
4.34	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 132 – ดิน	182
4.35	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 176 – ดิน	186
4.36	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 220 – ดิน	190
4.37	ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 264 – ดิน	194
5.1	เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ระดับแรงดัน 27.5/55 V แทบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 10 %, 20 %, 30% และ 40%	200

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.2	เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าหลังการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ระดับแรงดัน 27.5/55 V แทบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 10 %, 20 %, 30% และ 40%	200
5.3	เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ระดับแรงดัน 27.5/55 V แทบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 10 %, 20 %, 30%, 40%, 50% และ 60%	201
5.4	เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าหลังการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ระดับแรงดัน 27.5/55 V แทบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 10 %, 20 %, 30%, 40%, 50% และ 60%	201



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	12
2.1 การระบายความร้อนตามมาตรฐานสหรัฐอเมริกา และยุโรป	22
2.2 เงื่อนไขการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง	24
2.3 สรุปผลการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้า	33
4.1 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V แทปขดลวดที่แรงดันต่างกัน 10 เเปอร์เซ็นต์	86
4.2 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V แทปขดลวดที่แรงดันต่างกัน 20 เเปอร์เซ็นต์	119
4.3 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V แทปขดลวดที่แรงดันต่างกัน 30 เเปอร์เซ็นต์	148
4.4 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V แทปขดลวดที่แรงดันต่างกัน 40 เเปอร์เซ็นต์	173
4.5 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดินที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V	198

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลกมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เทคโนโลยีและระบบเครือข่ายต่าง ๆ ก้าวหน้าอย่างรวดเร็วซึ่งสิ่งเหล่านี้ไม่สามารถเกิดขึ้นถ้าขาดแหล่งพลังงานต่าง ๆ อาทิเช่น น้ำมัน, น้ำ, ไฟ, ถ่านหิน, และวัตถุดิบต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นฐานต่อยอดความก้าวหน้าอย่างไม่หยุดยั้ง พลังงานไฟฟ้าก็เป็นปัจจัยหลักต่อการพัฒนาทั้งในเชิงอุตสาหกรรม การขนส่ง โทรคมนาคม การดำรงอยู่ และอื่น ๆ อีกมากมาย หรือพูดอีกอย่างหนึ่งว่า ยังมีการพัฒนามากขึ้น ภาระทางไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้น ซึ่งนั่นหมายถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการวางแผนออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพื่อส่งต่อความสำเร็จสู่การพัฒนาต่อไป

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากในระบบไฟฟ้า เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมโยงและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า และด้วยหม้อแปลงไฟฟ้ามีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ เพราะฉะนั้นเมื่อเกิดความผิดปกติในหม้อแปลงไฟฟ้าจึงส่งผลให้เกิดการขาดความไม่ต่อเนื่องในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าทำให้การเดินเครื่องของเครื่องจักรในเขตอุตสาหกรรมต้องหยุดชะงัก และเกิดไฟดับในชุมชน ส่งผลเสียหายในด้านเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก อีกทั้งการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ต่อเนื่อง ยังเป็นการแสดงถึงการขาดความน่าเชื่อถือในระบบไฟฟ้า ความไม่มีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า จากการศึกษาค้นคว้าและวิจัยการเกิดความล้มเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าพบว่า 70 – 80 % ของจำนวนหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดการเสียหายนั้น เกิดจากฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเสื่อมสภาพ ทำให้เกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า (Internal fault) นอกจากนี้ปัจจัยที่ส่งผลให้ฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดสถานะเสื่อมสภาพมีอยู่หลากหลายปัจจัยเช่น ปัญหาจากความร้อนขณะใช้งาน ปัญหาเชิงระบบไฟฟ้า ปัญหาความเครียดทางกล ความชื้นและอื่น ๆ อีกมากมาย

ปัจจุบันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย อย่างที่ทราบกันดีว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำมันไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานในอาคารได้ เนื่องจากปัญหาด้านความปลอดภัย แม้ว่าเมื่อเทียบด้านมูลค่ากับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งแล้วราคาหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำมันจะมีราคาถูกกว่าและจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า สืบเนื่องจากการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีทำให้พื้นที่ก่อสร้างมีขนาดน้อยลง จำเป็นต้องก่อสร้างอาคารและสิ่งก่อสร้างที่มีขนาดสูงเพื่อประหยัดพื้นที่ใช้สอยในแนวระนาบ ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งจึงถูกนำมาใช้งานภายในอาคารเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ นอกจากนี้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งยังไม่ต้องมีการบำรุงรักษามาก ไม่เกิดการระเบิดเมื่อติดไฟ และระดับฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งในปัจจุบันได้พัฒนาขึ้นอย่างมากทำให้สามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำมัน แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าการเปลี่ยนจากหม้อแปลงไฟฟ้าแบบฉนวนน้ำมันมาใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งก็ยังคงประสบปัญหาการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส การลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบ่งได้เป็น

1. การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับขดลวด (turn-to-turn short circuit)
2. การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดกับดิน (turn-to-ground short circuit)

โดยการเกิดความผิดปกติ (fault) สามารถเกิดได้ทั้งในด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการศึกษาและวิเคราะห์การลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้านี้ ทำให้สามารถระบุตำแหน่งและความรุนแรงของการเกิดความผิดปกติ (fault) ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ เพื่อสามารถออกแบบให้มีระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ดี

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาค้นคว้าความผิดปกติในหม้อแปลงไฟฟ้าหลากหลายวิธีมีทั้งการจำลองในโปรแกรมแบบต่างๆ อาทิเช่น MATLAB/SIMULINK, ATP-EMTP และอื่น ๆ มากมาย เช่น

1. งานวิจัย แบบจำลองสภาวะความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ (*Modeling Transformer Internal Faults Using Matlab*) [1]

ในการทดสอบการลัดวงจรในหม้อแปลงไฟฟ้าในที่นี่ศึกษาโดยใช้แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส สองขดลวดทางด้านปฐมภูมิหนึ่งขด และทางด้านทุติยภูมิหนึ่งขด และจำลองสภาวะการเกิดการลัดวงจรที่ขดลวดด้านใดด้านหนึ่ง ทั้งนี้ทำการจำลองทั้งหมดผ่านโปรแกรม MATLAB/SIMULINK รวมถึง กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (magnetizing current) และ กระแสลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้ วิธี Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการเกิดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น เนื่องจากการวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ สามารถทำให้หาส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์ลำดับที่สองของกระแสลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไม่มากนัก ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้า การวิเคราะห์เวลาชั่วครู่ (transients) ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้คอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ดิจิทัลต่าง ๆ ต้องคำนึงถึงความแม่นยำและประสิทธิภาพของแบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชิ้นที่ใช้ในการจำลอง อาทิเช่น สายส่ง (transmission line) เครื่องจักรกลชนิดซิงโครนัส และมอเตอร์ ซึ่งการจำลองแบบหม้อแปลงไฟฟ้าก็เช่นกัน การจำลองแบบหม้อแปลงไฟฟ้าในการทดสอบควรคำนึงถึงการสูญเสียในแกนเหล็กด้วยและในส่วนนี้อาจจะทำให้การวิเคราะห์พฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นผิดเพี้ยนไป

จากข้างต้น Degeneff et al. [1] ใช้วงจร RLC เพื่อจำลองแบบวงจรสมมูลแทนขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า วิธีการดังกล่าวต้องใช้ความรู้ความสามารถอย่างยิ่งยวดเพื่อที่จะทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งยากที่จะนำผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ามาใช้คำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่จะใช้ในการทดสอบ ทำการคำนวณค่า RL ในขดลวดแต่ละขดเพื่อใช้ในการจำลองการเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ความรู้การหาค่าพารามิเตอร์ภายในขดลวด

การจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้ทดสอบการลัดวงจรภายในของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยเทคนิคของ Chee-Mun Ong [1] โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส สองขดลวด ทำการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้ขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบ่งออกเป็นสามขดลวดแบ่งได้เป็นหนึ่งขดฝั่งหนึ่ง และฝั่งที่ทำการลัดวงจรภายในจะแบ่งออกเป็นสองขด ในหลักการนี้ถูกนำการจำลองและหาผลเฉลยในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

การจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้ในการทดสอบปรากฏการณ์ต่างๆ ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องที่กล่าวมาข้างต้น โดยจะทำการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสทดสอบลัดวงจรภายใน (Internal Fault) ซึ่งจะเกิดการแบ่งขดลวดออกเป็นสามขดสามารถนำมาวิเคราะห์สมการหม้อแปลงไฟฟ้าให้อยู่ ในรูปของ ฟลักซ์เชื่อมโยง (Flux Linkage) ฟลักซ์รั่วไหล (Leakage Flux) และรีลักซ์แตนซ์ (Reluctance) ในแกนเหล็ก

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ทำการทดสอบการลัดวงจรภายในหม้อแปลงระบบจำหน่ายขนาด 1.5 kVA แรงดันไฟฟ้าพิกัดที่ 120/240 V, 60 Hz สองขดลวด จำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลงตั้งไฟฟ้านี้  $R_1 = 0.25 \Omega$ ,  $R'_2 = 0.134 \Omega$ ,  $X_{l1} = 0.056 \Omega$ ,  $X'_{l2} = 0.056 \Omega$  และ  $X_{ml} = 708.8 \Omega$  พารามิเตอร์ทั้งหมดได้แปลงค่าให้ใช้ในขดลวดทางด้านปฐมภูมิแล้ว

การต่อวงจรหม้อแปลงไฟฟ้า (Switching-On a Healthy Transformer) หม้อแปลงไฟฟ้ามีขดลวดสองฝั่ง ขดลวดทางด้านปฐมภูมิต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับขนาด 120V และขดลวดทางด้านทุติยภูมิทำการเปิดวงจรเอาไว้ กระแสที่เกิดขึ้นทำการบันทึกผลทั้งขนาดและรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้า ฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 โดยเทียบอัตราส่วนแล้วจะได้ค่าเท่ากับ 0.7272

ทดสอบการจำลองการเกิดลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ ขดลวดทางด้านปฐมภูมิถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยทำการแบ่งส่วนหนึ่งออกเป็น 90% ของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 120 V ในส่วนที่สองแบ่งออกเป็น 10% ของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และทำการลัดวงจร โดยที่ทางด้านทุติยภูมิทำการเปิดวงจรเอาไว้ เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 จะมีค่าน้อยกว่า ฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ซึ่งเมื่อนำมาเทียบอัตราส่วนจะเห็นได้ว่ามีค่าเท่ากับ 0.05958

ทดสอบการจำลองการเกิดลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ ขดลวดทางด้านทุติยภูมิถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยทำการแบ่งส่วนหนึ่งออกเป็น 90% ของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ และต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 120 V ที่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ ในส่วนที่สองแบ่งออกเป็น 10% ของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ และทำการลัดวงจร เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรภายใน ฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 มีค่าน้อยกว่า ฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ซึ่งเมื่อนำมาเทียบอัตราส่วนจะเห็นได้ว่ามีค่าเท่ากับ 0.0355

เทคนิคการจำลองแบบหม้อแปลงของไฟฟ้า Chee-Mun Ong [1] ใช้สำหรับจำลองและวิเคราะห์พฤติกรรมต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส สองขดลวด ในขณะที่เกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการลัดวงจรขดลวดจะมีเพิ่มขึ้นมาอีกหนึ่งขดเป็นสามขด สามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ โดยใช้สมการฟลักซ์รั่วไหลและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ถูกนำมาใช้เพื่อการทดสอบเหล่านี้ โดยศึกษาพฤติกรรมที่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลในหม้อแปลงไฟฟ้าสภาวะปกติ และกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ให้เห็นถึงความแตกต่างที่เกิดขึ้น ขณะที่ยังไม่เกิดการลัดวงจร รูปคลื่นกระแสและฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 แต่กระแสรูปคลื่นไซน์ และฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 มีค่าน้อยลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลง

2. งานวิจัย แบบจำลองสถานะไม่เป็นเชิงเส้นและการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลง (Simulation of single phase nonlinear and hysteretic transformer with internal faults) [2] การวิจัยในครั้งต้องการแสดงให้เห็นถึงแบบจำลองการเกิดความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง โดยใช้วิธีสายส่ง (Transmission Line Method: TLM) และแบบจำลองของเจิลส์ อัลเธอร์ตัน (Jiles-Atherton Model) ช่วยอธิบายความเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างไม่เป็นเชิงเส้น ออกแบบโดยเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 kVA 11kV/220V จำลองการเกิดลัดวงจรภายในขดลวดลงดิน และเปรียบเทียบกับค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (Total Harmonic Distortion: THD) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะต่างๆ ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หลักของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งระบบการป้องกันและการวัดค่าทางปริมาณไฟฟ้าต่าง ๆ ล้วนมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ตลอดเวลา รวมถึงการพัฒนาระบบป้องกันและอุปกรณ์ตรวจวัดให้มีความแม่นยำอยู่ตลอดเวลา จากการสำรวจพบว่า ความเสื่อมสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า 70 - 80% เกิดจากการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า แทบทั้งสิ้นไม่ว่าจะเป็นการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า หรือการลัดวงจรภายในขดลวดลงดินของหม้อแปลงไฟฟ้าก็ตาม ดังนั้นการจำลองการเกิดลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งและสามารถวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่าง ๆ ได้ก่อนที่จะเกิดขึ้นจริง ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความเสื่อมสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า อาทิเช่น โปรแกรม MAGNET และ ANSOFT's Maxwell เป็นต้น อย่างไรก็ตามโปรแกรมที่กล่าวมาข้างต้นถึงจะจำลองแบบของหม้อแปลงไฟฟ้าได้จริง แต่ก็ยังไม่สามารถวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงสถานะไม่เป็นเชิงเส้นของค่าความต้านทานภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ดังนั้นวิธีการคำนวณโดยใช้เมทริกซ์จึงได้นำมาใช้ประยุกต์เข้ากับโปรแกรม ATP/EMTP แต่ก็ยังไม่ประสบผลสำเร็จได้ตามที่คาดหวังมากนัก ดังนั้น D.J.Wilcox [2] ได้เสนอแนวทางการใช้แบบจำลองเวลา (Time domain Modeling) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อแปลงจากโดเมนความถี่ให้อยู่ในรูปของโดเมนเวลาเพื่อที่โปรแกรม ATP/EMTP สามารถวิเคราะห์ผลได้ แต่ก็ยังทำได้ไม่เต็มมากนัก

ดังนั้นบทความนี้จึงต้องการเสนอการวิเคราะห์ผลที่เกิดจากการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้วิธีสายส่ง (Transmission Line Method: TLM) และแบบจำลองของเจิลส์ อัลเธอร์ตัน (Jiles-Atherton Model) เพื่อแสดงให้เห็นลักษณะของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) และการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อศึกษาฮิสเทอรีซิส เลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองขดลวด กำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์แบ่งออกเป็นค่าความต้านทาน ( $R$ ) และค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) กำหนดให้  $p, s$  เป็นตัวย่อแทนขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ กำหนดให้  $R_p$  และ  $L_{pp}$  เป็นค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวด  $i$  และ  $M_{ij}$  คือค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวด  $i$  และ  $j$  จะได้ว่า

$$[R] = \begin{bmatrix} R_p & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [L] = \begin{bmatrix} L_{pp} & M_{ps} \\ M_{sp} & L_{ss} \end{bmatrix}$$

กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในรูปเมตริกซ์ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} = ([R] + j\omega[L]) \begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายไฟปกติจะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} L'_{pp} & M'_{ps} & N_p L_m \\ M'_{sp} & L'_{ss} & N_s L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_s \\ I_m \end{bmatrix}$$

สมการแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดลงดิน

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} L'_{aa} & M'_{ab} & M'_{as} & N_a L_m \\ L'_{ba} & M'_{bb} & M'_{bs} & N_b L_m \\ L'_{sa} & M'_{sb} & M'_{ss} & N_s L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_s \\ I_m \end{bmatrix}$$

แบบจำลอง TLM (TLM Modeling) – สมการหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถคำนวณโดยใช้วิธีสายส่งในรูปของโดเมนเวลา ค่าความเหนี่ยวนำในสมการถูกกำหนดจากสมการการลัดวงจรในสายส่ง แปลงให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า และค่าความต้านทานอนุกรมกัน

$$V_n = Z_L I_n + 2V_n^i$$

$$V_n = V_n^i + V_n^r$$

$$V_{n+1}^i = -V_n^r$$

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการเสื่อมสภาพเกิดจากการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกแบ่งจำนวนขดเพิ่มมาอีกหนึ่งขด

$$f_1 = Z_{aa}I_a + Z_{ab}I_b + Z_{as}I_s + N_a Z_m I_m - V_s + 2(V_{aa}^i + V_{a2}^i + V_{ab}^i + N_a V_m^i) = 0$$

$$f_2 = Z_{sa}I_a + Z_{bb}I_b + Z_{bs}I_s + N_b Z_m I_m + 2(V_{bs}^i + V_{ba}^i + V_{bb}^i + N_b V_m^i) = 0$$

$$f_3 = Z_{sa}I_a + Z_{ab}I_b + (Z_{ss} + Z_{load})I_s + N_s Z_m I_m + 2(V_{sa}^i + V_{ss}^i + V_{sb}^i + N_s V_m^i) = 0$$

ทำให้อยู่ในรูปเมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix)

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial I_a} & \frac{\partial f_1}{\partial I_b} & \frac{\partial f_1}{\partial I_s} \\ \frac{\partial f_2}{\partial I_a} & \frac{\partial f_2}{\partial I_b} & \frac{\partial f_2}{\partial I_s} \\ \frac{\partial f_3}{\partial I_a} & \frac{\partial f_3}{\partial I_b} & \frac{\partial f_3}{\partial I_s} \end{bmatrix}$$

แบบจำลองโดเมนเวลาขณะเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยคำนวณร่วมกับแบบจำลองเจิลส์ อัลเธอร์ตัน (Jiles – Atherton Model) นำผลจากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับการทดลองอื่น ๆ มีแนวโน้มในทางเดียวกัน ซึ่งอ้างอิงร่วมกับผลจำลองจากการวิเคราะห์ THD ลักษณะของฮีสเทอรีซิสและพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการลัดวงจรสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อออกแบบระบบป้องกันให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า และช่วยพัฒนาด้านซ่อมบำรุงรักษาได้

3. งานวิจัย แบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสโดยใช้ FE Based (*FE Based Modeling of single phase distribution transformers with winding short circuit faults*) [3] การวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างแบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้มีความแม่นยำ และรวดเร็ว กระแสไฟฟ้าที่วิ่งในขดลวดอธิบายถึงสถานะไม่เป็นเชิงเส้นของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า และนำฟลักซ์เชื่อมโยง (flux linkage) มาใช้อธิบายอนุกรม FE ในแบบจำลอง

หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสถูกใช้งานในระบบไฟฟ้าอย่างแพร่หลาย จากผลสำรวจพบว่า 70 - 80% สาเหตุของการเสื่อมสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดจากการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า เพราะเหตุนี้ การศึกษาการตรวจจับ และระบบรีเลย์ป้องกันเพื่อป้องกันการเกิดความผิดปกติในหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

แบบจำลอง FE based [3] ออกแบบมาเพื่อวิเคราะห์การเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส และสามารถพัฒนาต่อเพื่อศึกษา และวิเคราะห์การเกิดความผิดปกติในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสต่อไปได้

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการออกแบบชนิดหนึ่งเฟสพิกัด 25 kVA ความถี่ 60 Hz มีการพันขดลวดแบบ shell-type ออกแบบให้มีขดลวดสามขดทางด้านปฐมภูมิหนึ่งขด และทางด้านทุติยภูมิสองขด แรงดันไฟฟ้าพิกัด 7200 V/240 V/120 V อัตราขยาย 780/26/13 ออกแบบการลัดวงจรเป็นสองชนิดคือการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า และการลัดวงจรภายในขดลวดลงดินของหม้อแปลงไฟฟ้า

จุดประสงค์ในการสร้างแบบจำลอง FE-based [3] เพื่อนำมาใช้งานร่วมกับ MATLAB/Simulink เพื่อสามารถอธิบายความหลากหลายของฟลักซ์เชื่อมโยง (flux linkage) กับกระแสไฟฟ้ากระตุ้น เพื่อคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดการลัดวงจร สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ เช่น การเพิ่มจำนวนขดลวดที่ทำการลัดวงจร จากการศึกษาตามแบบจำลองที่กล่าวไว้ ลักษณะการเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

แบบจำลอง FE-based [3] ใช้เพื่อจำลองการเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายพฤติกรรมของกระแสกระตุ้นมีความแม่นยำ และรวดเร็วเพื่อสะดวกต่อการออกแบบระบบป้องกัน

4. งานวิจัย *ผลทดลองการลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย (Experimental Results from Short-Circuit Faults on a Distribution Transformer)* [4] เพื่อการศึกษาพฤติกรรมของค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ทั้งทางด้านปฐมภูมิ และทางด้านทุติยภูมิ โดยเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 kVA, 7200V/240V/120V ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีขดลวดสองขด มีแทปแยกทางด้านปฐมภูมิ 12 แทปเพื่อศึกษาการเกิดการลัดวงจรขณะทำการทดสอบ การทดลองได้จัดขึ้นที่ห้องทดลองมหาวิทยาลัย Texas A&M ใช้เวลาในการวิจัยเป็นระยะเวลา 19 เดือน ทั้งนี้ผลงานวิจัยชิ้นต้องการแสดงให้เห็นถึงการติดตั้งการทดลองรวมถึงสรุปผลที่เกิดขึ้นในการทบทวนทดลอง

การศึกษาค้นคว้าวิจัยที่ มหาวิทยาลัย TEXAS A&M มุ่งเน้นไปที่การศึกษาการเกิดการผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง โดยการลัดวงจรภายในหม้อแปลงเป็นหัวใจสำคัญในการศึกษาค้นคว้าในหัวข้อนี้ โดยทำการศึกษาลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้นที่ขั้วของหม้อแปลงทั้งด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ เพื่อวิเคราะห์

การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของทั้งสองด้านขณะที่เกิดความผิดพลาด โดยศึกษาจากหม้อแปลงระบบจำหน่ายขนาดหนึ่งเฟส เพื่อดู และจดบันทึกเมื่อทำการลัดวงจรภายในหม้อแปลงขณะทำการทดลอง

โครงการนี้นำเสนอขั้นตอนการทดลอง และผลลัพธ์ของการเกิดการลัดวงจรภายในของหม้อแปลงขณะที่อยู่ในสภาวะปกติจนถึงช่วงที่เกิดการลัดวงจรในหม้อแปลงซึ่งจะแสดงผล และพฤติกรรมต่างที่เกิดขึ้นขณะที่เกิดการลัดวงจร โดยผลลัพธ์ที่ได้รับรวมถึงพฤติกรรมเกิดการไฟกระชาก (arcing) เป็นลักษณะทั่วไปเมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบ

ส่วนที่สองอธิบายคุณลักษณะของหม้อแปลงและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ส่วนที่สามขั้นตอนการทดลอง ส่วนที่สี่วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในการทดลอง ส่วนที่ห้าเรียบเรียงผลที่ได้จากการสังเกตและสืบหาในการทดลองและขั้นตอนสุดท้ายคือสรุปผลการเกิดจากการทดลอง

#### ขั้นตอนการทดลอง

ทำการทดลองที่ห้องทดลองระบบไฟฟ้ากำลัง PSAL ที่มหาวิทยาลัย TEXAS A&M เริ่มจากการศึกษาทฤษฎีการเกิดและพฤติกรรมของการเกิดการลัดวงจรภายในของหม้อแปลง อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดลอง หม้อแปลงระบบจำหน่ายหนึ่งเฟส ขนาด 25kVA แรงดัน 7200V/240V/120V 60Hz โดยทำการแยกขดลวดออกจากทั้งทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ เพื่อสามารถทดสอบการเกิดการลัดวงจรในหม้อแปลงได้ในตำแหน่งต่าง ๆ ขดลวดทางด้านปฐมภูมิมี่ 780 ขด และทางด้านทุติยภูมิมี่ 26 ขด โดยต่อโหลดที่ 75%-110% ของ 25kW ซึ่งต่อโหลดเข้าทางฝั่งทุติยภูมิ Potential transformer (PTs), Current Transformer (CTs), และ Current Monitors (CMs) เพื่อทำการลดค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง และสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของทั้งสองด้านของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ในการศึกษาทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงได้ทำการทดลองหลายต่อหลายครั้งในกลุ่มแรก ๆ ได้มีการใช้ data acquisition ซึ่งทำงานสองขั้นตอน ขั้นแรกการบันทึกค่าโดยใช้ อุปกรณ์บันทึก RACAL และทำการสุ่มค่าในระบบดิจิตอลเพื่อบันทึกค่าในแถบ VHS โดยเมื่อทำการบันทึกเสร็จ จะทำการแปลงค่าในอยู่ในรูปแบบการจำลองเป็น text file เพื่อการวิเคราะห์ต่อไป ในส่วนของการเก็บผลที่ได้จากการทำการทดลองถูกปรับเปลี่ยนแก้ไขกันเรื่อยมาตั้งแต่ปี 1998 จนถึงปัจจุบัน

การทดลองเป็นไปตลอด 19 เดือน ทำการทดลอง 161 ครั้ง เพื่อจำลองการเกิดการลัดวงจรในลักษณะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นทั้งทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ โดยการทดลองสังเกตได้ว่าการเกิดความผิดพลาดจะประกอบไปด้วย คาบเวลาของรูปคลื่นกระแสไม่คงที่ ไม่เกิดการสมมาตรในรูปคลื่น, และกระแสเกิดการแกว่งอย่างรุนแรง ซึ่งจากการทดลองสามารถบันทึกค่ากระแสที่เกิดการอาร์ก (arc) ได้

ในการสันนิษฐานขั้นต้นเมื่อสังเกตจากอัตราส่วนระหว่างขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิขณะสภาวะปกติอยู่ที่ 29.95 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงอยู่ที่ 30.0 อย่างไรก็ตามเมื่อทำการลัดวงจรในหม้อแปลงจะสังเกตได้ว่าอัตราส่วนต่อขดของหม้อแปลงเปลี่ยนเป็น 30.3 ซึ่งนั่นส่งผลให้ขดลวดทางด้านทุติยภูมิมี่พฤติกรรมที่ผิดปกติ ในการทดลองทดลองอย่างต่อเนื่องจะสังเกตได้ว่าฉนวนที่ห่อหุ้มขดลวดเริ่มมีลักษณะเสื่อมสภาพลง จากการสังเกตกลิ่นและเสียงที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง

ในการทดลอง ผลจากการทดลองจะอยู่ในรูปรูปคลื่นของเวลา, ผลของการเสื่อมสภาพลงของฉนวนที่เกิดจากการลัดวงจร รวมถึงพฤติกรรมเกิดการลัดวงจรในการทดลอง

5. งานวิจัย แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเกิดความผิดปกติ (Simulation of Incipient Transformer Faults) [5] เป็นการจำลองหม้อแปลงจำหน่าย (Distribution transformer) แบบหนึ่งเฟสสองขดลวด พิกัด 25kVA ระดับแรงดัน 7200V/240V โดยใช้โปรแกรม ATP เพื่อวิเคราะห์กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นโดยมีการจำลองทั้งทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ โดยที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีการต่อโหลดต้านทานขนาด 2.304  $\Omega$  ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของสองขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติสามารถหาได้จากโปรแกรม ATP BCTRAN เป็นแบบจำลองหนึ่งในโปรแกรม ATP ที่สามารถแสดงค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำที่เป็นเชิงเส้น โดยการป้อนค่าความถี่ ค่าจากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจรและการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าแฝงไม่นำเอามาพิจารณาในงานวิจัยนี้ จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำแสดงเป็นเมทริกซ์ขนาด 2x2 ที่เป็นเมทริกซ์ 2x2 นั้นเนื่องมาจากในสภาวะปกติหม้อแปลงไฟฟ้าถูกแบ่งออกเป็นสองขดลวดคือทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \quad [L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} \\ M_{21} & L_2 \end{bmatrix}$$

แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น จะต้องแบ่งออกเป็นขดลวดย่อย (Sub-coil) ขนาดของเมทริกซ์ความต้านทานและความเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ต้องแก้ไขค่าในเมทริกซ์ใหม่โดยใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ขนาดของเมทริกซ์ที่เปลี่ยนไปจะเป็นไปตามลักษณะการเกิดลัดวงจร เพื่อหาค่ากระแสลัดวงจรจากโปรแกรมโดยการสร้างวงจร และนำไปสร้างกราฟต่อไป และที่น่าสนใจคือได้มีการทดลองเทียบกับผลที่ได้มีการจำลองในโปรแกรมสุดท้ายมีการสรุป และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมและผลที่ได้จากการทดลองโดยผลจากการทดลองมีการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

6. งานวิจัย การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหาความเสื่อมสภาพของหม้อแปลงระบบจำหน่าย (Experimental Investigation of Internal Short Circuit Faults Leading to Advanced Incipient Behavior and Failure of a Distribution Transformer) [6] เมื่อปี ค.ศ. 2004 งานวิจัยนี้นำเสนอจะเป็นมีกล่าวถึงการพัฒนาการทดลองของทางผู้วิจัยรวมถึงขั้นตอนการทดลอง และผลลัพธ์ของการเกิดการลัดวงจรภายในของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะที่อยู่ในสภาวะปกติจนถึงช่วงที่เกิดการลัดวงจร ในหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งจะแสดงผลและพฤติกรรมต่างที่เกิดขึ้นขณะที่เกิดการลัดวงจร โดยผลลัพธ์ที่ได้รวมถึงพฤติกรรมการเกิดอาร์ก (arcing) เป็นลักษณะทั่วไปเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ ส่วนที่สองอธิบายคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้า และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ส่วนที่สามขั้นตอนการทดลอง ส่วนที่สี่วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในการทดลอง ส่วนที่ห้าเรียบเรียงผลที่ได้จากการสังเกตและสืบหาในการทดลองและขั้นตอนสุดท้ายคือสรุปผลการเกิดจากการทดลอง

การทดลองทำขึ้นที่ห้องทดลองระบบไฟฟ้ากำลัง PSAL ที่ มหาวิทยาลัย TEXAS A&M เริ่มจากการศึกษาทฤษฎีการเกิด และพฤติกรรมของการเกิดการลัดวงจรภายในของหม้อแปลงไฟฟ้า อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดลอง หม้อแปลงระบบจำหน่ายหนึ่งเฟส ขนาด 25 kVA แรงดัน 7200V/240V/120V 60 Hz โดยทำการแยกขดลวดออกจากทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ เพื่อสามารถทดสอบการเกิด

การลัดวงจรในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ในตำแหน่งต่าง ๆ ขดลวดทางด้านปฐมภูมิมี 780 ขด และทางด้านทุติยภูมิมี 26 ขด โดยต่อโหลดที่ 75%-110% ของ 25 kW ซึ่งต่อโหลดเข้าทางด้านทุติยภูมิ ใช้หม้อแปลงแรงดัน (Potential Transformer: PT) และหม้อแปลงกระแส (Current Transformer: CT) เพื่อทำการลดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง และสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของทั้งสองด้านของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ในการศึกษาทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ทำการทดลองหลายต่อหลายครั้งในกลุ่มแรก ๆ ได้มีการใช้ data acquisition ซึ่งทำงานสองขั้นตอน ขั้นแรกการบันทึกค่าโดยใช้ อุปกรณ์บันทึก RACAL และทำการสุ่มค่าในระบบดิจิทัลเพื่อบันทึกค่าในเทป VHS โดยเมื่อทำการบันทึกเสร็จสิ้นจะทำการแปลงค่าในอยู่ในรูปแบบการจำลองเป็น text file เพื่อการวิเคราะห์ต่อไป ในส่วนของการเก็บผลที่ได้จากการทำการทดลองถูกปรับเปลี่ยนแก้ไขกันเรื่อยมาตั้งแต่ปี 1998 จนถึงปัจจุบัน

โครงการวิจัยนี้สนใจลักษณะและพฤติกรรมการเกิดการลัดวงจรในหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในการทดลองโดยต่อเข้ากับภาระทางไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าที่พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ กระแสไฟฟ้าจะพุ่งสูงขึ้นซึ่งจะมีขนาดกระแสขึ้นอยู่กับจำนวนขดลวดที่ทำการลัดวงจร หรืออีกนัยหนึ่งก็คือยังมีขดลวดที่ถูกลัดวงจรมาก ๆ กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิจะมีค่าพุ่งสูงขึ้นด้วย ถึงอย่างไรแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแต่เมื่อเกิดการลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิจะมีค่าสูงขึ้น ในทางกลับกันกระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิจะมีค่าน้อยลง พฤติกรรมการเกิดการลัดวงจร แสดงอยู่ในรูปแบบของกราฟในการจำลองสถานการณ์การเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า

7. งานวิจัย *คุณลักษณะของปริมาณทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า (Characteristics of transformer parameters during internal winding faults based on experimental measurements)* [7] การศึกษาหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสเพื่อศึกษาพฤติกรรมของปริมาณทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเกิดการลัดวงจรภายในขดลวด โดยออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ทำการทดสอบมีแทปแยกออกมาเพื่อทำการทดสอบลัดวงจรภายในขดลวด และบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ทำการทดลองกับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสพิกัด 25 kVA 60 Hz 7200V/240V/120V จ่ายโหลด 25 kW แล้วทำการทดลองลัดวงจรทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำเพื่อป้องกันความเสียหายอันเนื่องจากการลัดวงจร หม้อแปลงไฟฟ้าถูกออกแบบให้มีแทปแยกทั้งด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิโดยทำการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า และทำการลัดวงจรภายในขดลวดลงดินของหม้อแปลงทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

การจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ (variable transformer) ขนาด 140V จ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าและใช้เครื่องวัดดิจิทัลเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโดยเก็บผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองในโปรแกรม ATP เพื่อใช้ในการจำลองค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดการลัดวงจรในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส และพัฒนาเพื่อทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสต่อไป

ผลที่ได้จากการทำการทดลองพบว่าในกรณีที่ทำการลัดวงจรทางฝั่งปฐมภูมิ กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิเพิ่มขึ้นทีละน้อยเมื่อทำการเพิ่มจำนวนขดลวดที่ทำการลัดวงจร แต่อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิมียังคงอยู่ที่ 100 โวลต์ ทำให้กระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเพิ่มสูงขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ลัดวงจรมีค่าสูงด้วย แรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อเพิ่มขดลวดที่ทำการลัดวงจร ผลที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองมีแนวโน้มที่ตรงกัน ในอนาคตจะมีการออกแบบเพื่อทำการทดลองทำการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อศึกษาตำแหน่งการเกิดความผิดปกติของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อไป

จากงานวิจัยข้างต้น โดยส่วนใหญ่เป็นการทดลองโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และมีการทดลองโดยมหาวิทยาลัย Texas A&M ที่ทำการทดลองโดยการทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยเหตุนี้เองจึงเป็นแรงบันดาลใจให้ทำการสร้างชุดการทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส พิกัด 15 kVA แรงดันไฟฟ้า 220/440 โวลต์ ทำการแทบขดลวดด้านไฟฟ้าแรงดันสูงทุก ๆ 10 เพอร์เซ็นต์หรือ ทุก ๆ 44 โวลต์ และในการทดลองได้ทำการทดลองโดยใช้โหลดความต้านทานความเหนี่ยวนำ (R-L) การทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ เพื่อศึกษาพฤติกรรม และความรุนแรงของการเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปเป็นข้อมูลในการปรับปรุงการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า และนำไปพัฒนาการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อสร้างชุดการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง
2. เพื่อศึกษาการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง
3. เพื่อพัฒนาทักษะผู้ศึกษาและต่อยอดองค์ความรู้ให้พัฒนาดีกว่าเดิม
4. เพื่อนำผลที่ได้จากการทดลองไปออกแบบการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าต่อไป

## 1.3 ขอบเขต และข้อกำหนดของปริญญานิพนธ์

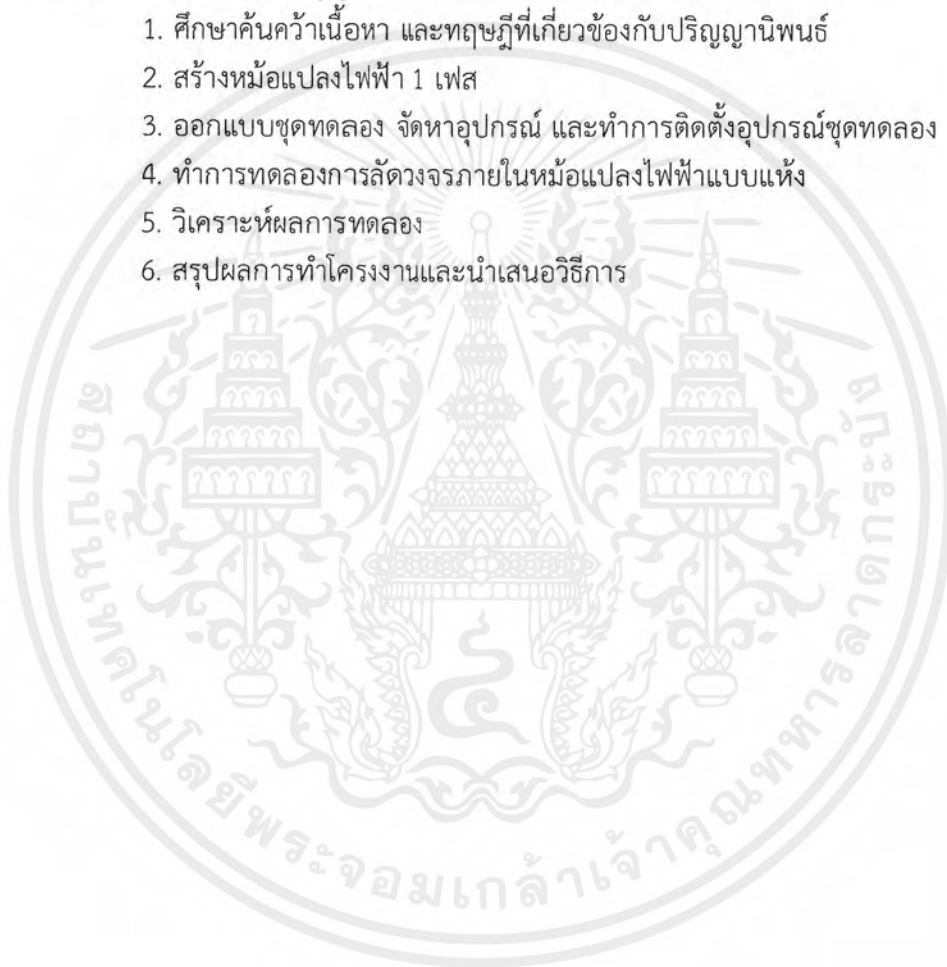
ปริญญานิพนธ์นี้จะทำการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง ซึ่งเป็นการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด และการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน เท่านั้น โดยทำการทดลองกับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส พิกัด 15 kVA พิกัดแรงดัน 220/440 โวลต์ ที่ทำการแทบขดลวดด้านไฟฟ้าแรงดันสูงทุก ๆ 10 เพอร์เซ็นต์ หรือ ทุก ๆ 44 โวลต์ โดยได้ทำการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 27.5/55 โวลต์ จ่ายโหลดความต้านทานความเหนี่ยวนำ (R-L) ขนาด 155.4 วัตต์เท่านั้น โดยมีข้อจำกัดด้านอุปกรณ์การทดลอง เนื่องจากอุปกรณ์ทางด้านปฐมภูมิตนกระแสพิกัดได้ที่ 30 แอมแปร์

#### 1.4 วิธีการที่ใช้ในปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาค้นคว้าเนื้อหาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้า การลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ค่ากระแสลัดวงจร มิเตอร์ แมกเนติกคอนแทคเตอร์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ฟิวส์ การเลือกหม้อแปลงกระแส ออกแบบชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุม เริ่มต้นการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า การเลือกขนาดและประเภทของโหลด เป็นต้น
2. ออกแบบชุดการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง
3. วิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจากผลการทดลอง

#### 1.5 แผนการดำเนินปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาค้นคว้าเนื้อหา และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์
2. สร้างหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส
3. ออกแบบชุดทดลอง จัดหาอุปกรณ์ และทำการติดตั้งอุปกรณ์ชุดทดลอง
4. ทำการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง
6. สรุปผลการทำโครงการและนำเสนอวิธีการ





## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำปริญญานิพนธ์

### ด้านการวิจัย

- สามารถวิเคราะห์การเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้
- วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากโหลด มุมเริ่มต้นที่ทำการลัดวงจร และระดับแรงดันไฟฟ้า เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
- สามารถวินิจฉัยความรุนแรงกับการเกิดการลัดวงจร

### ด้านการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า

- เพื่อเป็นข้อมูลนำไปใช้ในการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า
- เพื่อนำไปพัฒนาการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้นต่อไป



## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า

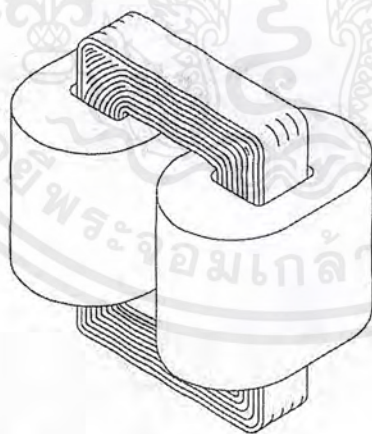
หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายทอดพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับวงจรหนึ่งไปสู่อีกวงจรหนึ่ง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ เพื่อใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระยะทางไกล ๆ และเปลี่ยนจากไฟฟ้าแรงดันสูงเป็นไฟฟ้าแรงดันต่ำเพื่อใช้ในการจำหน่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับผู้บริโภค ซึ่งใช้หลักการของวงจรแม่เหล็กที่กระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับจึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น (Faraday's law)

### 2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

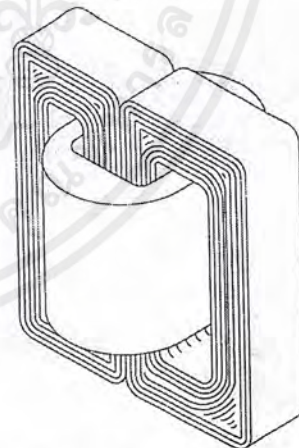
ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้ามี 3 ส่วนคือ

1. แกนเหล็กหม้อแปลง (Transformer core)
2. ขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding)
3. ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding)

แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบขดลวดล้อมแกนหรือหม้อแปลงไฟฟ้าแบบคอร์ (Core type) และ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแกนล้อมขดลวดหรือแบบเชลล์ (Shell type) ซึ่งโครงสร้างทั้งสองแบบนี้แตกต่างกันในด้านลักษณะของวงจรแม่เหล็ก และลักษณะการวางตำแหน่งของขดลวดทั้ง 2 ชุด



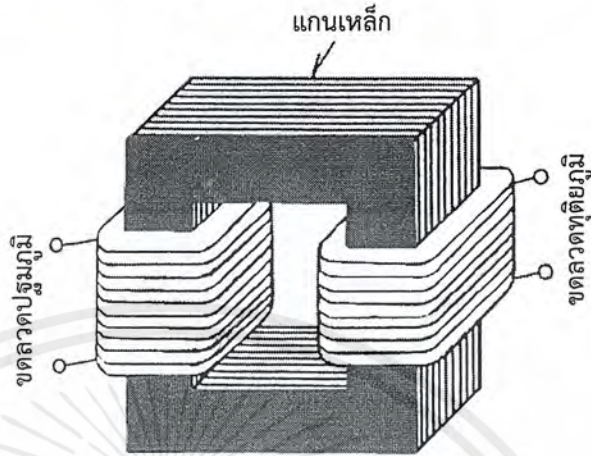
SINGLE - PHASE CORE - TYPE TRANSFORMER



SINGLE - PHASE SHELL - TYPE TRANSFORMER

รูปที่ 2.1 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแกน (Core type) และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปลือกกรอบ (Shell type)

หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดที่พันอยู่กับแกนเหล็ก ชุดของขดลวดที่ต่อไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเรียกว่าขดปฐมภูมิ (Primary winding) ขดลวดอีกชุดหนึ่งที่ต่อไปยังภาระทางไฟฟ้า (Load) โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมอยู่เรียกว่าขดทุติยภูมิ (Secondary winding)

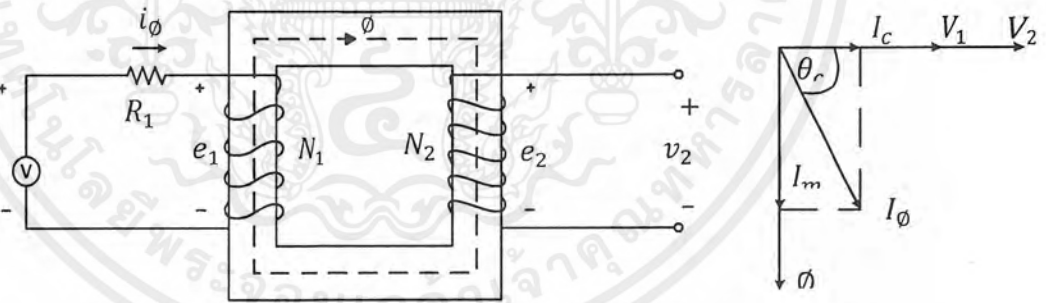


รูปที่ 2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

## 2.3 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

### 2.3.1 สภาวะไม่มีภาระทางไฟฟ้า (No Load Condition)

เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (Primary,  $N_1$ ) และขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (Secondary,  $N_2$ ) อยู่ในสภาพเปิดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

จะทำให้เกิดค่ากระแสปริมาณหนึ่งไหลในขดลวด ( $N_1$ ) เรียกว่า กระแสกระตุ้น  $i_0$  (Exciting current) และมีผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Inducing voltage) ขึ้นที่ขดลวดทั้งสอง ดังนี้

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} = N_1 \omega \phi_m \cos \omega t = E_{m1} \cos \omega t$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} = N_2 \omega \phi_m \cos \omega t = E_{m2} \cos \omega t$$

เมื่อ  $\phi : \phi_m \sin \omega t$        $\phi_m$  : Maximum magnetic flux

กำหนดให้  $E_1, E_2$  เป็นค่าประสิทธิผล (rms) ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $e_1, e_2$  และ  $\omega = 2\pi f$

$$E_1 = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N_1 \phi_m = 4.44 f N_1 \phi_m$$

$$E_2 = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N_2 \phi_m = 4.44 f N_2 \phi_m$$

เมื่อ  $\phi_m = B_m A_c$  จะได้

$$E_1 = 4.44 f N_1 B_m A_c$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 B_m A_c$$

จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในรูปอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า อัตราส่วนแรงดัน (Voltage ratio) หรือ อัตราส่วนของจำนวนรอบของขดลวด (Turns ratio) ดังนี้

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

จากรูปที่ 2-3 สามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ (Primary) และทุติยภูมิ (Secondary) ได้ดังนี้

$$V_1 = R_1 i_\phi + e_1$$

ในทางปฏิบัตินั้นพบว่าค่า  $R_1$  และ  $i_\phi$  มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จะได้ว่า  $V_1 \approx e_1$

$$V_2 = e_2$$

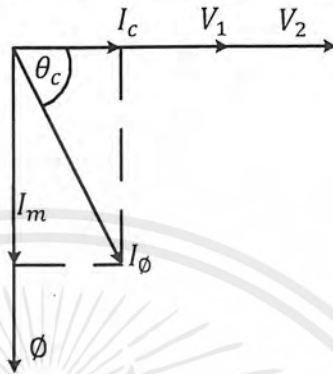
จะได้ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้างี้

$$\frac{V_1}{V_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

เมื่อ  $V_1$  และ  $V_2$  เป็นค่าประสิทธิผล (rms) ของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ (Terminal Voltage) ที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ (Primary) และ ด้านทุติยภูมิ (Secondary) ตามลำดับ

ในขณะที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้า (No Load) หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า มีเพียงกระแส  $i_0$  เท่านั้นซึ่งประกอบด้วย

1. กระแส  $I_m$  (Magnetizing Current) เป็นค่ากระแสที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ  $e_1$  และ  $e_2$
2. กระแส  $I_c$  (Core loss Current) เป็นค่ากระแสที่ทำให้เกิดค่าสูญเสียในแกนเหล็ก ดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของค่ากระแสกระตุ้น

จากรูปที่ 2.4 จะได้ความสัมพันธ์ของค่ากระแสดังนี้

$$I_\phi = I_c + I_m$$

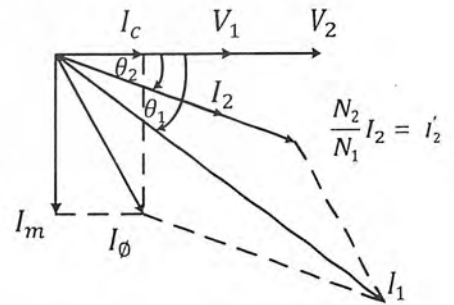
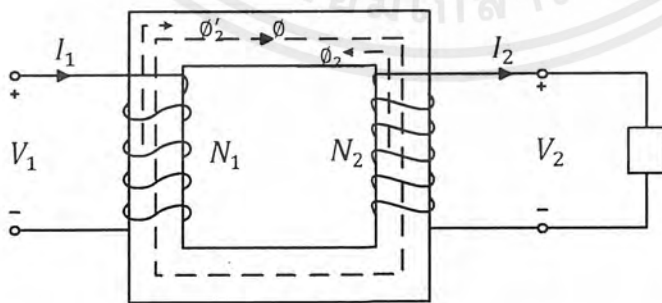
$$I_c = I_\phi \cos\theta_c$$

$$I_m = I_\phi \sin\theta_c$$

ดังนั้นค่าสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{core}$  or  $P_c$ ) สามารถหาได้จากสมการ

$$P_c = V_1 I_\phi \cos\theta_c$$

### 2.3.2 สภาวะมีภาระทางไฟฟ้า (On Load Condition)



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะมีภาระทางไฟฟ้า

เมื่อต่อโหลดเข้ากับขดลวดด้านทุติยภูมิ (Secondary) กระแส  $I_0$  จะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ( $N_1 I_0$ ) ขึ้น และทำให้เกิดฟลักซ์เคลื่อนตัวไปตัดขดลวดด้านทุติยภูมิ (Secondary) จึงทำให้เกิด  $V_2$  ขึ้น และ  $V_2$  จะไปสร้างกระแส  $I_2$  ขึ้นและทำให้เกิด ( $N_2 I_2$ ) และ  $\phi_2$  และเมื่อ  $\phi_2$  เคลื่อนตัวตัดขดลวดด้านปฐมภูมิ (Primary) จึงทำให้เกิด  $I_2'$  ขึ้น กระแส  $I_2'$  ที่เกิดขึ้นนี้จะไปสร้าง ( $N_1 I_2'$ ) ขึ้นมาชดเชยกับค่า ( $N_2 I_2$ ) และสร้าง  $\phi_2'$  ที่มีขนาดเท่ากับ  $\phi_2$  จากนั้นก็จะกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$N_2 I_2 = N_1 I_2'$$

ดังนั้น ได้ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนกระแสไฟฟ้า (Current ratio) ดังนี้

$$\frac{I_2'}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

และจะได้

$$I_1 = I_0 + I_2'$$

ดังนั้น ถ้ากำหนดให้ค่ากระแสกระตุ้น  $I_0$  มีค่าน้อยมาก (ไม่เกิน 5% ของกระแสพิกัด) จะสามารถประมาณได้ว่าเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ (Ideal Transformer)

$$I_1 \approx I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2$$

และ อัตราส่วนกระแส (Current Ratio) คือ

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า

$$\frac{V_1}{V_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

จากหลักการทำงานพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถสรุปได้ว่า

1. ในสภาวะไม่มีภาระทางไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า มีเพียงกระแส  $I_0$  เท่านั้นเพื่อใช้สร้าง  $\phi$  ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่รับเข้ามา ( $V_1 I_0$ ) จะสูญเสียไปในรูปของความร้อนที่แกนเหล็ก  $P_c = V_1 I_0 \cos \theta_c$
2. ในสภาวะมีภาระทางไฟฟ้า มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ (Secondary) เท่ากับ  $V_2 I_2$  ซึ่งส่งผ่านมาในรูปของค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากด้านปฐมภูมิ (Primary) และการสูญเสียที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นในแกนเหล็ก (Core loss) และในลวดทองแดง (Copper loss)

## 2.4 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า (Determining the Values of Components in The Transformer Model)

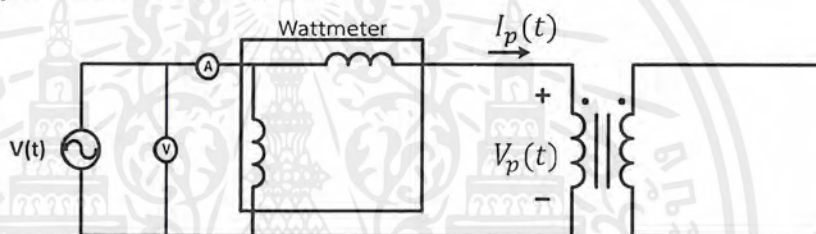
ในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์สมมูล (Equivalent Impedance  $-Z_{eq}$ ) ของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น ไม่สามารถนำเอาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของขดลวดทั้งสองขดมารวมกันโดยตรงได้ แต่สามารถใช้วิธีการที่เรียกว่า ถ่ายทอด (Transfer) จากขดลวดด้านหนึ่งไปยังขดลวดอีกด้านหนึ่งได้ ดังหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งสามารถหาค่าได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนี้

- การทดสอบแบบวงจรมืด (Open-circuit test)
- การทดสอบแบบปิดวงจรมืด (Short-circuit test)

### 2.4.1 การทดสอบแบบเปิดวงจรมืด (Open circuit test) เป็นการทดสอบเพื่อ

- หาค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss)
- หาค่า  $R_c$ ,  $X_m$  ของแกนเหล็ก
- เมื่อทราบค่า  $R_c$ ,  $X_m$  ก็สามารถหาค่า  $I_0 = I_c + I_m$  เพื่อนำไปหาค่ากระแสทางด้าน

ปฐมภูมิได้ดังสมการ  $I_1 = I_0 + I_2'$



รูปที่ 2.6 การทดสอบแบบเปิดวงจรมืด

โดยปกติในการทดสอบแบบนี้จะนิยม เปิดวงจรมืดทางด้านแรงดันสูงไว้ แล้วทำการปรับค่าแรงดัน  $v(t)$  ที่แหล่งจ่ายไฟจนกระทั่งวัดค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงดันต่ำได้เท่ากับพิกัดของหม้อแปลง ที่ความถี่เดียวกัน แล้วบันทึกผลการทดสอบ  $V_{oc}$ ,  $I_{oc}$ ,  $P_{oc}$

ค่าที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจรมืด สามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$P_{oc} = V_{oc} I_{oc} \cos \theta_{oc}$$

$$\cos \theta_{oc} = \frac{P_{oc}}{I_{oc} V_{oc}}$$

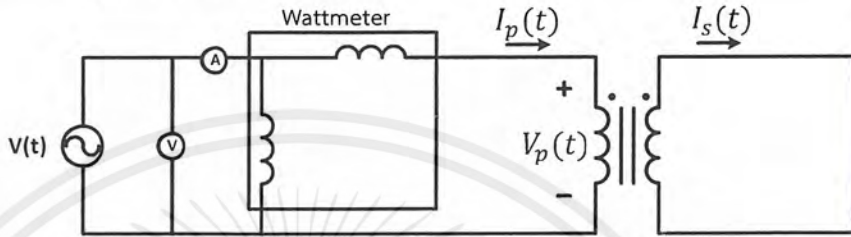
$$I_c = I_{oc} \cos \theta_{oc}$$

$$I_m = I_{oc} \sin \theta_{oc}$$

$$R_c = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} \quad X_m = \frac{V_{oc}}{I_m}$$

2.4.2 การทดสอบแบบลัดวงจร (Short circuit test) เป็นการทดสอบเพื่อ

- หาค่าการสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper loss)
- หาค่า  $R_{eq}$ ,  $X_{eq}$  และ  $Z_{eq}$  ของหม้อแปลง
- เมื่อทราบค่า  $Z_{eq}$  ก็สามารถหาค่าแรงดันตกคร่อมหม้อแปลงไฟฟ้าและ Voltage Regulation ของหม้อแปลงได้



รูปที่ 2.7 การทดสอบแบบลัดวงจร

โดยปกติในการทดสอบแบบนี้นิยมลัดวงจรทางด้านแรงดันต่ำไว้ แล้วทำการปรับค่าแรงดัน  $v(t)$  ที่แหล่งจ่ายไฟ (ประมาณ 5-10% ของแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด) จนกระทั่งวัดค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้าแรงดันสูงได้เท่ากับกระแสพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่ความถี่เดียวกัน แล้วบันทึกผลการทดสอบ  $V_{sc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{sc}$

ซึ่งค่า  $P_{sc}$  ที่อ่านได้ คือ ค่าการสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper loss) ที่พิกัดโหลด (Full load) ส่วนการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) มีค่าน้อยมาก

ค่าที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร สามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$P_{sc} = V_{sc} I_{sc} \cos \theta_{sc}$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \qquad R_{sc} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2}$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$$

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$$

ข้อมูลจากการทดสอบแบบเปิดวงจรไม่ต้องเปลี่ยนแปลงค่า แต่ข้อมูลจากการทดสอบแบบลัดวงจรซึ่งทดสอบด้านไฟฟ้าแรงสูงจะต้องทำการเปลี่ยนค่าให้มาอยู่ทางด้านไฟฟ้าแรงต่ำ

$$R'_{eq} = a^2 R_{eq2}$$

$$X'_{eq} = a^2 X_{eq2}$$

## 2.5 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง (Dry Type Transformer)

### 2.5.1 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งแบ่งตามลักษณะโครงสร้างภายนอกได้เป็น 3 แบบด้วยกันคือ

1. Conventional or Open-type
2. Impregnated type
3. Resin encapsulated or Cast resin

แบบที่ 1 Conventional or Open-type เป็นแบบเปิดคือ มีการระบายความร้อนดี เนื่องจากขดลวดสามารถระบายความร้อนให้กับอากาศบริเวณรอบ ๆ ได้โดยตรง ยิ่งถ้ามีการติดตั้งพัดลมเพื่อช่วยเป่าระบายความร้อนออกด้วยแล้วก็ยิ่งดี จะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถจ่ายโหลดได้เพิ่มขึ้นอีกประมาณ 30-40% แต่แบบนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับสภาพภูมิอากาศที่ร้อนชื้นและมีฝุ่นละอองมาก และขณะทำงานจะมีเสียงดังรบกวน (Noise) โดย หม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ใช้งานประเภทไฟฟ้าแรงดันต่ำ โดยมีจุดประสงค์ สำหรับแปลงระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ เพื่อใช้กับเครื่องจักรชนิดพิเศษที่นำเข้ามาจากต่างประเทศซึ่งมีระบบแรงดันที่ต่างกัน หรือมีจุดประสงค์เพื่อใช้แยกวงจรทางด้านปฐมภูมิ (Primary) และด้านทุติยภูมิ (Secondary) ออกจากกันทางด้านไฟฟ้า แต่เชื่อมโยงกันด้วยวงจรแม่เหล็กในตัวหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อความปลอดภัยหรือลดการรบกวนในวงจรไฟฟ้าที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงเช่นที่ใช้กับเครื่องมือทดสอบ เป็นต้น เนื่องจากเป็นไฟฟ้าแรงดันต่ำ ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแห้งนี้จึงไม่มีความจำเป็นต้องผลิตด้วยกระบวนการหุ้มด้วยเรซิน

แบบที่ 2 Impregnated type จะมีการทำฉนวนจำพวก อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) หล่อหุ้มเข้ากับขดลวดตัวนำ กรรมวิธีในการหล่อต้องใช้ความชำนาญเป็นพิเศษ หากเกิดโพรงอากาศและการควบคุมคุณภาพไม่ดีพอจะเป็นผลเสียอย่างมาก เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดความร้อนก็จะเกิดการขยายตัวของขดลวดอาจทำให้เกิดการแตกร้าวของเรซิน และการออกแบบการระบายความร้อนก็ต้องใช้เทคนิคสูงเพราะการระบายความร้อนของขดลวดจะต้องผ่านชั้นของเรซินก่อน ดังนั้นหากจะเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ควรจะต้องเลือกซื้อจากผู้ผลิตที่มีประสบการณ์ยาวนานเท่านั้น หม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้จะมีผิวนอกที่เรียบร้อยและเป็นมันวาวสวยงาม

แบบที่ 3 Resin encapsulated or Cast resin เป็นแบบที่นิยมใช้กันแพร่หลายมากที่สุดมีการเสริม กลาสไฟเบอร์ (glassfiber) เข้าไปกับอีพอกซีเรซิน (epoxy resin) เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับขดลวด เพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนและทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวของขดลวดกับอีพอกซีเรซิน (epoxy resin) ใกล้เคียงกันจึงตัดปัญหาเรื่องการแตกร้าวหรือเกิดการ แตกร้าว (crack) ของ เรซินไปได้เลย การทำฉนวนให้กับขดลวดไม่ได้ใช้วิธีการหล่อด้วยเรซินเหมือนแบบที่ 2 แต่จะใช้แผ่นกลาสไฟเบอร์ (glassfiber) รองแผ่นตัวนำที่ใช้ทำขดลวด ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (แผ่นตัวนำที่ใช้อาจเป็นแผ่นทองแดงหรืออลูมิเนียมก็ได้) แล้วพันทับ

อีกครั้งด้วยเชือกซึ่งทำด้วย กลาสไฟเบอร์ โดยให้เชือกนี้วิ่งผ่านน้ำยาเรซินก่อนแล้วพันไขว้กันไปมา เทคนิคนี้เรียกว่า “Roving winding technique” แล้วนำไปเข้าตู้อบให้ความร้อน ขดลวดที่ได้จะมีผิวเรียบเป็นมันวาวสวยงามเช่นเดียวกัน

### 2.5.2 การระบายความร้อน (Cooling) ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง

การระบายความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นอย่างหนึ่งสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวที่มีขนาดใหญ่ โดยความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้านั้นเกิดจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (eddy current) และ ความสูญเสียฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) ในแกนเหล็ก (core) และยังเกิดจากความสูญเสียในตัวนำ (copper loss) ภายในขดลวดที่พันอีกด้วย ดังนั้นจึงต้องป้องกันไม่ให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นมาก ซึ่งจะทำอันตรายให้กับฉนวนของขดลวดและฉนวนต่าง ๆ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ การระบายความร้อนแบ่งได้ดังนี้

- Ventilated อากาศภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถเข้าไปหมุนเวียนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อระบายความร้อนกับแกนเหล็กและขดลวด
- Nonventilated ไม่มีการหมุนเวียนจากอากาศภายนอกเข้าสู่ด้านในของหม้อแปลงไฟฟ้า
- Sealed แบบปิดผนึก อากาศจากภายนอกไม่สามารถเข้าสู่ด้านในของหม้อแปลงไฟฟ้า
- Self-cooled ระบายความร้อนโดยการหมุนเวียนของอากาศโดยธรรมชาติ
- Force-air-cooled ระบายความร้อนโดยการเป่าให้อากาศหมุนเวียน
- Self-cooled/forced-air-cooled ระบายความร้อนโดยการหมุนเวียนของอากาศโดยธรรมชาติ และระบายความร้อนโดยการเป่าให้อากาศหมุนเวียน

ตารางที่ 2.1 การระบายความร้อนตามมาตรฐานสหรัฐอเมริกา และยุโรป

การระบายความร้อน	ANSI/IEEE Designation ANSI/IEEE 57.12.01-1989[R1998]	IEC Designation IEC 60726-1982[Amed.1-1986]
Ventilated self-cooled	AA	AN
Ventilated forced-air cooled	AFA	AF
Ventilated self-cooled/forced-air cooled	AA/FA	ANAF
Nonventilated self-cooled	ANV	ANAN
Sealed self-cooled	GA	GNAN

### 2.5.3 อายุฉนวน (Insulation life) ของหม้อแปลงไฟฟ้า

ทั่วไปอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอายุของฉนวนกระดาษที่ใช้พันลวดตัวนำ เพราะสัมผัสกับลวดตัวนำที่เป็นแหล่งกำเนิดของความร้อนโดยตรงและใกล้ที่สุด ความร้อนจะทำให้กระดาษสูญเสียความแข็งแรงทางกล (mechanical strength) เวลาที่หม้อแปลงไฟฟ้าหมดอายุการใช้งานคือ ไม่สามารถทนแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดกระแสลัดวงจรแม้ว่ายังคงมีสภาพความเป็นฉนวนดี

การแบ่งชั้นของฉนวนตามมาตรฐานอุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้า NEMA และ ANSI (American national standard institute) จึงได้แบ่งชั้นของฉนวน (Insulation class) ออกเป็น 4 ชั้นตามสภาพเงื่อนไขที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงสุดที่เพิ่มขึ้น (Temperature rise) ได้ดังนี้

1. ชั้นหนึ่ง (Class A) ฉนวนชั้นนี้บังคับให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสภาวะคงตัวต้องไม่เกิน 55 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมิรอบ ๆ 40 องศาเซลเซียส และอนุโลมให้อุณหภูมิที่จุดร้อน (Hottest Spot) ไม่เกิน 105 องศาเซลเซียส
2. ชั้นสอง (Class B) ฉนวนชั้นนี้บังคับให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสภาวะคงตัวต้องไม่เกิน 80 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมิรอบ ๆ 40 องศาเซลเซียส และอนุโลมให้อุณหภูมิที่จุดร้อน (Hottest Spot) ไม่เกิน 150 องศาเซลเซียส
3. ชั้นสาม (Class C) ฉนวนชั้นนี้บังคับให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสภาวะคงตัวต้องไม่เกิน 115 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมิรอบ ๆ 40 องศาเซลเซียส และอนุโลมให้อุณหภูมิที่จุดร้อน (Hottest Spot) ไม่เกิน 185 องศาเซลเซียส
4. ชั้นสี่ (Class H) ฉนวนชั้นนี้บังคับให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสภาวะคงตัวต้องไม่เกิน 150 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมิรอบ ๆ 40 องศาเซลเซียส และอนุโลมให้อุณหภูมิที่จุดร้อน (Hottest Spot) ไม่เกิน 220 องศาเซลเซียส

วัสดุฉนวนพวกนี้ส่วนใหญ่เป็นพวกผ้า (Cotton) ไหม (Silk) กระดาษ (Paper) และสารอินทรีย์ แห่อยู่ในของเหลวกำบังไฟฟ้า ฟ้าเซลลูโลสบาง ๆ สารเรซิน วานิลอินทรีย์ที่เคลือบตัวนำ วัสดุพวกไมก้า โยแฮ้ว หรือแอสเบสทอส

ตัวอย่างใน ANSI std. กำหนดอายุของฉนวนที่ทำจากเซลลูโลส เช่น ฉนวนกระดาษ ว่า “ ในเวลาที่หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลด (load) มีค่าอุณหภูมิของขดลวดเฉลี่ย (average winding temperature) เท่ากับ 95 °C (กรณีใช้ insulation class 105) หรือ 105 °C (กรณีใช้ insulation class 120) ตลอดเวลา หม้อแปลงไฟฟ้าจะมีอายุการใช้งานเท่ากับ  $6.5 \times 10^4$  ชั่วโมง (ประมาณ 7.4 ปี) ” การจ่ายโหลด (load) จะมีลักษณะการใช้งานโหลดประจำวัน (daily load) ไม่เท่ากันทั้งวัน อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมก็ไม่คงที่ ตลอดจนอุณหภูมิแต่ละฤดูกาลไม่เท่ากัน จึงมีสภาพที่มีทั้งอุณหภูมิที่สูงกว่าและต่ำกว่า อายุการใช้งานจึงยาวกว่า และอาจใช้ได้นานกว่า 30 ปี การจ่ายโหลด (loading) มีข้อจำกัดบางประการคืออุณหภูมิของน้ำมันไม่ควรเกิน 120 °C และ

จุดที่มีอุณหภูมิสูงสุด (hottest spot) ของลวดตัวนำไม่เกิน 140 °C โหลดเกิน (overload) ไม่ควรเกิน 200%

เงื่อนไขการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง(Usual Operating Condition for Transformer) ตามมาตรฐาน ANSI/IEEE,C57.12.01-1989[R1998]

## ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง

ตามมาตรฐาน ANSI/IEEE,C57.12.01-1989[R1998]

อุณหภูมิของการระบายอากาศ	$\leq 40^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิเฉลี่ยตลอด 24 ชั่วโมง	$\leq 30^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิที่สภาวะรอบข้างต่ำสุด	$\geq -30^{\circ}\text{C}$
การแสไหลด	ตัวประกอบฮาร์มอนิก $\leq 0.05$ per unit
ความสูง	$\leq 3300\text{ft}$ หรือ 1000 เมตร
แรงดัน	-พิกัด Output kVA ที่ 105% ของพิกัดแรงดันด้านทุติยภูมิ และ power factor $\geq 0.80$ -110%ของพิกัดแรงดันด้านทุติยภูมิขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า(no load)

## 2.6 ความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า

1. ความผิดปกติที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้า (Inter-turn fault) หรือมีการลัดวงจรระหว่างขดลวด สาเหตุอาจจะมาจากความชื้นของน้ำมันหรือฉนวนขดลวดสูงหรือเกิดจากแรงกระทำต่อขดลวด (mechanical force) ขณะที่มีการลัดวงจรภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้มีกระแสไหลผ่านขดลวดสูงเป็นเวลานาน และยังอาจจะเกิดจากความร้อนภายในขดลวดเองด้วยที่ทำให้ฉนวนเสื่อมอายุ ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดเพียงไม่กี่ขด จะทำให้กระแสลัดวงจรไหลวนอยู่ภายในขดลวดนั้นเป็นจำนวนมาก กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ (primary) จะมีค่ากระแสลัดวงจรต่ำมาก จนไม่อาจจะตรวจจับความผิดปกติได้ ทั้งนี้เพราะมีค่าความแตกต่างของ อัตราส่วนหม้อแปลง (transformer ratio) สูงนั่นเอง ความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้อาจจะตรวจจับโดยอาศัยความร้อนหรือตรวจจับทางก๊าซที่เกิดขึ้นจากสถิติที่ตรวจพบ ความเสียหายอย่างรุนแรงของหม้อแปลงไฟฟ้าประมาณ 70-80 % เริ่มต้นมาจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้า

2. ความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่แกนเหล็ก (Core fault) แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำจากแผ่นเหล็กบาง ๆ ประกอบกันนั้นจะสามารถทนต่อ กระแสไหลวน (Eddy-current) มากผิดปกติ อันอาจจะเกิดจากการเสื่อมของฉนวนต่าง ๆ ย่อมจะทำให้เกิดความร้อนผิดปกติ ความสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) จะสูงขึ้น แต่ก็ไม่สามารถตรวจจับความผิดปกติทางกระแสในขดลวดปฐมภูมิ (primary) ได้ กรณีที่

เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำมันแล้ว น้ำมันจะทำให้เกิดก๊าซขึ้น จึงอาจตรวจจับความผิดปกติโดยอาศัยก๊าซที่เกิดขึ้นนี้

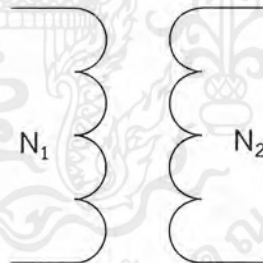
3. การลัดวงจรลงดิน (Earth fault) ในกรณีที่ขดลวดทุติยภูมิ (secondary) ของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อเป็นแบบสตาร์ (star) โดยที่นิวทรัล (neutral) ต่อผ่าน อิมพีแดนซ์ (impedance) ก่อนลงดิน ขณะที่เกิดการลัดวงจรจากขดลวดลงสู่ดิน ค่าของกระแสลัดวงจรจะถูกจำกัดโดย อิมพีแดนซ์ที่ต่อลงดิน (earthing impedance) ที่ต่ออยู่ และยังขึ้นอยู่กับระยะความห่างตามขดลวดจากจุดนิวทรัล (neutral) ไปยังจุดลัดวงจรลงดิน สำหรับขดลวดทุติยภูมิที่ต่อแบบสตาร์ (star) และนิวทรัล (neutral) ต่อโดยตรงลงสู่ดิน เมื่อเกิดการลัดวงจรจากขดลวดลงสู่ดิน ค่าของกระแสลัดวงจรจะถูกควบคุมโดยค่าของอิมพีแดนซ์รั่วไหลของขดลวด กับระยะทางตามขดลวดของจุดลัดวงจรจากจุดนิวทรัล (neutral)

#### 4. ความผิดปกติภายนอก (External Faults)

การเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะอยู่นอกเขตการป้องกันหม้อแปลง (Zone Protection) ซึ่งถูกกำหนดหม้อแปลงกระแส (CT) ผลของการเกิดความผิดปกติภายนอกจะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับความเครียดภายในหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง การเกิดความผิดปกติประเภทนี้ประกอบด้วย

- การจ่ายโหลดเกินขนาด (Overloads)
- การลัดวงจรภายนอก (External System Short Circuit)
- แรงดันเกิน (Over Voltage)
- ความถี่ของระบบลดลง (Reduced System Frequency)

ในสภาวะปกติหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ความต้านทานและความเหนี่ยวนำได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ

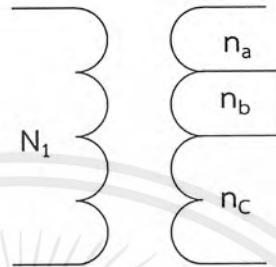
$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} \\ M_{21} & L_2 \end{bmatrix}$$

การลัดวงจรของขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1. การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด (Turn-to-turn)
2. การลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน (Turn to ground)

การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดจะเกิดการแบ่งขดลวดที่เกิดการลัดวงจรออกเป็น 2 ขดลวดย่อย (Sub-coil) โดยแก้ไขเมทริกซ์จาก  $2 \times 2$  เป็น  $4 \times 4$  ดังนี้



รูปที่ 2.9 ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{1a} & M_{1b} & M_{1c} \\ M_{a1} & L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{b1} & M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{c1} & M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix}$$

$$R_a = \frac{n_a}{N_2} \times R_2, \quad R_b = \frac{n_b}{N_2} \times R_2, \quad R_c = \frac{n_c}{N_2} \times R_2$$

โดยที่  $n_a$  = จำนวนรอบของขดลวดย่อย a

$n_b$  = จำนวนรอบของขดลวดย่อย b

$n_c$  = จำนวนรอบของขดลวดย่อย c

และ  $n_a + n_b + n_c = n_3$

สำหรับการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของตัวเอง (Self-inductance) และค่าความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดย่อย a, b และ c จะต้องใช้ความสัมพันธ์ของหลักการของ Consistency, Leakage และ Proportionality มาช่วยดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Consistency: } L_a + L_b + L_c + 2(M_{ab} + M_{ac} + M_{bc}) = L_3$$

$$\text{Leakage: } \sigma_{ab} = 1 - \frac{M_{ab}^2}{L_a L_b}$$

$$\sigma_{ac} = 1 - \frac{M_{ac}^2}{L_a L_c}$$

$$\sigma_{bc} = 1 - \frac{M_{bc}^2}{L_b L_c}$$

$$\text{Proportionality: } \frac{L_a}{L_b} = \left(\frac{n_a}{n_b}\right)^2$$

$$\frac{L_a}{L_c} = \left(\frac{n_a}{n_c}\right)^2$$

ค่า  $\sigma_{ab}$  เป็นค่าการรั่วซึมของสนามแม่เหล็ก (Leakage Factor) สามารถหาได้จากลักษณะทางกายภาพของขดลวดของหม้อแปลง (Winding Geometry data) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งการลัดวงจรลงดินของขดลวด

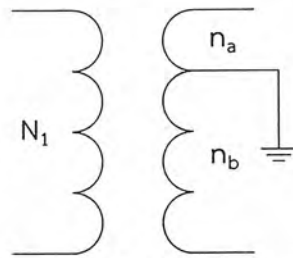
$$M_{a1} + M_{b1} + M_{c1} = M_{12}$$

$$M_{a1} = M_{12} \sqrt{\frac{L_a}{L_1}}; M_{b1} = M_{12} \sqrt{\frac{L_b}{L_1}}; M_{c1} = M_{12} \sqrt{\frac{L_c}{L_1}}$$

$$L_a = L_3 \left(\frac{n_a}{n_3}\right)^2; L_b = L_3 \left(\frac{n_b}{n_3}\right)^2; L_c = L_3 \left(\frac{n_c}{n_3}\right)^2$$

$$M_{ab} = L_3 \left(\frac{n_a n_b}{n_3}\right); M_{ac} = L_3 \left(\frac{n_a n_c}{n_3}\right); M_{bc} = L_3 \left(\frac{n_b n_c}{n_3}\right)$$

การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดกับดินจะต้องแก้ไขเมทริกซ์จาก 2x2 เป็น 3x3 ดังนี้



รูปที่ 2.10 ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_b \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{1a} & M_{1b} \\ M_{a1} & L_a & M_{ab} \\ M_{c1} & M_{ba} & L_b \end{bmatrix}$$

$$R_a = \frac{n_a}{N_2} \times R_2, \quad R_b = \frac{n_b}{N_2} \times R_2$$

โดยที่  $n_a$  = จำนวนรอบของขดลวดย่อย a

$n_b$  = จำนวนรอบของขดลวดย่อย b

และ  $n_a + n_b + n_c = n_3$

สำหรับการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของตัวเอง (Self-inductance) และค่าความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดย่อย a, b และ c จะต้องใช้ความสัมพันธ์ของหลักการของ Consistency, Leakage และ Proportionality มาช่วยดังสมการต่อไปนี้

Consistency:  $L_a + 2M_{ab} + L_b = L_3$

Leakage:  $\sigma_{ab} = 1 - \frac{M_{ab}^2}{L_a L_b}$

Proportionality:  $\frac{L_a}{L_b} = \left(\frac{n_a}{n_b}\right)^2$

ค่า  $\sigma_{ab}$  เป็นค่าการรั่วซึมของสนามแม่เหล็ก (Leakage Factor) สามารถหาได้จากลักษณะทางกายภาพของขดลวดของหม้อแปลง (Winding Geometry data) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งการลัดวงจรลงดินของขดลวดแต่จะถือว่าค่านี้เป็นค่าที่กำหนดขึ้นมา และหากกำหนดให้ค่า  $k = \frac{n_a}{n_b}$  ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$L_a = \frac{L_3}{\frac{1}{k^2} + \frac{2}{k} + 1}; \quad L_b = \frac{L_3}{k^2 + 2k + 1}; \quad M_{ab} = \frac{L_3}{k + \frac{1}{k} + 2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1 การคำนวณกระแสลัดวงจร

เมื่อเกิดสภาวะผิดปกติ (fault) เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าจากอุบัติเหตุ หรือความไม่ตั้งใจของผู้ใช้งาน ผลที่จะเกิดขึ้นเมื่อการสภาวะลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้า มีอิมพีแดนซ์ (impedance) ลดลงเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีอิมพีแดนซ์น้อยลงค่ากระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าสูงขึ้น

$$V = IZ$$

$$\uparrow I = \frac{V}{Z \downarrow}$$

$$I \propto \frac{1}{Z}$$

จากสภาวะดังกล่าวทำให้เกิดความผิดปกติเชิงกลเกิดขึ้น เช่น ความเครียดทางกล (mechanical stress) และความตึงเครียดทางความร้อน (Thermal Stress) สิ่งต่างๆ เหล่านี้ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการชำรุดเสียหายได้ ซึ่งจากจุดนี้อาจส่งผลกระทบต่อผู้ใช้งานหรือบุคคลโดยรอบ ดังนั้นการคำนวณและทำนายค่ากระแสลัดวงจรจึงจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อจะได้ป้องกันความเสียหายต่างๆ ที่จะเกิดขึ้น

อิมพีแดนซ์สมมูลสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า

$$\%Z_T = \frac{\%V_{sc}}{\%I_{sc}} = \%V_{sc}$$

โดยที่

$$I_{sc} = 1.0 \text{ pu.} = 100\%$$

$$\%V_{sc} = \frac{V_{sc}}{V_{rated}} \times 100\%$$

ดังนั้น

$$Z_{T,pu} = \frac{V_{sc,pu}}{I_{sc,pu}} = V_{sc,pu}$$

$$Z_T = \frac{\%Z_T c(kV)_T^2}{100 MVA_T}$$

$$R_T = \frac{P_{Loss}}{I_{FL}^2}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $Z_T$  = อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ( $\Omega$ )  
 $R_T$  = ความต้านทานของหม้อแปลงไฟฟ้า ( $\Omega$ )  
 $X_T$  = รีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ( $\Omega$ )  
 $MVA_T$  = พิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า (MVA)  
 $kV_n$  = พิกัดแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า (kV)  
 $P_{Loss}$  = ค่ากำลังสูญเสียทั้งหมดของหม้อแปลงไฟฟ้า (kW)  
 $I_{FL}$  = กระแสโหลดเต็มพิกัด (A)  
 $I_{sc}$  = กระแสลัดวงจร (A)  
 $V_{sc}$  = แรงดันไฟฟ้าขณะลัดวงจร (V)  
 $\%Z$  = อิมพีแดนซ์ระหว่างขดลวดคู่หนึ่งอาจระบุเป็นค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วย (per unit impedance) สามารถหาได้โดยป้อนแรงดันเข้าที่ขดลวดปฐมภูมิ และ ทำการลัดวงจรขดลวดที่ทุติยภูมิไว้ อ่านค่าแรงดันขณะที่มีกระแสขนาดเท่าพิกัด (rated current) ไหลในขดลวดค่าแรงดันที่อ่านได้หารด้วยค่าแรงดันพิกัด (rated voltage) จะได้ค่า แรงดันไฟฟ้าต่อหน่วย (per unit voltage) หรือ อิมพีแดนซ์ต่อหน่วย (per unit impedance) เนื่องจากเป็นแรงดันที่มีกระแสพิกัดเหมือนกัน หากคูณค่าที่คำนวณได้ด้วย ร้อย จะเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ เรียกว่า ค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ (percent impedance voltage)

การคำนวณหากระแสลัดวงจรในหม้อแปลงไฟฟ้า

ลักษณะรูปกราฟกระแสลัดวงจร จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนประกอบที่สมมาตร และส่วนประกอบที่ไม่สมมาตร แสดงได้ตามสมการต่อไปนี้

$$I_s = \sqrt{2}I_k'' \sin(\omega t - \delta)$$

$$I_{dc} = \sqrt{2}I_k'' \sin\delta e^{-(R/L)t}$$

โดยที่  $I_s$  = องค์ประกอบสมมาตร (symmetrical component)

$I_{dc}$  = องค์ประกอบที่ไม่สมมาตร, องค์ประกอบกระแสไฟฟ้าตรง (DC component)

$I_k''$  = กระแสลัดวงจรเริ่มต้นสมมาตร (Initial Symmetrical short circuit current)

$R/L$  = ค่าคงที่ของเวลา (Time constant)

ในการหาค่ากระแสลัดวงจรเริ่มต้นสมมาตรหาจากสมการ

$$I_k'' = \frac{cU_n}{Z_T}$$

โดยที่  $Z_T$  = อิมพีแดนซ์ห้อยแปลง สามารถหาได้จาก

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$$

$U_n$  = แรงดันปกติ (Nominal voltage)

$C$  = ค่าปรับแก้แรงดัน (Voltage correction factor)

$R_T$  = ความต้านทานห้อยแปลง

$X_T$  = ค่ารีแอกแตนซ์ห้อยแปลง

สำหรับการหากระแสลัดวงจรช่วงลูกคลื่นแรกหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$i_p = K\sqrt{2}I_k''$$

โดยที่  $K$  = ตัวประกอบความไม่สมมาตร (Asymmetry Factor) ซึ่งหาได้จากสมการ

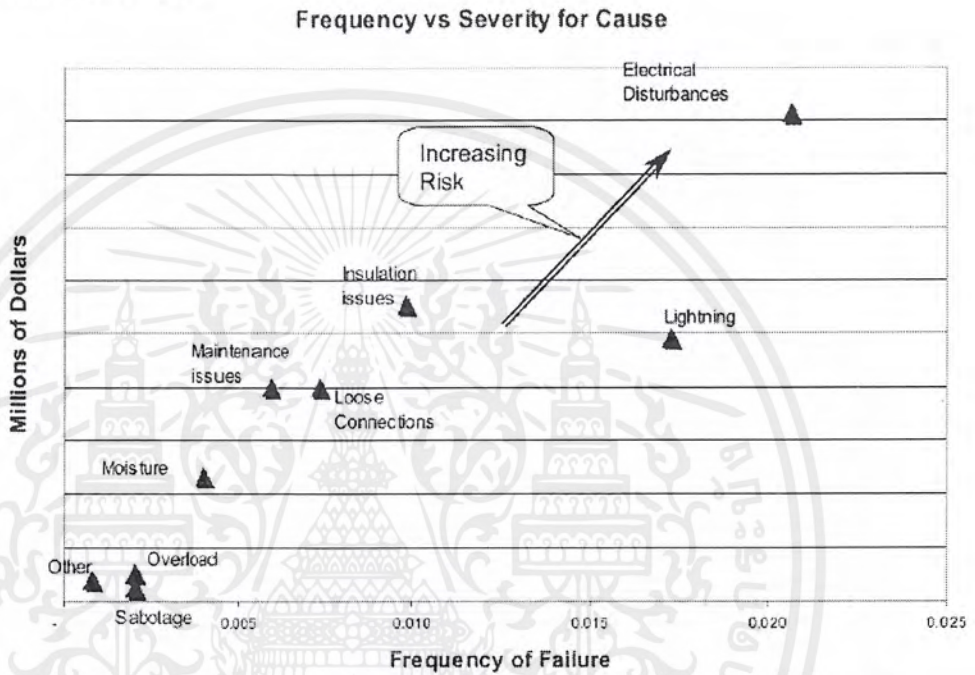
$$K = 1.02 + 0.98e^{-3R/X}$$

### 2.6.2 ผลกระทบของการเกิดลัดวงจร

- ทำให้ค่า อิมพีแดนซ์มีค่าลดลง
- ทำให้กระแสไหลมากกว่ากระแสปกติหลายเท่า
- ทำให้เกิดความเครียดทางกล (Mechanical Stress) และความเครียดทางความร้อน (Thermal Stress)
- ทำให้บริษัทเสียหายและเป็นอันตรายต่อคนได้

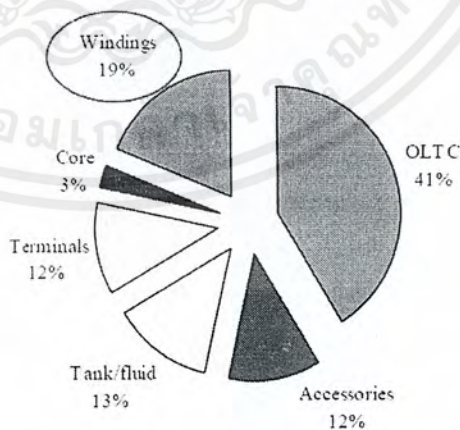
### 2.6.3 ปัจจัยที่ส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้าเสื่อมสภาพ

1. อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature)
2. การรบกวนเชิงไฟฟ้า (Electrical Disturbances)
3. ฟ้าผ่า (Lightning)
4. สาเหตุสืบเนื่องจากการเสื่อมสภาพของฉนวน (Insulation Issues)
5. การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า (Electrical connection, loose or high resistance)



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของการเกิดความเสียหาย กับ ค่าความเสียหาย

จากการสำรวจปัญหาของหม้อแปลงไฟฟ้าพบว่าปัญหาเรื่องของขดลวดมีปัญหาค่อนข้างมาก



รูปที่ 2.12 อัตราส่วนของการเกิดความเสียหายในหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการเกิดความผิดปกติพร้อมภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดังนี้

### ตารางที่ 2.3 สรุปผลการเกิดความผิดปกติพร้อมภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

ประเภทของความผิดปกติ	สาเหตุของความผิดปกติ
ไดโอดีลิกทริก	การลัดวงจรระหว่างขดลวดหรือขดลวดลงดิน
อีเล็คทริก	หน้าสัมผัสไม่ดีหรือหน้าสัมผัสไหลดแต่ปเสียหาย
อีเล็คโตรไดนามิก	แรงที่เกิดจากการลัดวงจรภายในและภายนอก
อีเล็คโตรแมกเนติก	กระแสไฟฟ้าไหลวนทำให้เกิดความเหนียวในวงจรแม่เหล็กหรือโครงสร้างของตัวถังขยายตัว
ความร้อน	อุณหภูมิที่สูงขึ้นผิดปกติ หรือ ความร้อนเนื่องจากความสกปรกของน้ำมัน
เครื่องกล	การสั่นสะเทือน ความร้อนแต่ละจุด การรั่วไหลหรือข้อบกพร่องของการเปลี่ยนแท็บ

#### 2.6.4 ความแข็งแรงทางกลของขดลวดขณะเกิดลัดวงจร (Short circuit withstand)

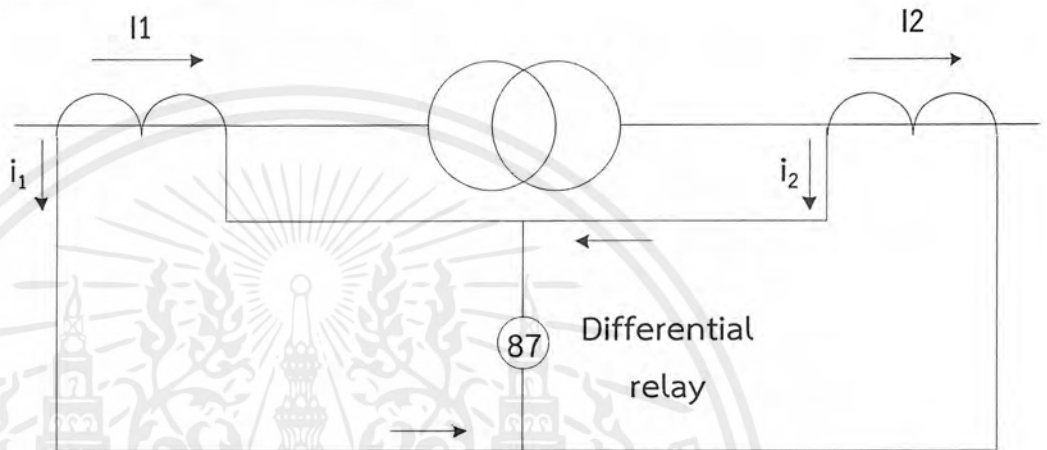
ในขณะที่เกิดลัดวงจรในระบบ หม้อแปลงไฟฟ้าจะมีกระแสลัดวงจรไหลผ่านมีค่าสูงกว่ากระแสปกติมากหลายเท่า ผลที่เกิดขึ้นกับขดลวดคือ เกิดความร้อน และแรงทางกลสูง ผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าจึงต้องออกแบบ และผลิตให้สามารถทนสภาพนั้นได้ ผู้ซื้อต้องระบุค่า ระดับความรุนแรงของการเกิดฟอลต์ (fault level) ให้เหมาะสมด้วยเราสามารถลดโอกาสที่จะเกิดลัดวงจรและความเสียหายได้หลายวิธี เช่น

- ใช้ เทปฉนวน (insulation tape) พันที่ บัส (bus)
- ใช้นิวทรัล (neutral) หรือ series reactor เพื่อลดกระแสลัดวงจร และไม่ทำให้ฟอลต์ (fault) รุนแรง
- แยก บัส (bus) ออกเป็นสองส่วนเพื่อลด ระดับความรุนแรงของการเกิดฟอลต์ (fault level)
- ลดจำนวนครั้งของ auto-reclosing
- ถ้าไม่ใช่ tertiary winding ควรฉนวนตรงส่วนปลาย หรือถ้าไม่จำเป็นต้องใช้จ่ายโหลด (load) ก็ไม่ต้องต่อออกมาภายนอก

## 2.7 การป้องกันกระแสลัดวงจรในหม้อแปลงไฟฟ้า

### รีเลย์กระแสต่าง (Differential relay)

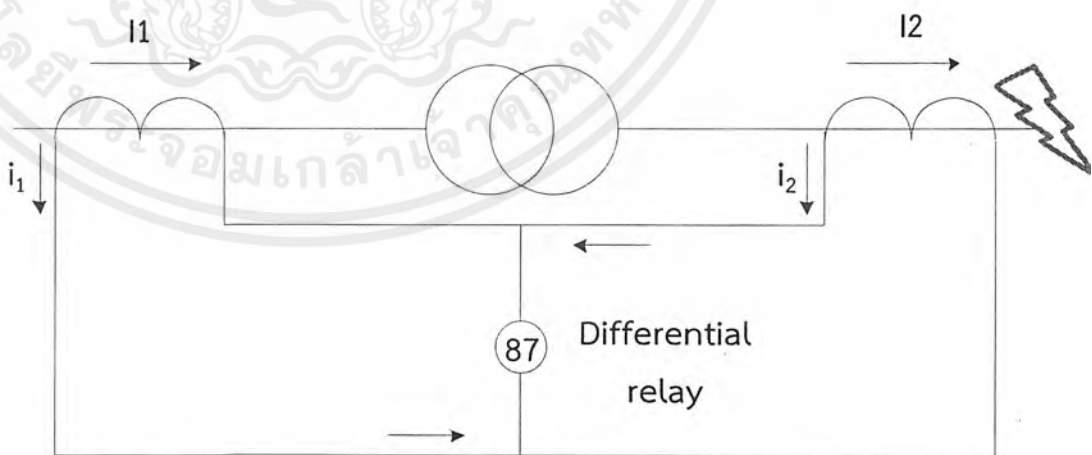
หลักการการทำงานของรีเลย์กระแสต่าง คือจะตรวจสอบความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า และออกจากหม้อแปลงไฟฟ้า โดยความแตกต่างของขนาดกระแสไฟฟ้า ในสภาวะปกติ ความแตกต่างของขนาดของกระแสไฟฟ้าต้องเป็นศูนย์ แต่ถ้าเกิดมีความแตกต่างของขนาดของกระแสไฟฟ้าเกินค่าที่ตั้งไว้ รีเลย์จะทำงาน



รูปที่ 2.13 การทำงานของรีเลย์กระแสต่าง (Differential relay) สภาวะปกติ

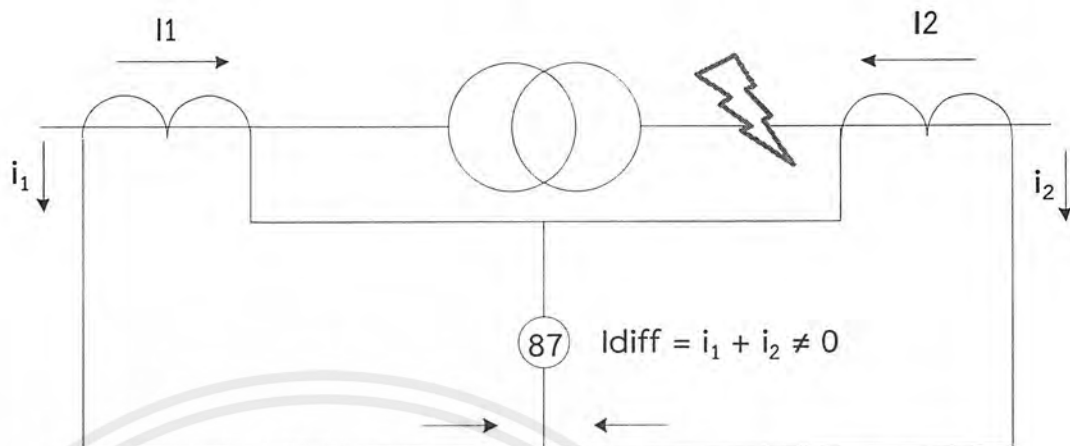
### สภาวะการเกิดการลัดวงจรภายนอกโซนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในกรณีการเกิดการลัดวงจรภายนอกโซนป้องกันของหม้อแปลง ดังรูปที่ 2.14 กระแสไฟฟ้า  $i_1$  และ  $i_2$  จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ค่าผลต่างของกระแสไฟฟ้ายังคงเป็นศูนย์ รีเลย์จึงไม่ทำงาน



รูปที่ 2.14 การเกิดการลัดวงจรภายนอกโซนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้า

### สภาวะการเกิดการลัดวงจรภายในโซนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้า



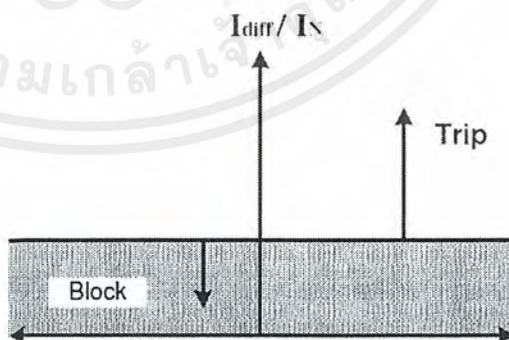
รูปที่ 2.15 การเกิดการลัดวงจรภายในโซนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในกรณีการเกิดการลัดวงจรภายในโซนป้องกันของหม้อแปลง ดังรูปที่ 2.15 สามารถแบ่งได้เป็น 2 สถานการณ์คือ

- มีแหล่งจ่ายภายนอก ทำให้กระแสลัดวงจร ดังนั้น  $I_2$  ไม่เป็นศูนย์  $I_{diff} = i_1 + i_2$  จึงทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านรีเลย์ไม่เป็นศูนย์ จึงทำให้รีเลย์ทำงาน
- ในระบบที่เป็นระบบเรเดียล (Radial system) กระแสไฟฟ้า  $I_2$  เป็นศูนย์ ดังนั้น  $I_{diff} = i_1$  ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีเลย์ไม่เป็นศูนย์ จึงทำให้รีเลย์ทำงาน

#### คุณลักษณะการสั่งปลดวงจร

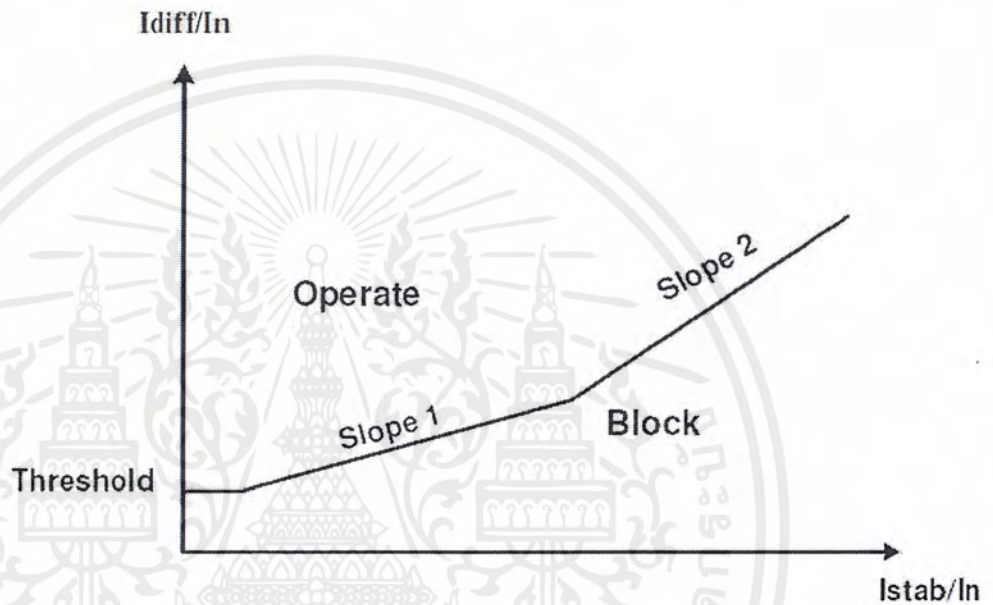
ผลต่างของกระแสไฟฟ้าต้องเกินค่าที่ตั้งไว้เพื่อสั่งให้เบรกเกอร์ทำการปลดวงจร ค่าที่ตั้งไว้เป็นค่าน้อยที่สุดที่รีเลย์เริ่มทำงาน คุณลักษณะการสั่งปลดวงจรของรีเลย์กระแสต่างอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 คุณลักษณะการสั่งปลดวงจรของรีเลย์กระแสต่างอย่างง่าย

ถ้าหากอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสมีความคลาดเคลื่อน ในสภาวะปกติจะมีกระแสผลต่างเพียงเล็กน้อย ค่ากระแสผลต่างนี้ไม่เพียงพอที่จำให้รีเลย์ทำงาน แต่ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรภายนอกโซนป้องกัน ค่าผิดพลาดนี้จะทำให้เกินค่าที่ตั้งไว้ และทำให้รีเลย์กระแสต่างทำงานผิดพลาด

เพื่อการป้องกันการดำเนินงานผิดพลาดของรีเลย์กระแสต่าง เนื่องจากการเกิดลัดวงจรภายนอกโซนป้องกัน โดยการทำให้กระแสไฟฟ้าคงตัว (Stabilizing current) เพื่อป้องกันการดำเนินงานที่ผิดพลาดของรีเลย์ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 คุณลักษณะการสั่งปลดวงจรของรีเลย์กระแสต่างแบบสองส่วน

คุณลักษณะนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วน (slope 1, slope 2) คุณลักษณะการสั่งปลดวงจรนี้ เมื่อ กระแสไฟฟ้าคงตัว (Stabilizing current) เพิ่มสูงขึ้น กระแสผลต่างที่ใช้ทำการสั่งปลดวงจรต้องมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

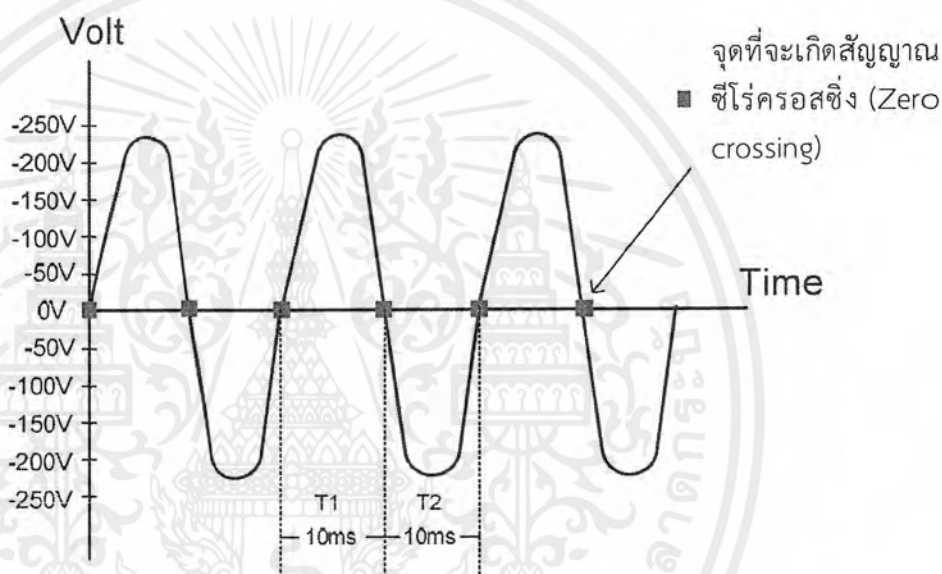
หมายเหตุ  $I_{diff} = |I_1 + I_2|$

$$I_{stab} = |I_1| + |I_2|$$

## 2.8 หลักการทำงานของวงจรถีโรครอสซิง (Zero crossing)

การทดลองการเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลง ได้ออกแบบชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุมเริ่มต้นการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้วงจรถีโรครอสซิง (Zero crossing)

ซีโรครอสซิง (Zero crossing) มีการควบคุมโดยการนำสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ซึ่งเป็นสัญญาณไซน์ (มุมเฟส 360 องศา) ขนาดความถี่ 50 Hz เข้าไปเปรียบเทียบเพื่อหาจุดที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นศูนย์ แล้วปล่อยสัญญาณควบคุมออกมาเป็นสัญญาณกระตุ้นที่มุม 0 องศา และ มุม 180 องศา การควบคุมเฟสจะอาศัยหลักการทำงานของไตรแอก (Triac) โดยการ ควบคุมการจุดชนวนเกตของ ไตรแอก (Triac) ซึ่งการจุดชนวนเกตที่มุมเฟสต่าง ๆ ของไตรแอกจะมีผลต่อค่าระดับแรงดันเอาต์พุตกระแสสลับ โดยเราจะใช้ สัญญาณจากจุดที่เรียกว่า ซีโรครอสซิง (Zero crossing) เป็นจุดอ้างอิงในการกระตุ้นเฟสของสัญญาณ



รูปที่ 2.18 สัญญาณซีโรครอสซิง (Zero crossing)

$$T = \frac{1}{f}$$

$$T = \frac{1}{50 \text{ Hz}} = 20 \text{ ms}$$

$$T_1 = T_2 = 10 \text{ ms}$$

จากรูปด้านบน จะเห็นว่า สัญญาณ ซีโรครอสซิง (Zero crossing) จะเกิดขึ้นทุกๆ 10 ms ดังนั้น การควบคุมเฟสของสัญญาณสามารถทำได้โดยอาศัยวิธีการหน่วงเวลาภายใน 0 ถึง 10 ms แล้วส่งสัญญาณพัลส์ไปกระตุ้นขาเกตของไตรแอก ซึ่งขนาดของสัญญาณพัลส์ที่ไปกระตุ้นควรมีความกว้างอย่างน้อย 10 us โดยการจุดชนวนเกตภายในเวลา 0 ถึง 10 ms จะมีผลต่อระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เอาต์พุต ซึ่งจะมีสัดส่วนแปรผกผันโดยตรงกับเวลาดังกล่าว

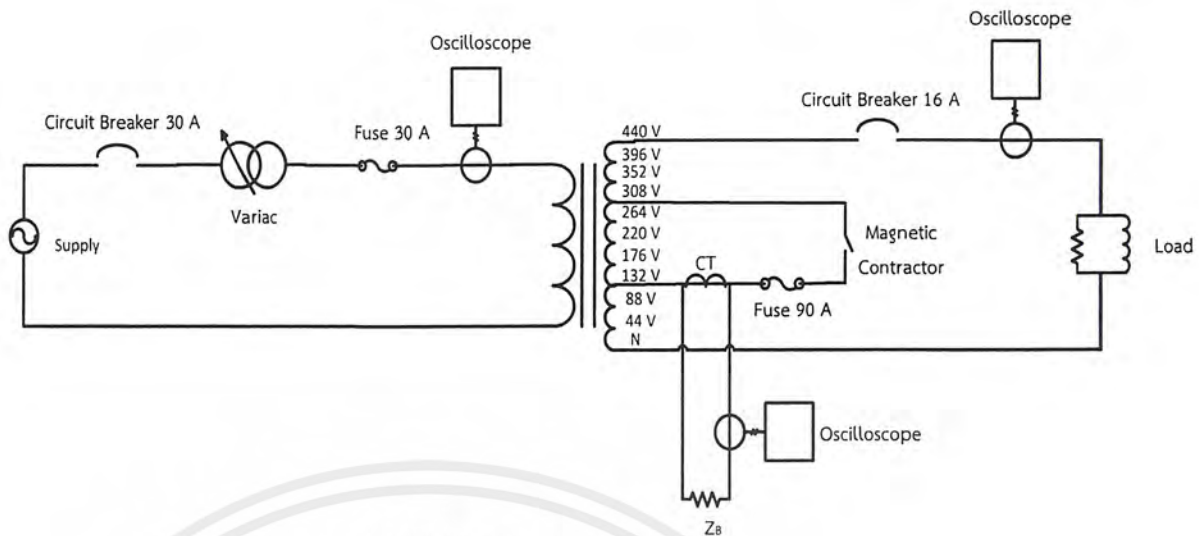
### บทที่ 3

#### การออกแบบชุดทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

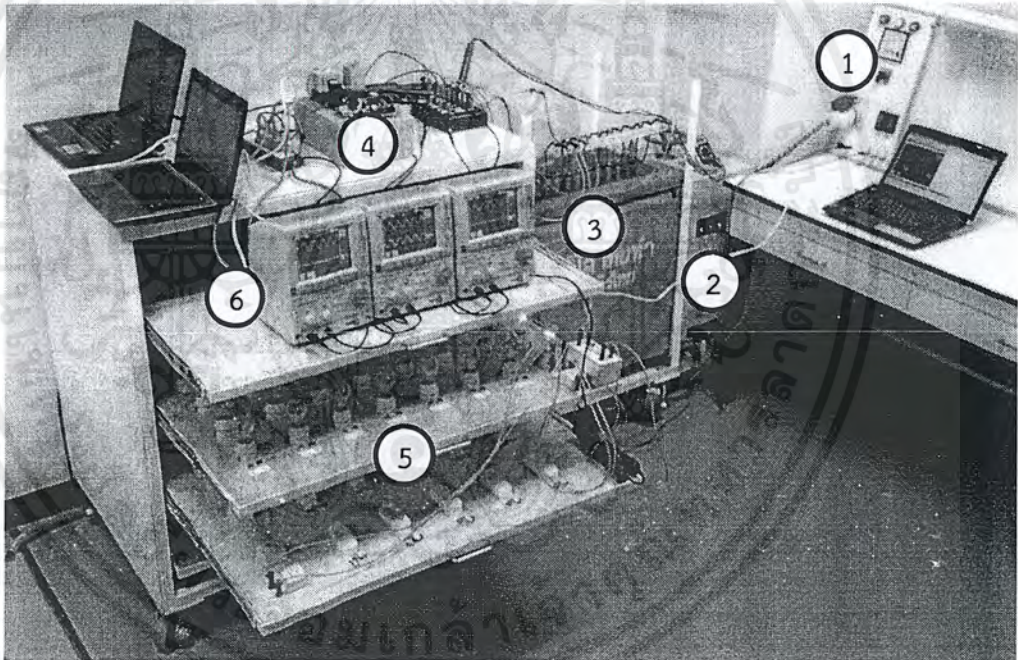
หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หลักในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสู่ผู้ใช้ไฟฟ้าทุกระดับ ซึ่งไฟฟ้าที่จ่ายมาจากโรงไฟฟ้าจะมาสู่บ้านได้นั้นจะต้องผ่านกระบวนการในการแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง มาเป็นแรงดันไฟฟ้าที่สามารถใช้ตามบ้านได้ ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้ามีบทบาทมากในเรื่องดังกล่าว เพื่อให้หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถทำงานได้ในประสิทธิภาพที่สูงอยู่ตลอดเวลา จึงควรใส่ใจต่อปัจจัยที่สัมพันธ์ต่อการเกิดความเสียหายต่อหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีโอกาสที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่อหม้อแปลงไฟฟ้าได้ จากการวิจัยพบว่าปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเสียหายกับหม้อแปลงไฟฟ้าคือการเสื่อมสภาพของฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากภายในหม้อแปลงไฟฟ้ามีขดลวดทองแดง โดยมีฉนวนห่อหุ้มไม่ให้ขดลวดแต่ละขดแตะถึงกัน เมื่อฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพจึงนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ (break down) ทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวด หรือขดลวดทองแดงภายในหม้อแปลงไฟฟ้าและกับตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้าก็ทำให้เกิดการลัดวงจรลงดินได้เช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการออกแบบชุดทดลองเพื่อจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า และนำไปใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อไป

#### 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลอง

การสร้างวงจรการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.1 รับแรงดันไฟฟ้ามาจากห้องปฏิบัติการ จากนั้นส่งผ่านมายังหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับค่าได้ (Variable voltage transformer) เพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับโพลตรงไฟฟ้า จากนั้นแรงดันไฟฟ้าที่จะผ่านมายังหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการทดลองจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันคือ เซอร์คิตเบรกเกอร์ และฟิวส์ เพื่อป้องกันความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยเซอร์คิตเบรกเกอร์จะตัดวงจรเมื่อมีกระแสไฟฟ้าเกินที่กำหนดไว้ และฟิวส์จะหลอมละลายเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านเกิน เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับผู้ทำการทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง บันทึกผลขนาด และรูปคลื่นที่เกิดขึ้นของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าจากออสซิลอสโคป ทางด้านปฐมภูมิที่ต่อระหว่างหม้อแปลงปรับค่าได้ และหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการทดลอง ทางด้านทุติยภูมิที่ต่อไปยังโพล และทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า



(ก) วงจรการทดลอง



1. แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Supply)
2. หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ (Variable Voltage Transformer)
3. หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)
4. ชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุมเริ่มต้นการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
5. โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า
6. อุปกรณ์วัดปริมาณทางไฟฟ้า (Oscilloscope)

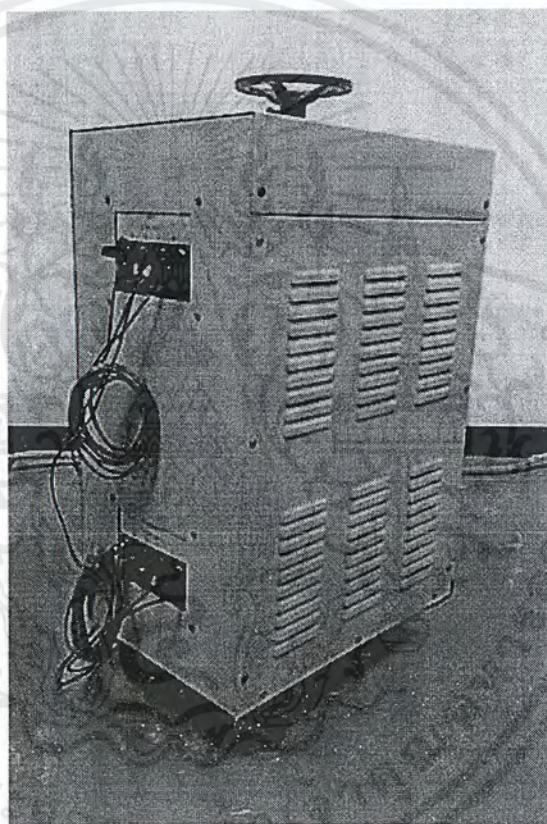
(ข) ชุดการทดลอง

รูปที่ 3.1 วงจรการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของชุดทดลอง

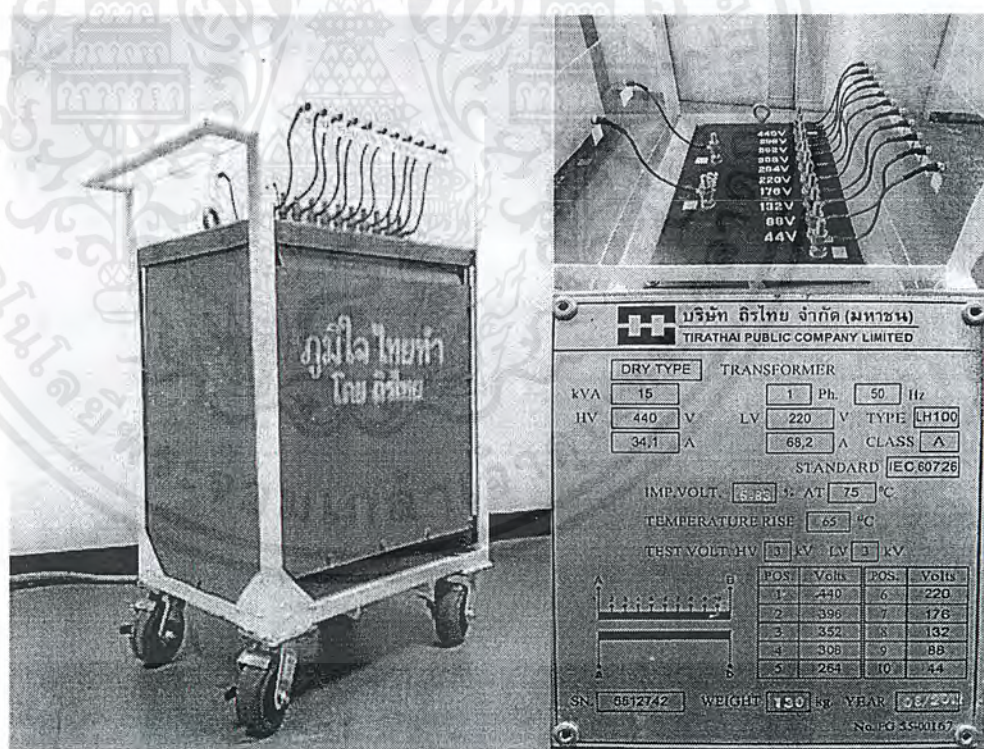
ในการทำการทดลองได้ใช้แรงดันไฟฟ้าสามเฟสจากห้องปฏิบัติการ โดยหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเป็นแบบหนึ่งเฟส พิกัด 15 kVA แรงดันไฟฟ้า 220/440 โวลต์ ที่ทำการแทบลดทางด้านไฟฟ้าแรงดันสูงทุก ๆ 10 เปอร์เซ็นต์ หรือทุก ๆ 44 โวลต์ จำนวน 10 แทบ ในการทำการทดสอบได้มีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเป็น 27.5 โวลต์ จึงต้องใช้อุปกรณ์ที่ช่วยในการปรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ตามที่ต้องการโดยเลือกใช้หม้อแปลงปรับค่าได้ (Variable Voltage Transformer) ดังรูปที่ 3.2 มาเป็นแหล่งจ่ายให้กับชุดการทดลอง โดยที่พิกัดหม้อแปลงปรับค่าได้ 3 เฟส 420 โวลต์ 30 แอมแปร์



รูปที่ 3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ 3 เฟส 420 โวลต์ 30 แอมแปร์

### 3.1.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.3 ในการทำการทดลองได้ทำภายในห้องปฏิบัติการ จึงเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแห้ง ซึ่งสามารถใช้งานได้ในอาคาร อีกทั้งกรณีที่เกิดความเสียหายอันเกิดจากการผิดพลาดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งจะเกิดความเสียหายที่ตัวอุปกรณ์เท่านั้น ไม่มีอันตรายต่อสิ่งรอบข้าง ทำให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ทำการทดสอบหรือผู้อื่นที่อยู่โดยรอบ หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่ใช้ทดสอบมีพิกัด 15 kVA แรงดันไฟฟ้า 220/440 โวลต์ มีการแทบขดลวดด้านแรงสูงทุก ๆ 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นจำนวน 10 แทบ ดังนี้คือ 44, 88, 132, 176, 220, 264, 308, 352, 396 และ 440 โวลต์ การออกแบบแทบขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อใช้ในการทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ผู้ทดลองสามารถเลือกขดลวดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในการทำการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นกับขดลวดภายในหม้อแปลงทั้งทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิ ออกแบบให้สามารถรับแรงทางกล และทางไฟฟ้าขณะที่ทำการลัดวงจร เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์และผู้ทำการทดลอง

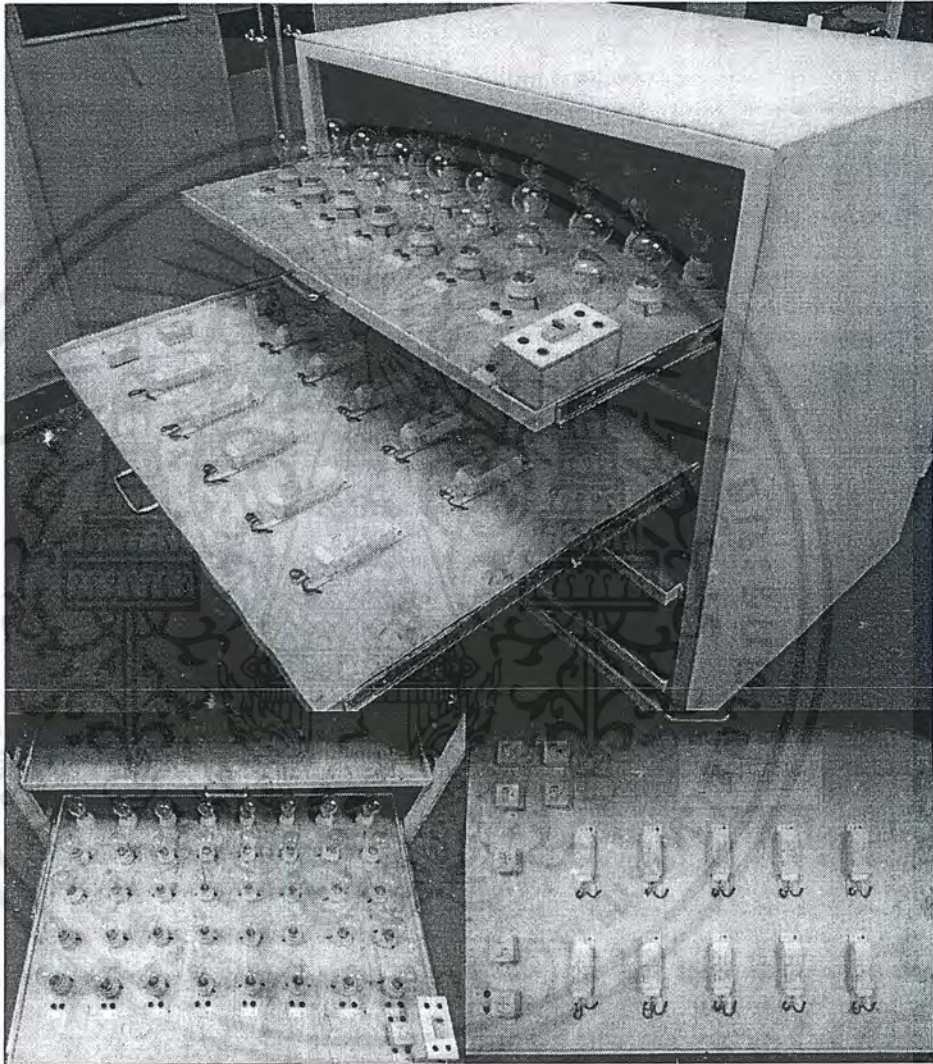


รูปที่ 3.3 หม้อแปลงไฟฟ้า 15 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดลองได้ออกแบบโหลดที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นโหลดความต้านทาน และโหลดความต้านทานความเหนี่ยวนำ โดยในการทดลองจะทำการทดลองโดยการปรับเปลี่ยนชนิดและขนาดของโหลดที่ใช้ทดลอง เพื่อสังเกตพฤติกรรมของการเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าว่าจะมีผลแตกต่างกันหรือไม่อย่างไร

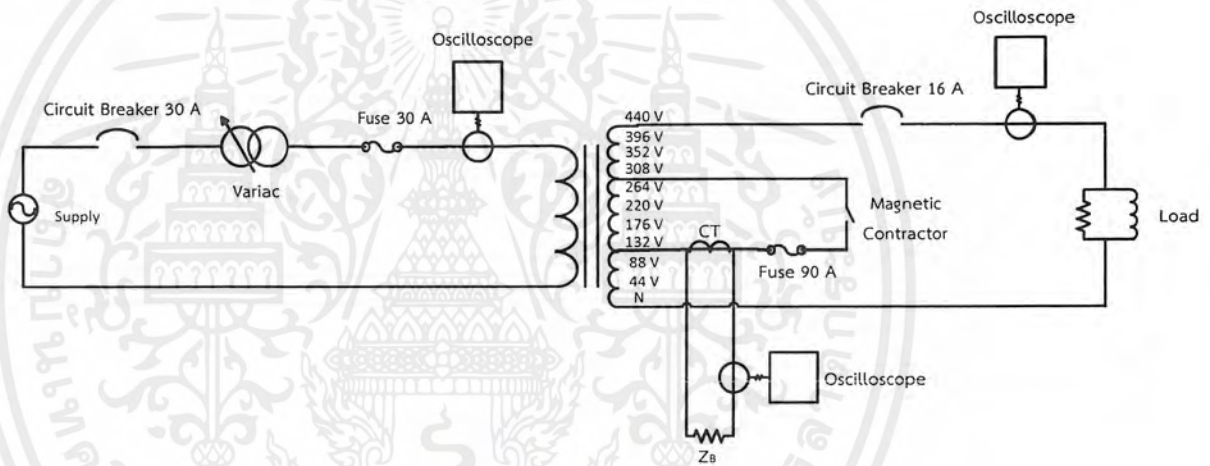


รูปที่ 3.4 โหลดความต้านทานความเหนี่ยวนำ

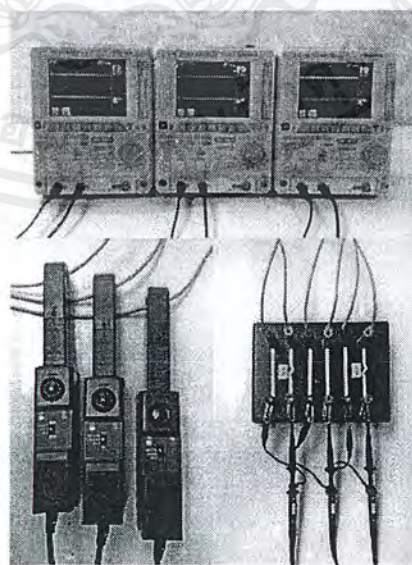
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 อุปกรณ์วัดปริมาณทางไฟฟ้า

อุปกรณ์วัดปริมาณทางไฟฟ้าและรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในการทดลองนี้คือ ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และหม้อแปลงกระแส (Current Transformer) ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ใช้ในการบันทึกผลการทดลอง รวมถึงรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ใช้ตรวจวัด 3 ตำแหน่งคือ ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อไปยังโหลด และทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบ โดยต่อจากขดลวดที่ใช้ทำการลัดวงจร โดยต่อผ่านหม้อแปลงกระแส 100/5 แอมแปร์ เบอร์เดน (Burden) 15 VA ความต้านทาน 0.6 โอห์ม ต่อทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส เพื่อลดขนาดกระแส ป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่อาจจะเกิดขึ้นกับออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.5



(ก) วงจรการทดลอง



(ข) ชุดการทดลอง

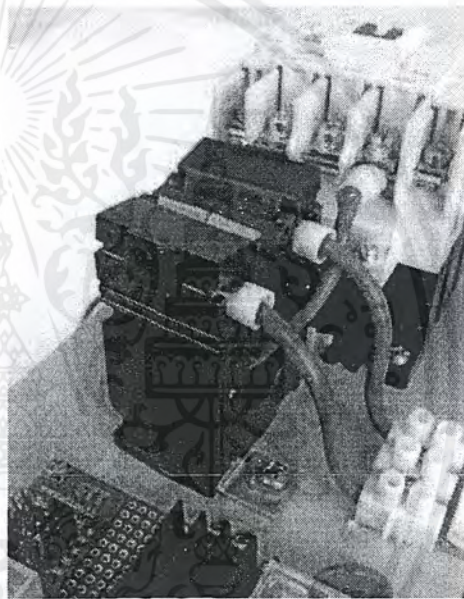
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์วัดปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. เมื่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4.1 การออกแบบหม้อแปลงกระแส (Current Transformer: CT)

การทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทำการแทบขดลวด หม้อแปลงไฟฟ้าด้านแรงสูง เพื่อทำการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด จากการศึกษา และทำการทดลองพบว่า เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีค่าสูงเกินค่าที่ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) จะสามารถวัดได้โดยตรงจึงเลือกใช้หม้อแปลงกระแส เพื่อลดขนาดกระแสไฟฟ้า ลงมา จะได้ไม่เกิดอันตรายต่อออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ที่ใช้ในการทดลอง

หม้อแปลงกระแสที่ใช้มีพิกัด 100/5 แอมแปร์ พิกัดเบอร์เดน (Rated burden) 15 VA โดยต้องวงจรเพื่อใช้ในการตรวจวัดดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 หม้อแปลงกระแส (Current Transformer: CT)

การเลือกใช้ความต้านทาน ( $Z_B$ ) เพื่อให้อุปกรณ์ตรวจวัดทางไฟฟ้าสามารถวัดขนาด และรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Z_B = \text{Rated burden in Ohms}$$

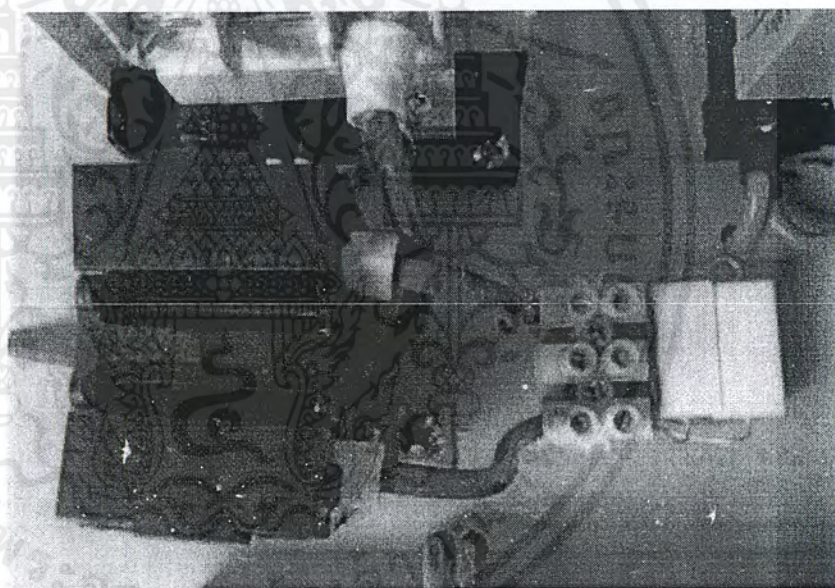
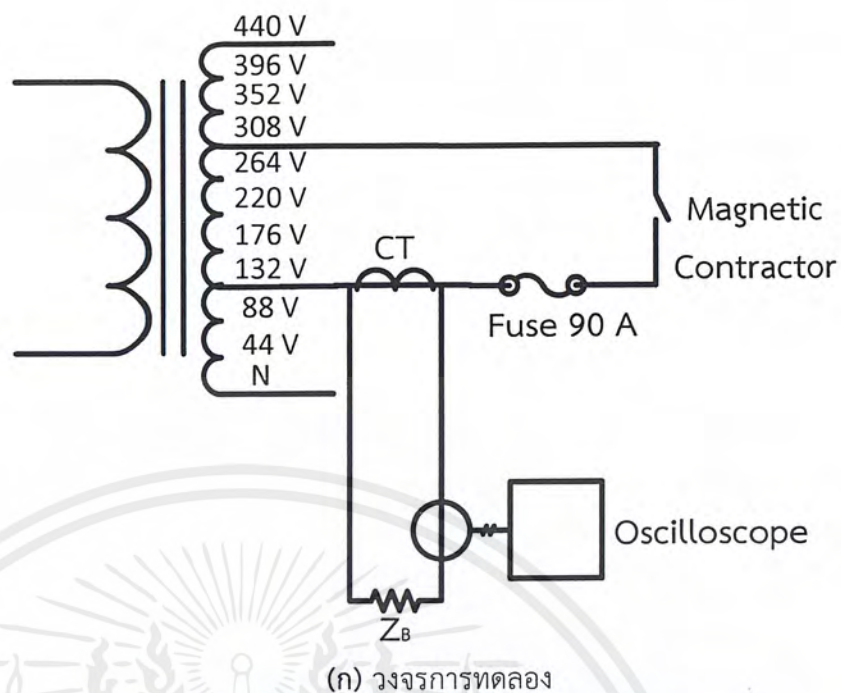
$$Z_B = \frac{\text{Rated VA}}{I_n^2}$$

$I_n$  = พิกัดกระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส

โดยที่ พิกัดหม้อแปลงกระแสที่ใช้มีค่า 15 VA พิกัดกระแสไฟฟ้า 100/5 A จะได้ ค่าความต้านทานเท่ากับ

$$Z_B = \frac{15}{5^2} = 0.6 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

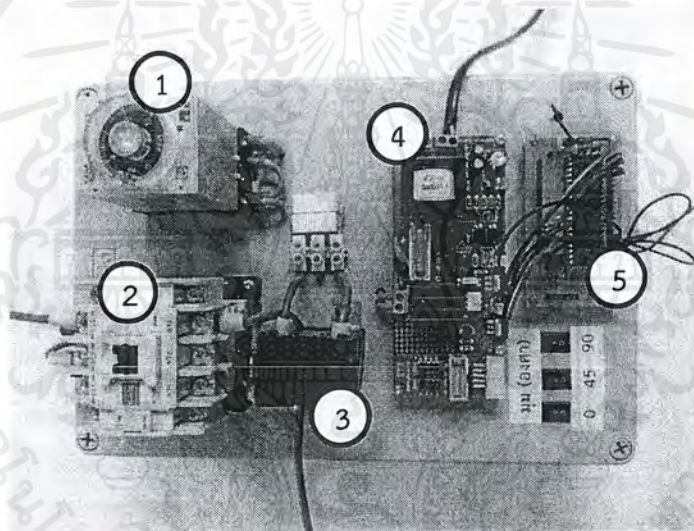


รูปที่ 3.7 วงจรการต่อหม้อแปลงกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

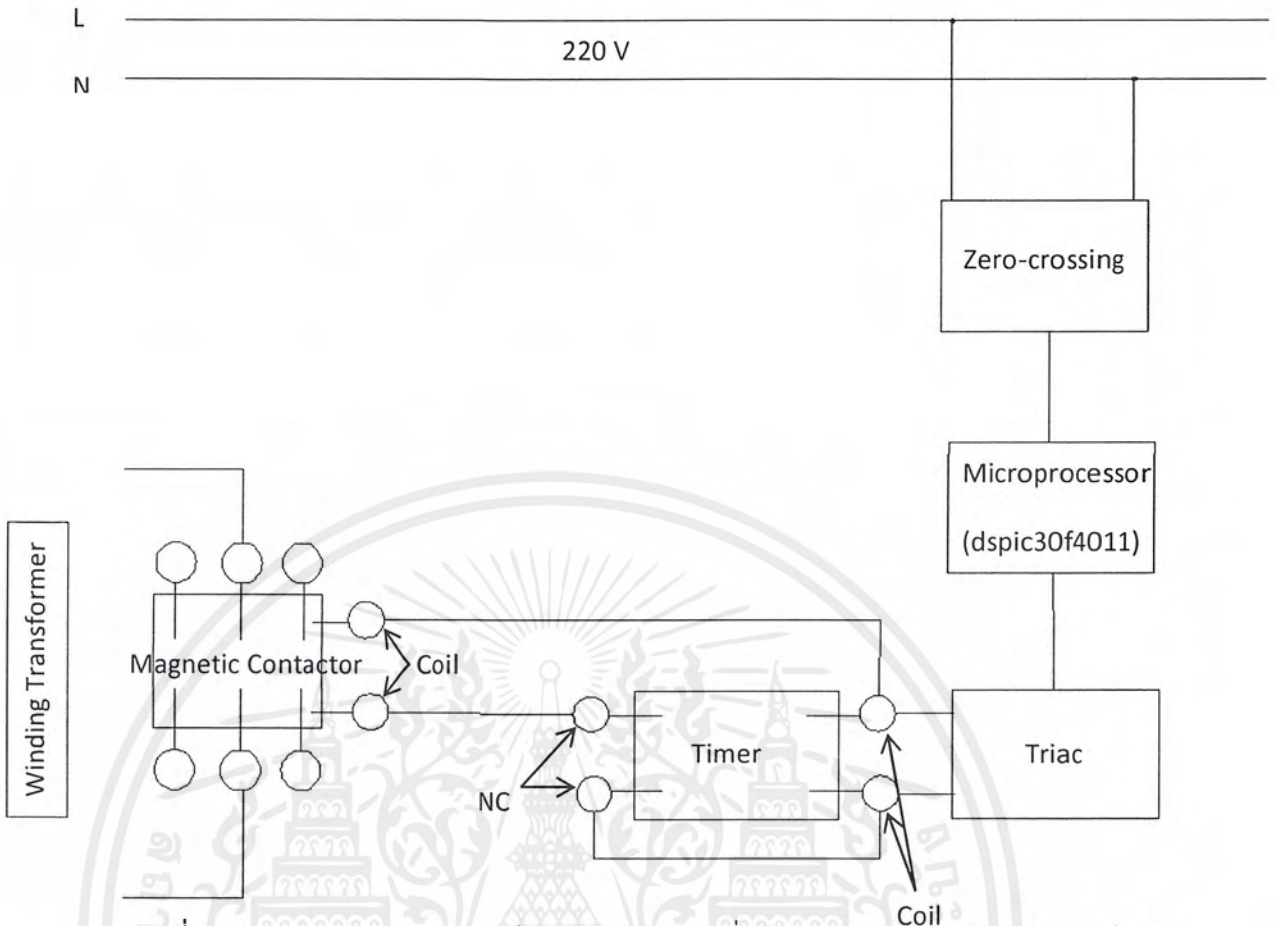
### 3.1.5 ชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุมเริ่มต้นการลัดวงจร

การทดลองการเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลง ได้ออกแบบชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุมเริ่มต้นการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor) ดังรูปที่ 3.8 หมายเลขที่ 2 โดยมีสัญญาณจากไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) รุ่น dsPIC30F4011 ดังรูปที่ 3.8 หมายเลขที่ 5 เขียนคำสั่งให้ไตรแอก (Triac) ทำงานสั่งแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic contactor) ต่อยังระหว่างขดลวดที่ทำการลัดวงจร โดยจ่ายไฟ 220 โวลต์ แก้ววงจร ซีโรครอสซิง (Zero crossing) ดังรูปที่ 3.8 หมายเลขที่ 4 เพื่อควบคุมมุมเริ่มต้นที่ 0, 45, 90 องศา หลังจากเกิดการลัดวงจรแล้วใช้ตัวตั้งเวลา (Timer) ดังรูปที่ 3.7 หมายเลขที่ 1 ในการสั่งให้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic contactor) ตัดวงจรออกภายในเวลา 2 วินาที เพื่อป้องกันการเกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 วงจรกำลังและวงจรควบคุมตามรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10

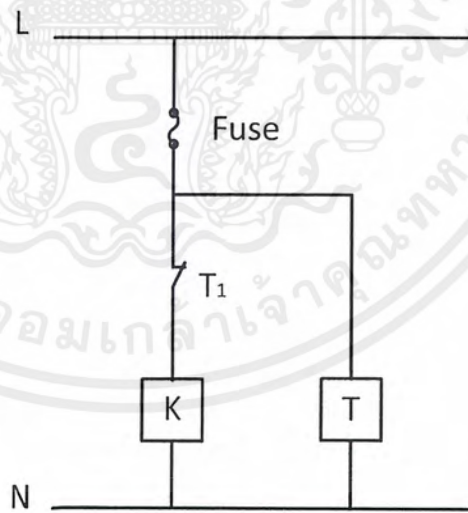


1. ตัวตั้งเวลา (Timer)
2. แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic contactor)
3. หม้อแปลงกระแส (Current Transformer)
4. วงจร ซีโร-ครอสซิง (Zero crossing)
5. ไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor)

รูปที่ 3.8 ชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุมเริ่มต้นการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 วงจรกำลังของชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุมเริ่มต้นการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

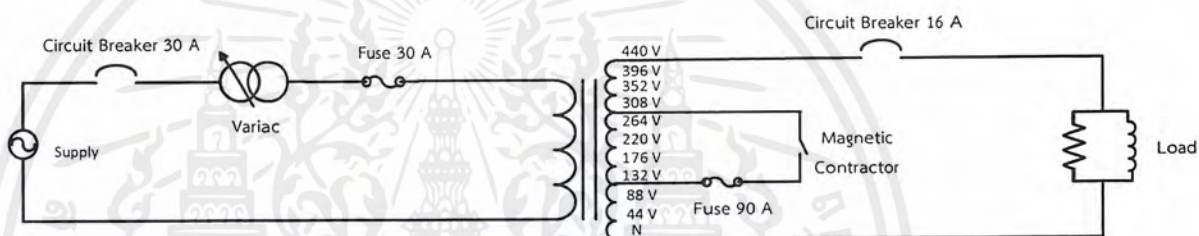


รูปที่ 3.10 วงจรควบคุมของชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุมเริ่มต้นการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

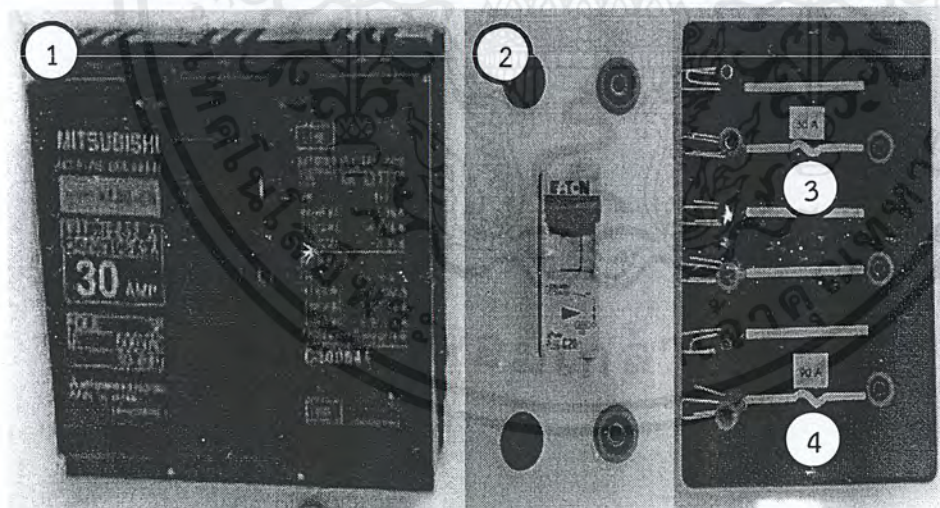
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.6 การป้องกันชุดทดลอง

ชุดทดลองนี้มีการป้องกัน 4 ตำแหน่ง ได้แก่ เซอร์กิตเบรกเกอร์ 2 ตำแหน่ง และ ฟิวส์อีก 2 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เซอร์กิตเบรกเกอร์ทางด้านปฐมภูมิ (หมายเลข 1) ป้องกันความผิดพลาดระหว่างห้องปฏิบัติการ กับหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ ซึ่งทำงานเมื่อกระแสไฟฟ้าเกิน 30 แอมแปร์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ทางด้านทุติยภูมิ (หมายเลข 2) ป้องกันระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบกับโหลดทางไฟฟ้าซึ่งทำงานเมื่อกระแสไฟฟ้าเกิน 16 แอมแปร์ ฟิวส์ทางด้านปฐมภูมิ (หมายเลข 3) ซึ่งต่ออยู่ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ และหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ จะทำงานเมื่อกระแสไฟฟ้าเกิน 30 แอมแปร์ และฟิวส์ป้องกันการลัดวงจร (หมายเลข 4) ซึ่งต่อกับขดลวดที่ใช้ทำการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ จะทำงานเมื่อกระแสไฟฟ้าเกิน 90 แอมแปร์



(ก) วงจรการทดลอง



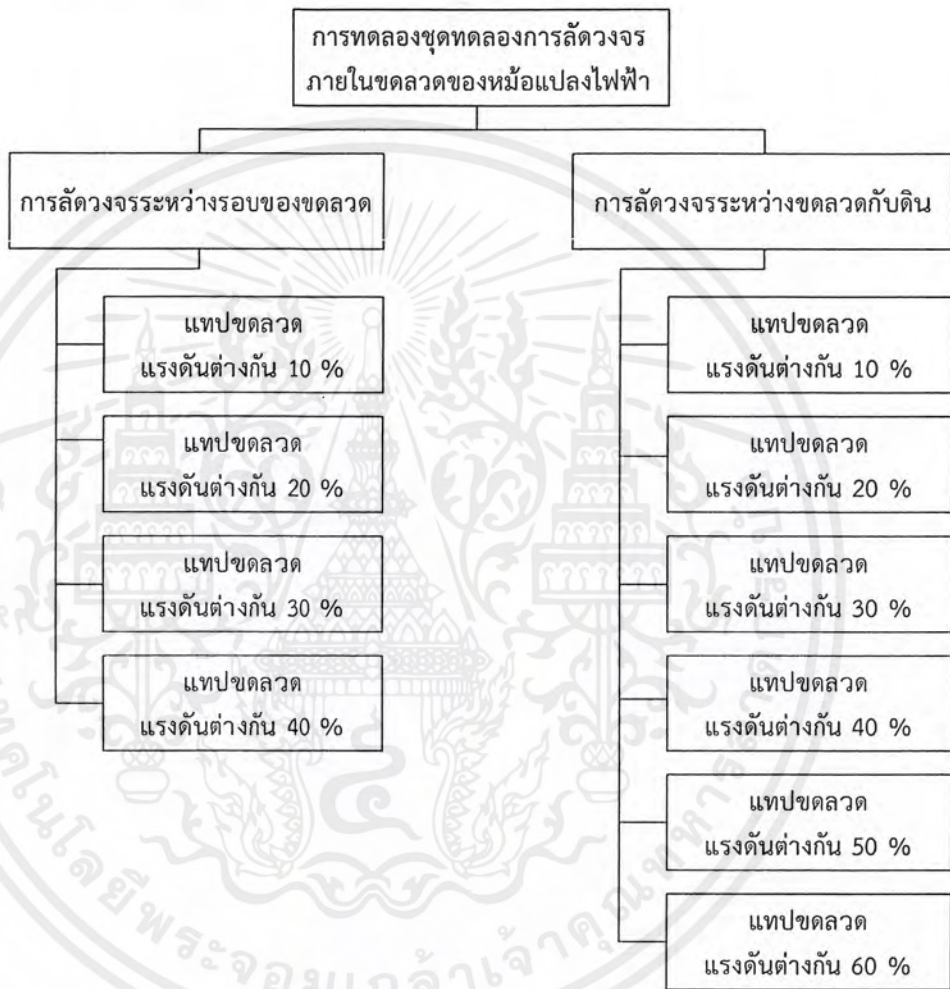
1. เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) 30 แอมแปร์
2. เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) 16 แอมแปร์
3. ฟิวส์ (Fuse) 30 แอมแปร์
4. ฟิวส์ (Fuse) 90 แอมแปร์

(ข) ชุดการทดลอง

รูปที่ 3.11 การป้องกันชุดทดลอง

## บทที่ 4 ผลการทดลอง

รายละเอียดของบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองของชุดทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส โดยการทดลองมี 2 ลักษณะคือ การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด และการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



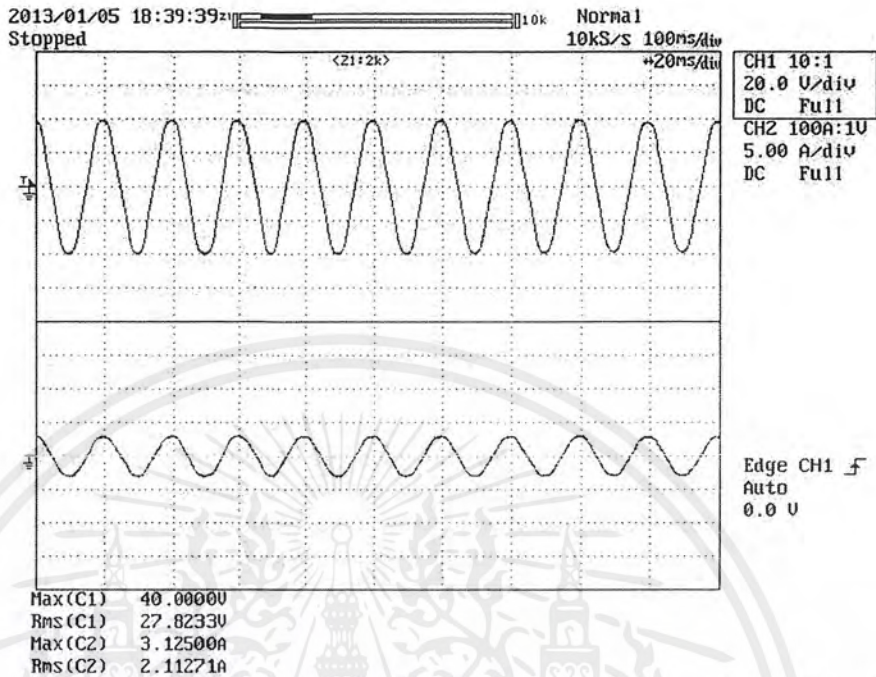
รูปที่ 4.1 กรณีการทดลองการลัดวงจร

### 4.1 การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด

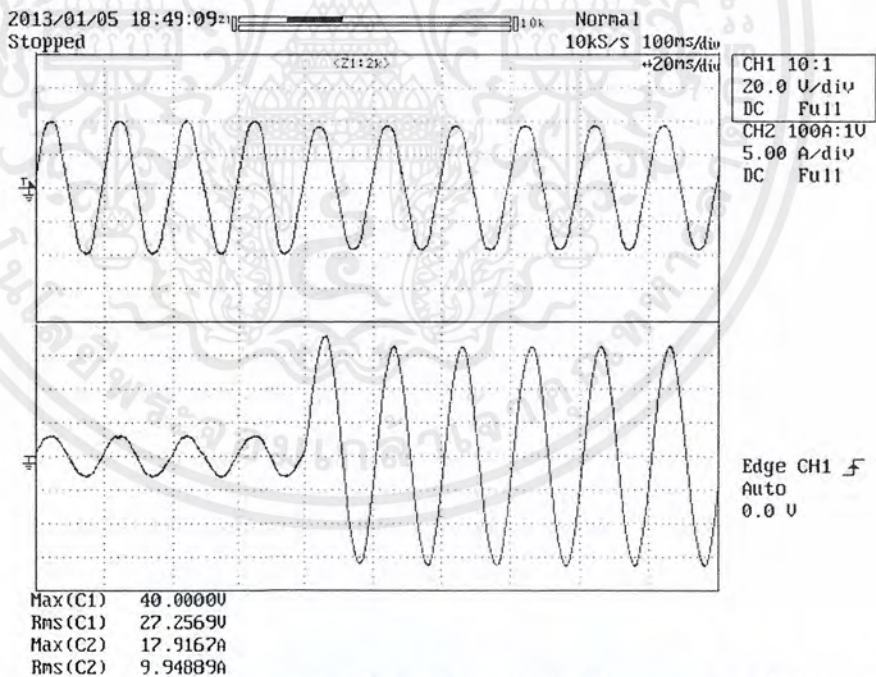
ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดโดยมีแรงดันไฟฟ้า 27.5/55 โวลต์ มุมเริ่มต้นที่ 0 องศา จ่ายโหลดที่ 156 วัตต์ โดยการทดลองกรณีนี้จะทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างแทปขดลวด เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างแทปขดลวดจะมีผลต่อกระแสลัดวงจรหรือไม่ ซึ่งผลจากการทดลองเป็นดังนี้

#### 4.1.1 กรณีแทปขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์

##### 4.1.1.1 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 44-88

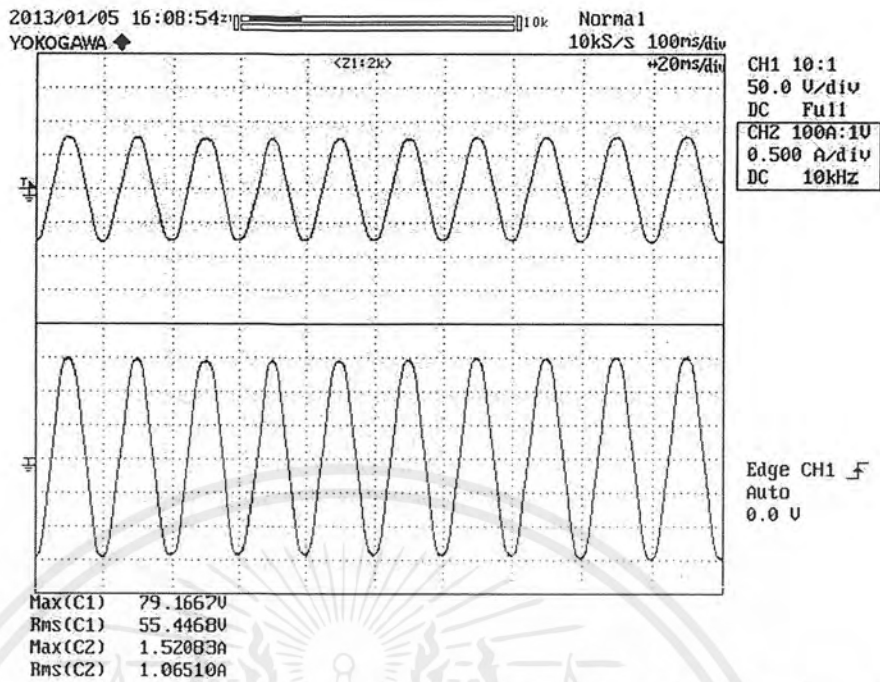


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

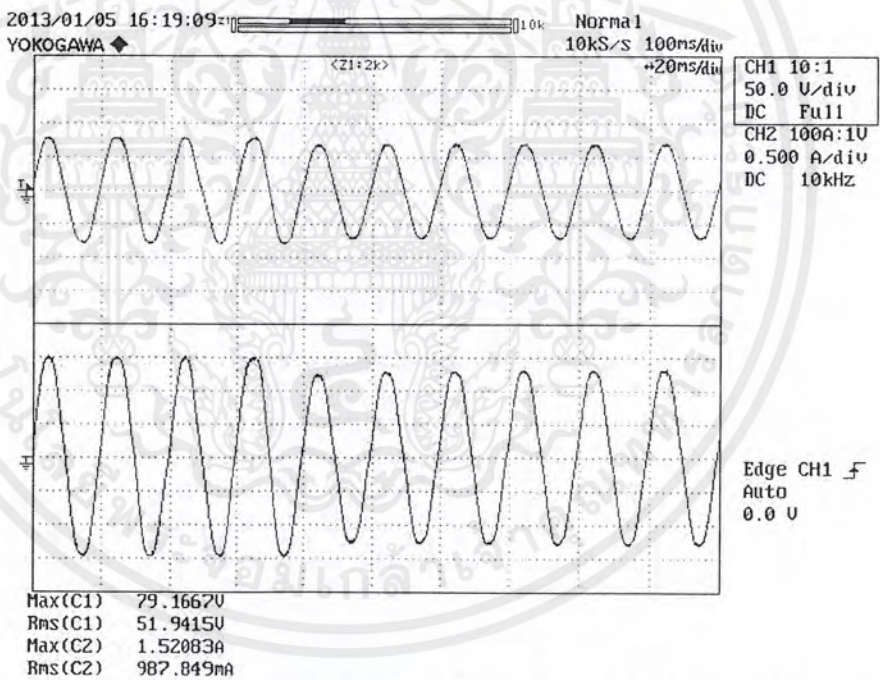


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.2 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88



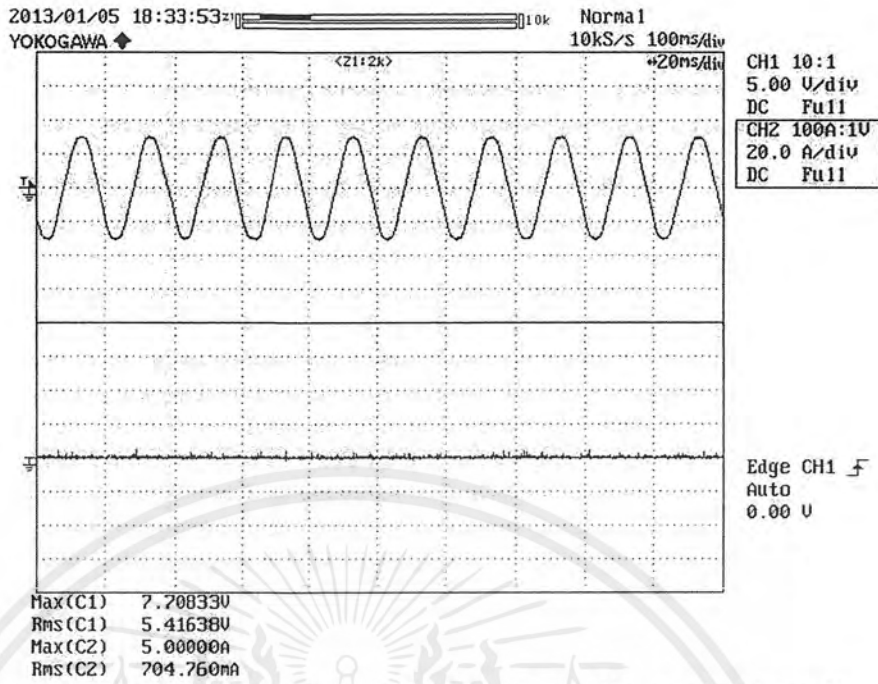
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



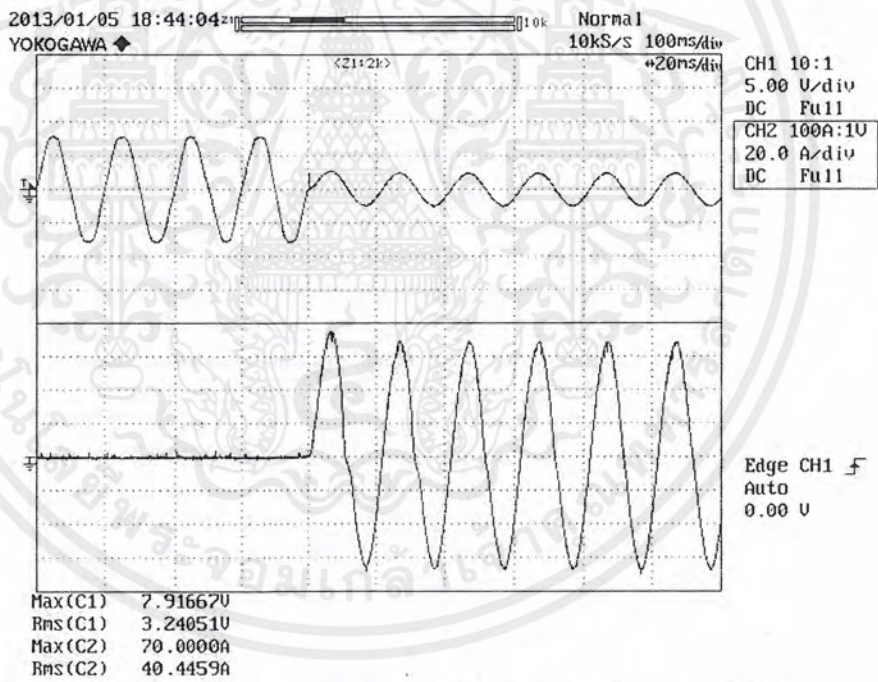
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.2 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 44-88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



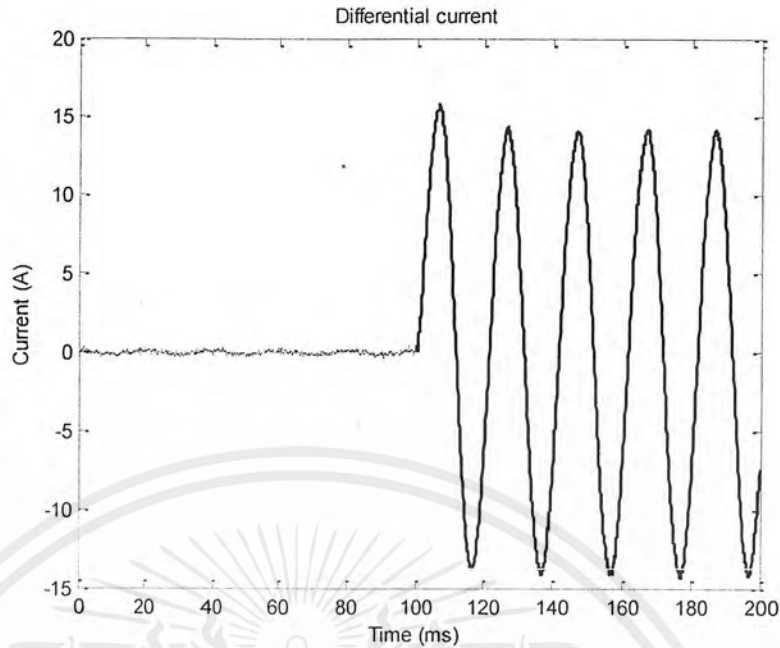
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.2 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 44-88



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.2 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซนต์ ตำแหน่ง 44-88

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.2

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.11 แอมแปร์ เป็น 12.67 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 27.82 โวลต์ เป็น 26.02 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.2 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 1.07 แอมแปร์ เป็น 0.93 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 55.45 โวลต์ เป็น 49.50 โวลต์

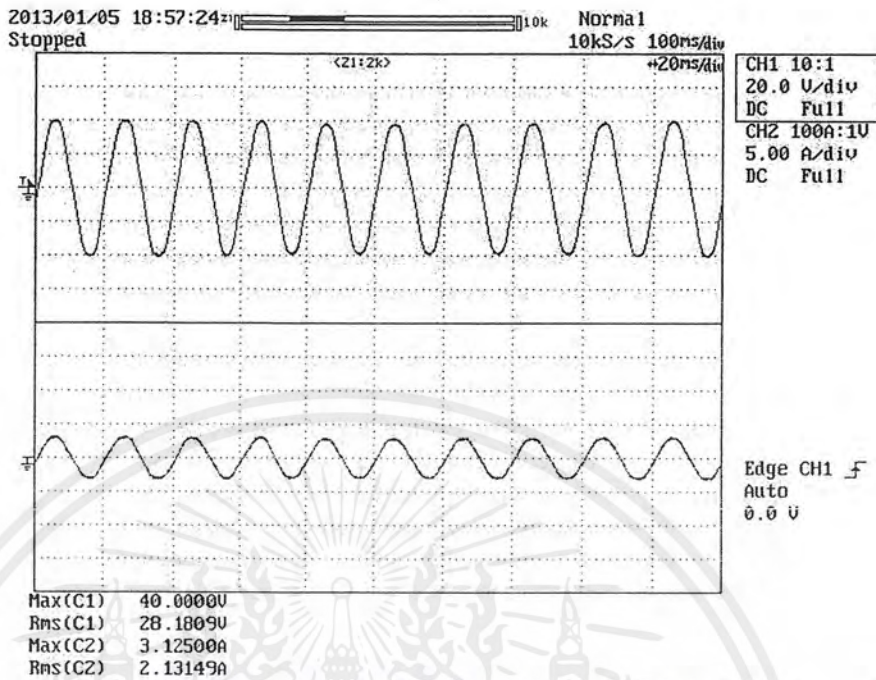
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 44-88 ดังรูปที่ 4.2 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 49.50 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 5.42 โวลต์ เป็น 1.94 โวลต์

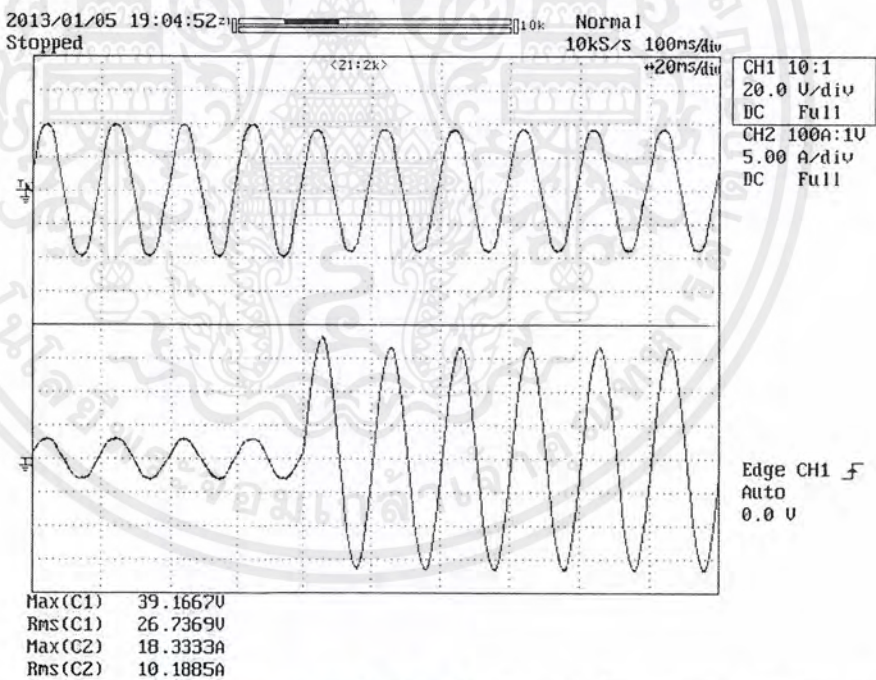
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.2 (ซ)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.03 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 10.81 แอมแปร์

## 4.1.1.2 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 88-132

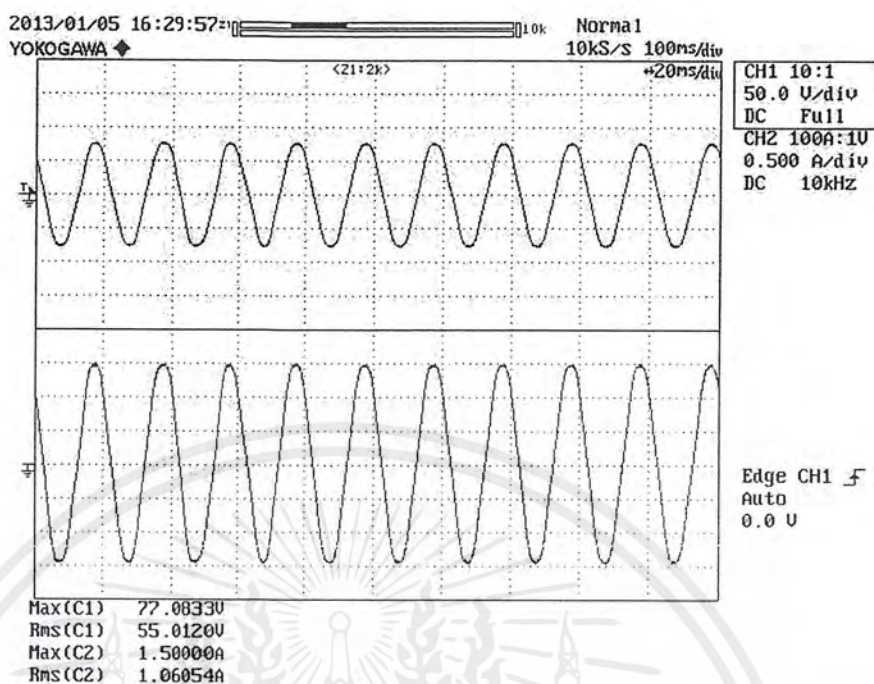


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

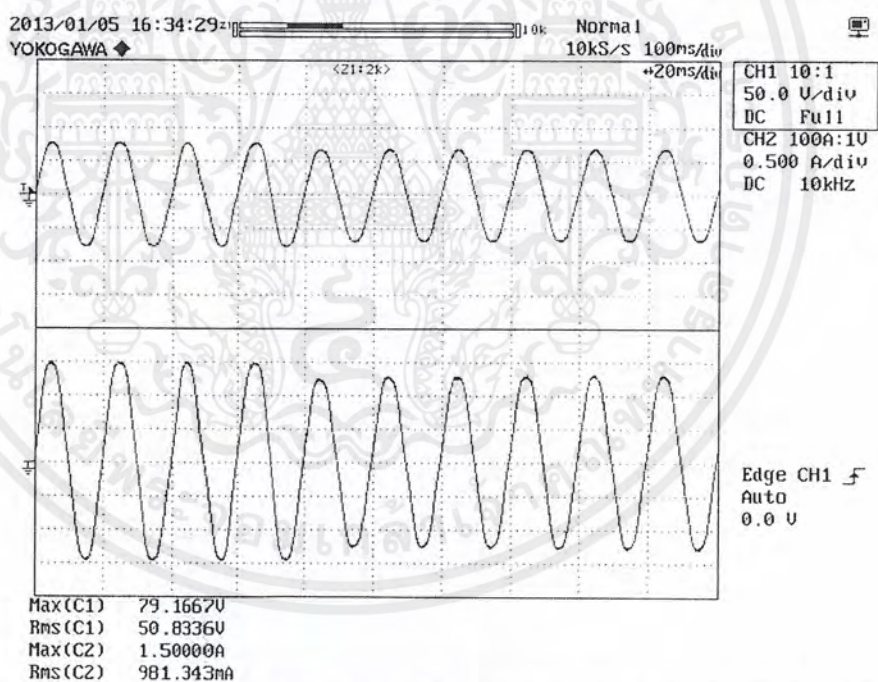


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.3 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 88-132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



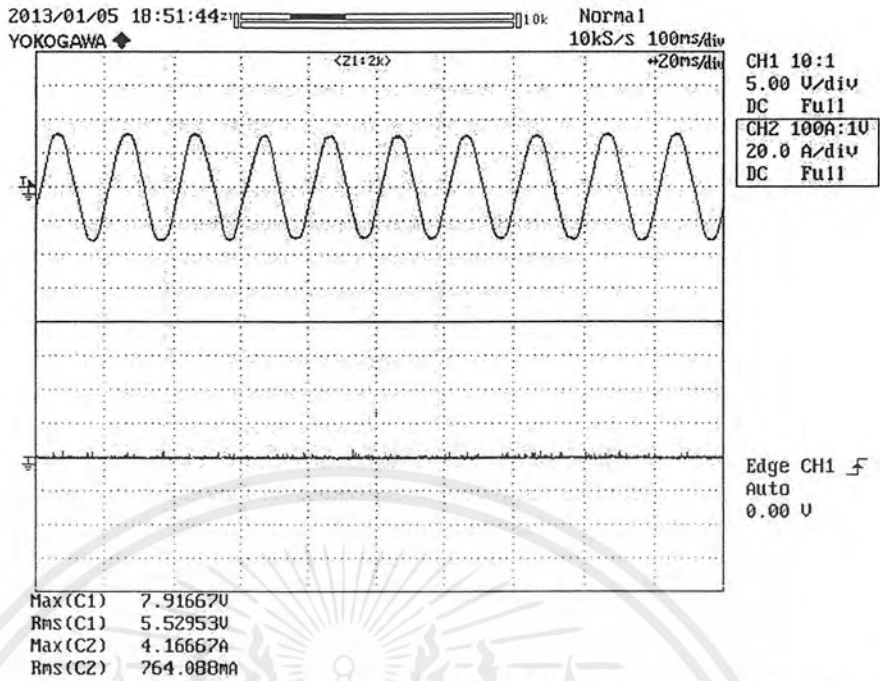
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



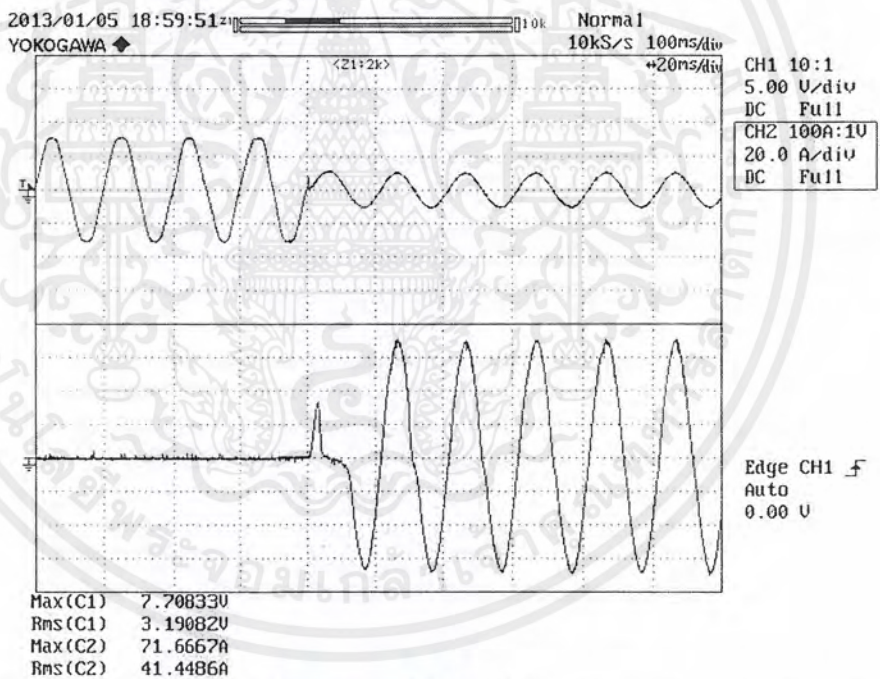
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.3 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 88-132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

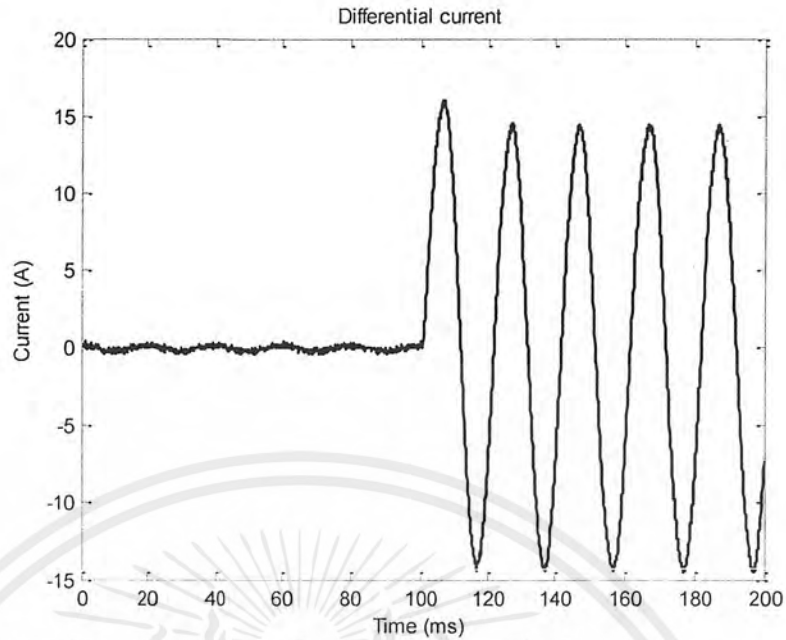


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.3 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซนต์

ตำแหน่ง 88-132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อนและหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.3 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 88-132

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.3

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามียุทธเพิ่มขิ้นจาก 2.13 แอมแปร์ เป็น 12.96 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามียุทธลดลงจาก 28.18 โวลต์ เป็น 26.02 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.3 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามียุทธลดลงจาก 1.06 แอมแปร์ เป็น 0.93 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามียุทธลดลงจาก 55.01 โวลต์ เป็น 48.79 โวลต์

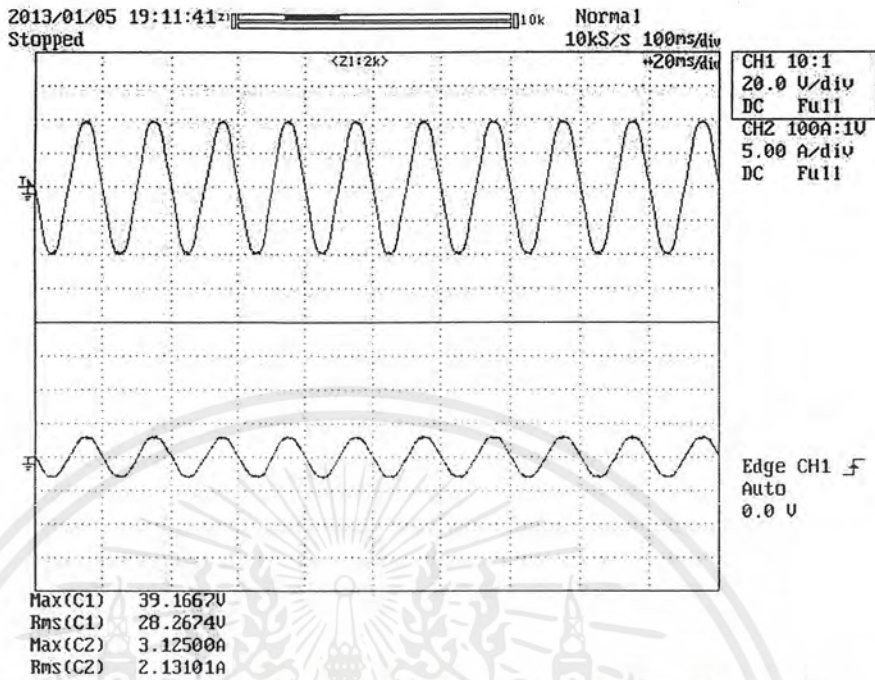
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 88-132 ดังรูปที่ 4.3 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามียุทธเพิ่มขิ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 50.68 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามียุทธลดลงจาก 5.53 โวลต์ เป็น 1.94 โวลต์

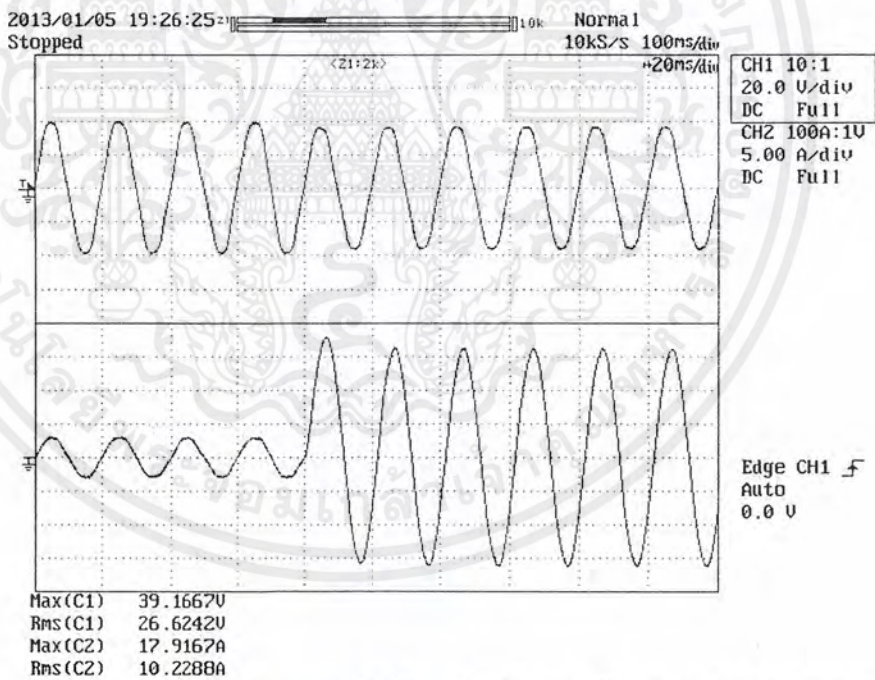
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.3 (ซ)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.01 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 11.10 แอมแปร์

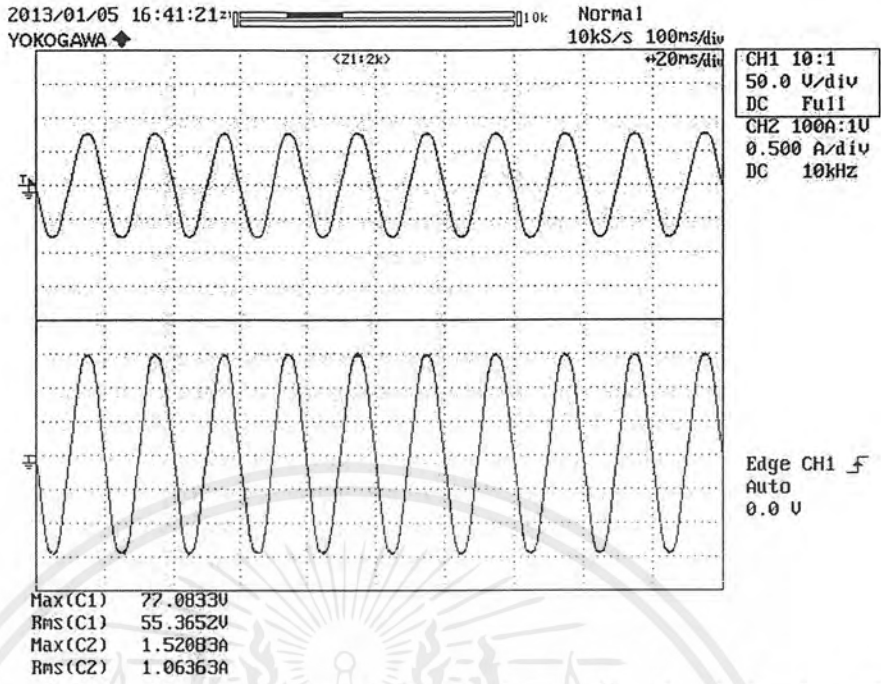
#### 4.1.1.3 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 132-176



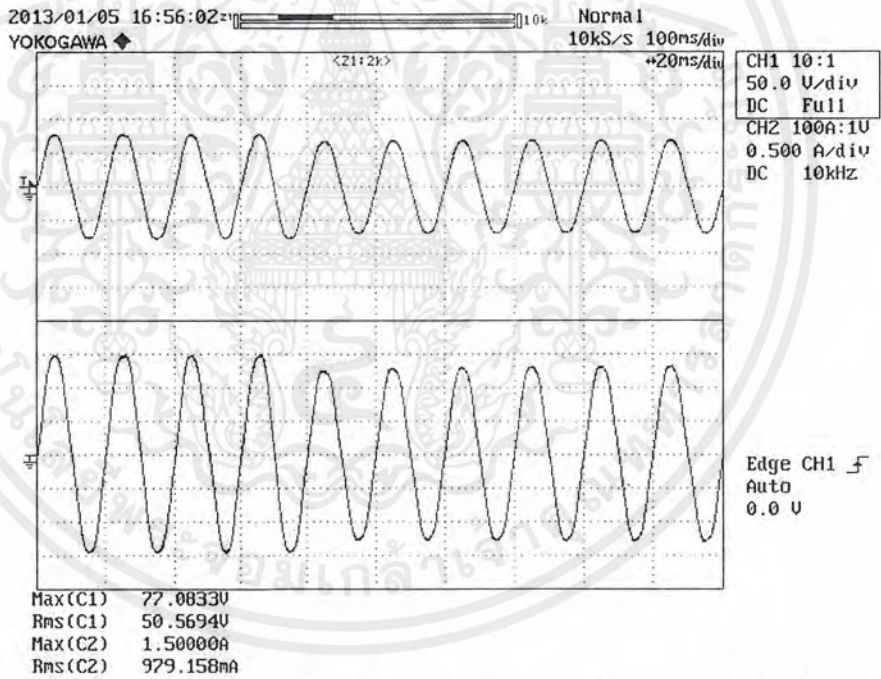
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.4 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซนต์ ตำแหน่ง 132-176

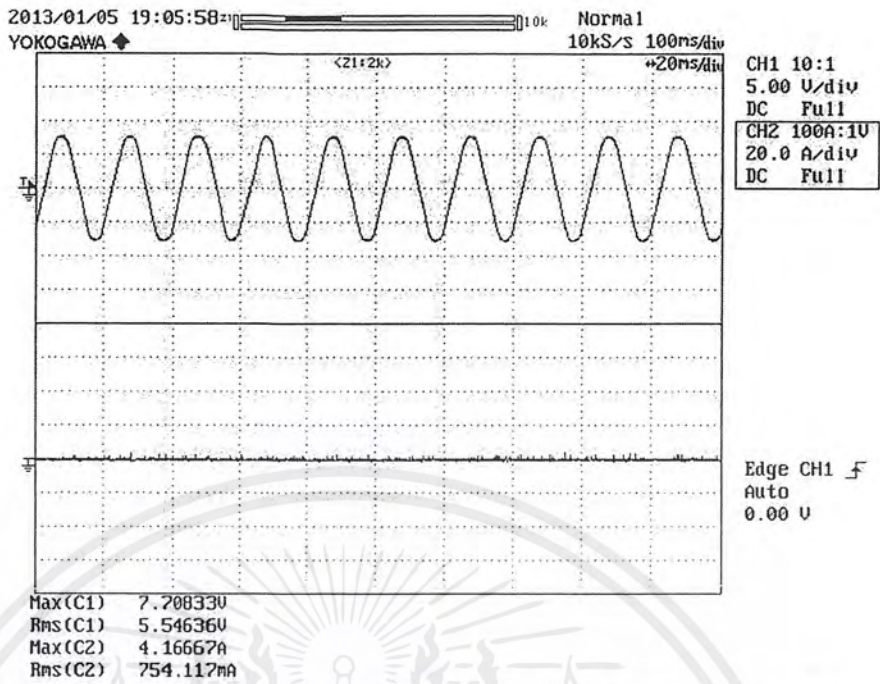


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

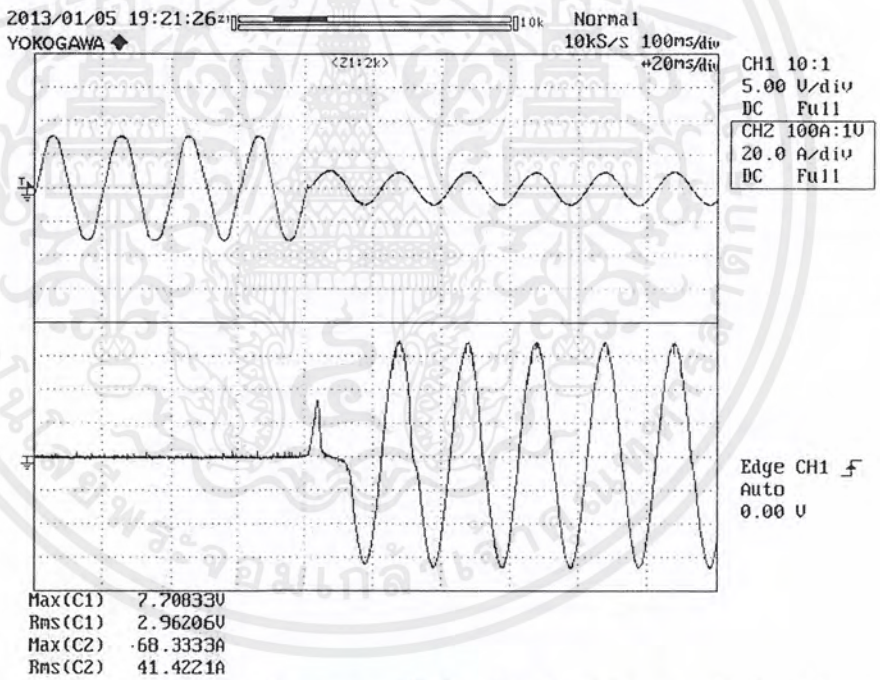


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.4 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 132-176



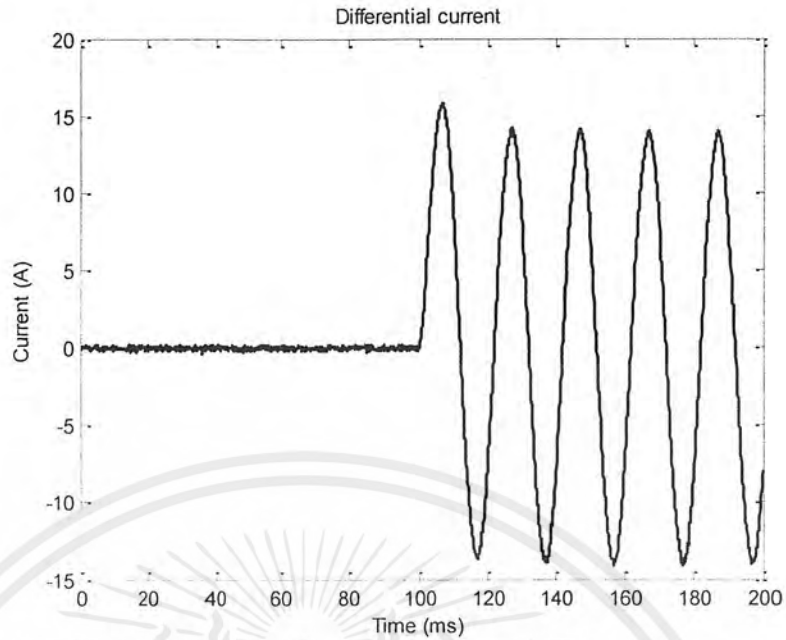
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.4 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 132-176



(ข) กระแสผลต่างก่อนและหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.4 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 132-176

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.4

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.13 แอมแปร์ เป็น 12.67 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.27 โวลต์ เป็น 26.02 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.4 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.06 แอมแปร์ เป็น 0.95 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.37 โวลต์ เป็น 48.79 โวลต์

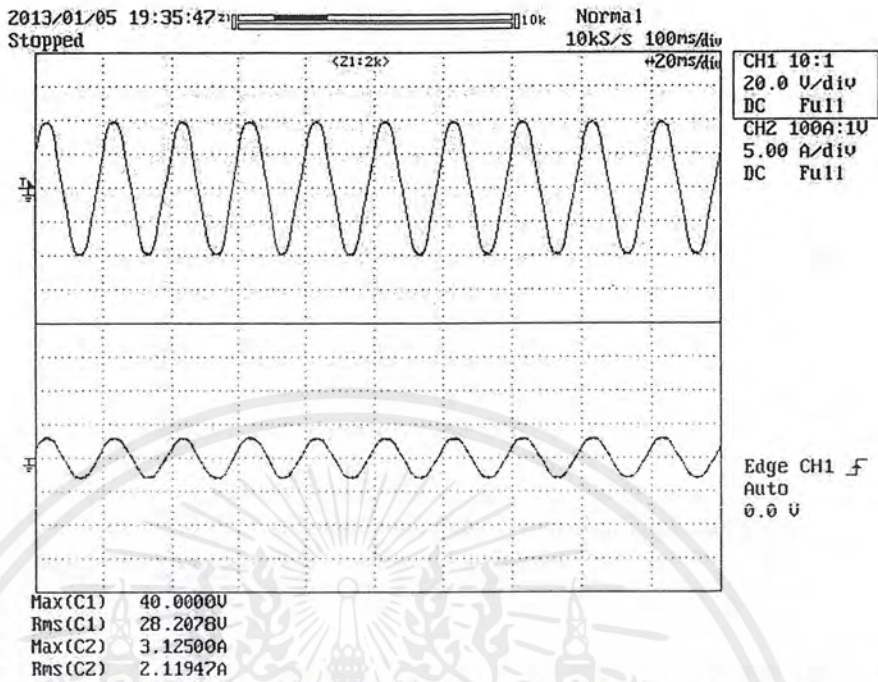
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 132-176 ดังรูปที่ 4.4 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 48.32 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 5.55 โวลต์ เป็น 1.87 โวลต์

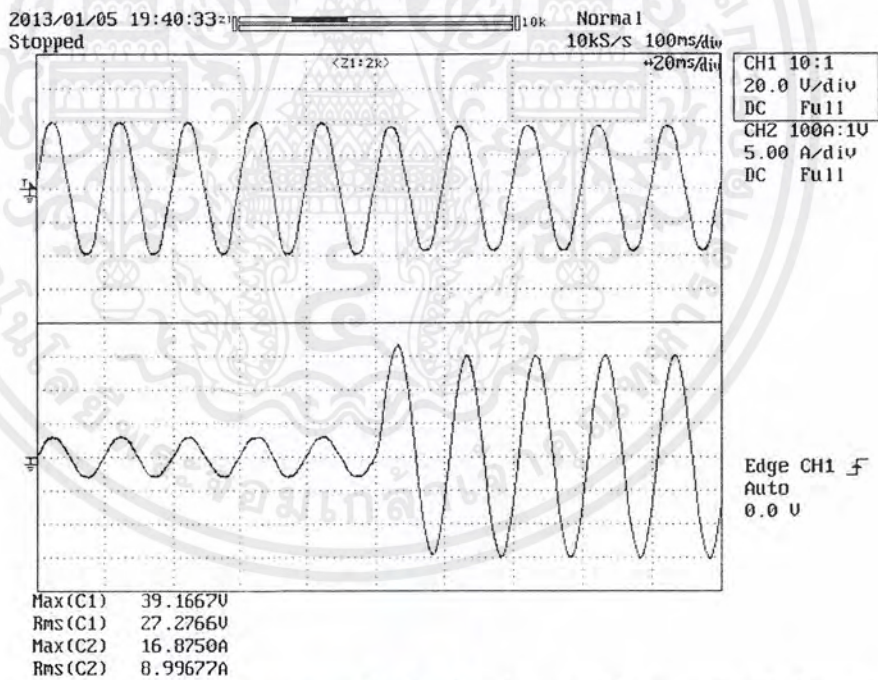
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.4 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.01 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 10.77 แอมแปร์

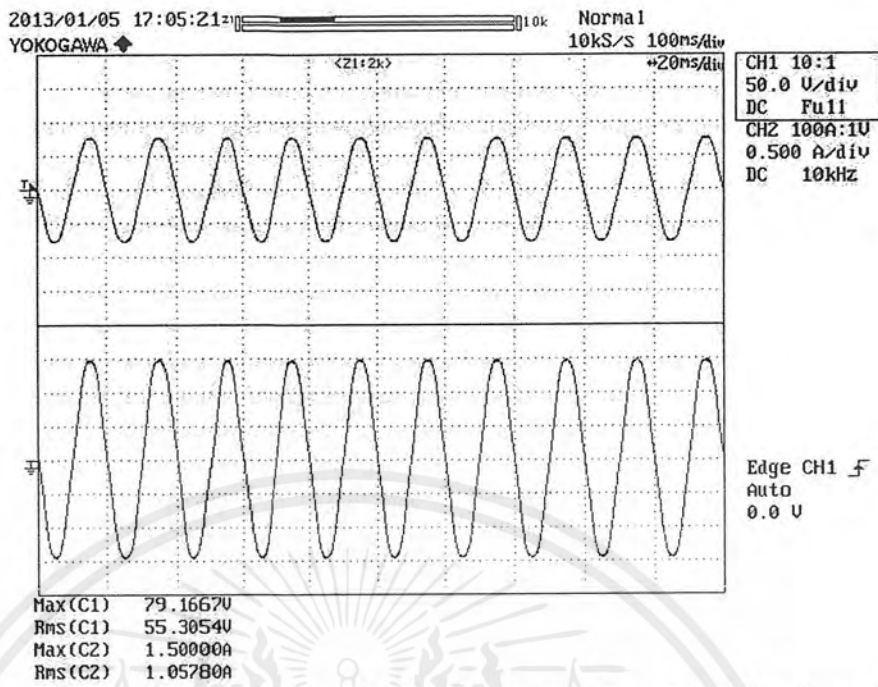
#### 4.1.1.4 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 176-220



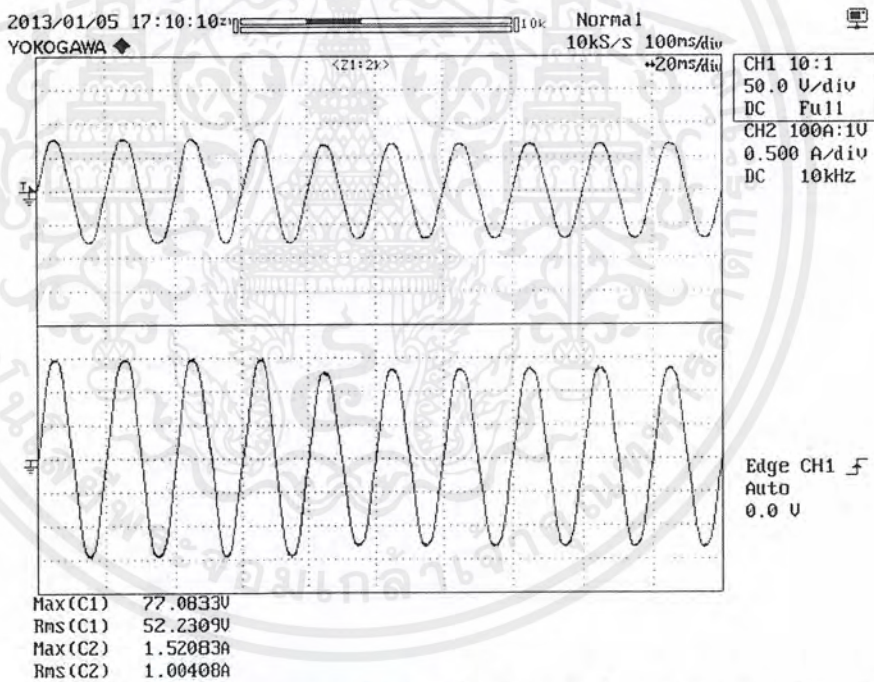
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



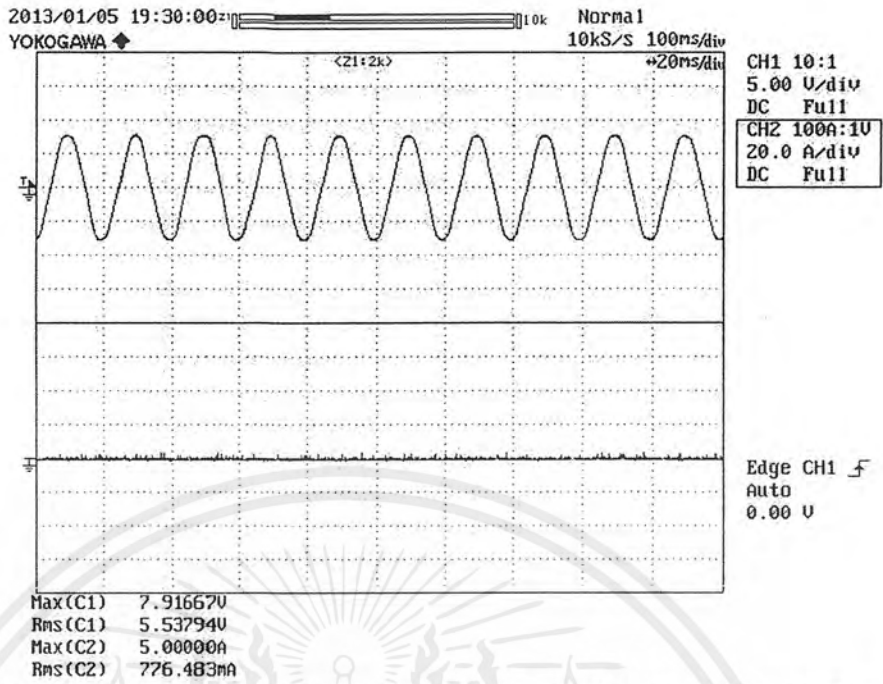
(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.5 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 176-220



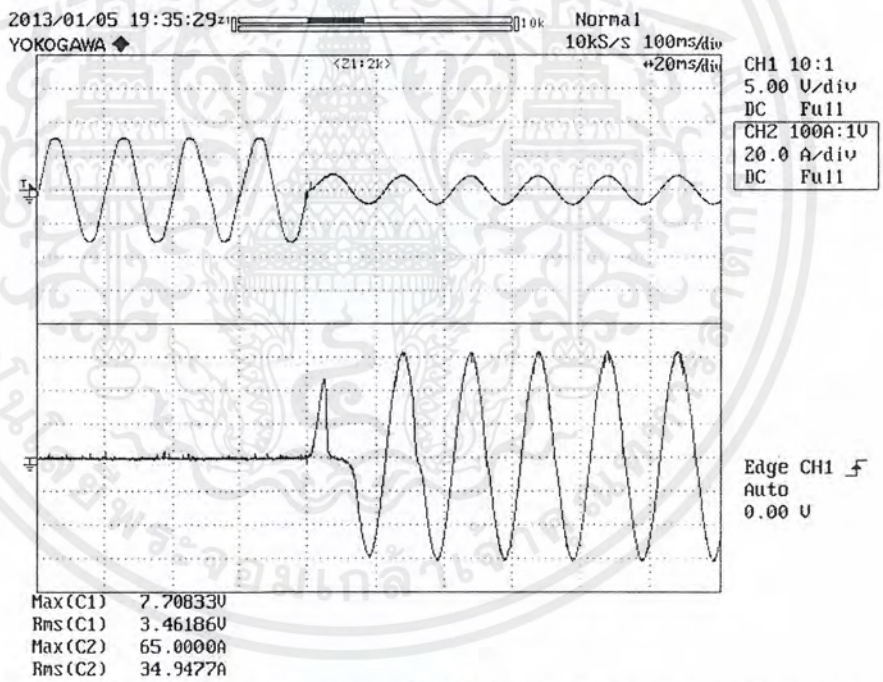
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.5 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซนต์ ตำแหน่ง 176-220



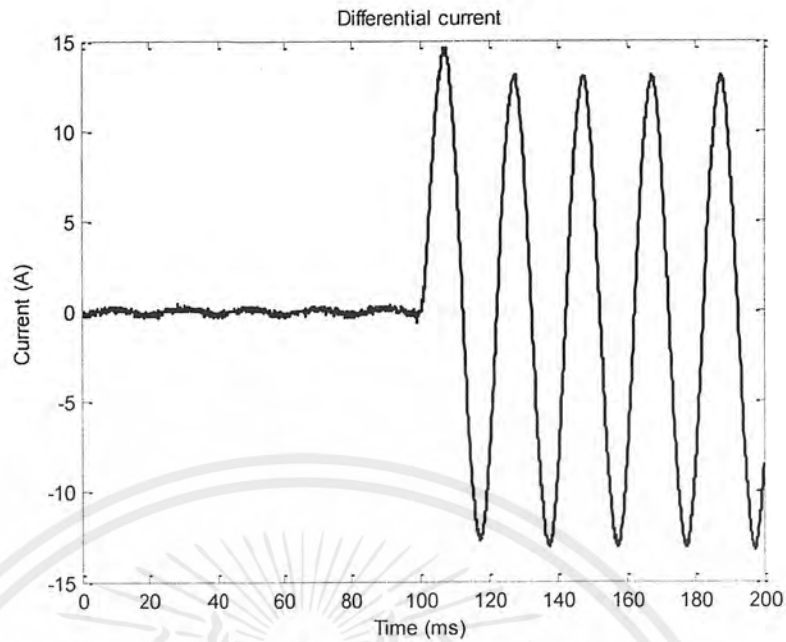
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.5 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 176-220



(ข) กระแสผลต่างก่อนและหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.5 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 176-220

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.5

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.5 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.12 แอมแปร์ เป็น 11.94 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.21 โวลต์ เป็น 26.59 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.5 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.06 แอมแปร์ เป็น 0.95 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.31 โวลต์ เป็น 50.56 โวลต์

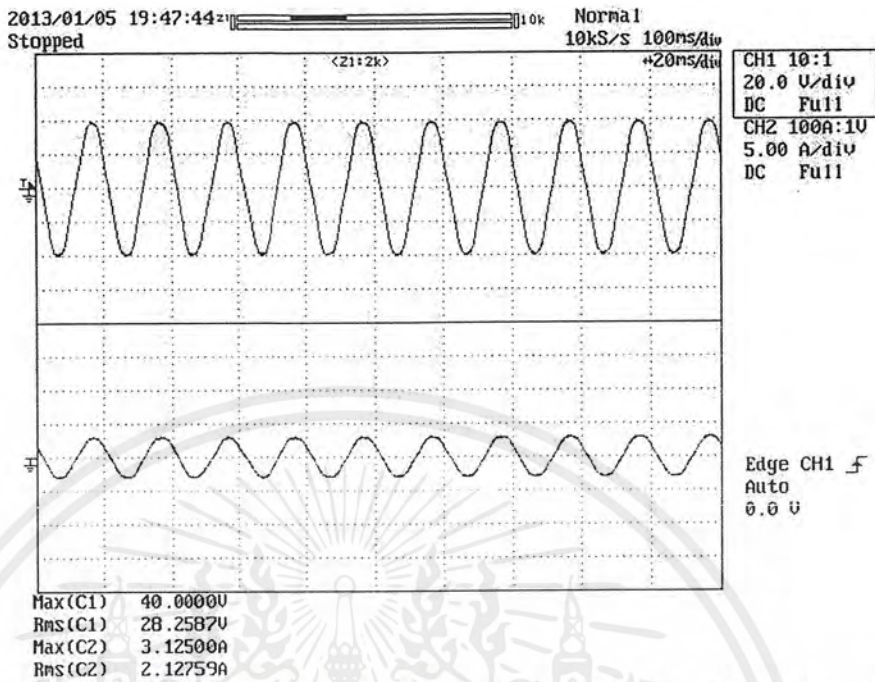
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 176-220 ดังรูปที่ 4.5 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 45.96 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 5.54 โวลต์ เป็น 1.87 โวลต์

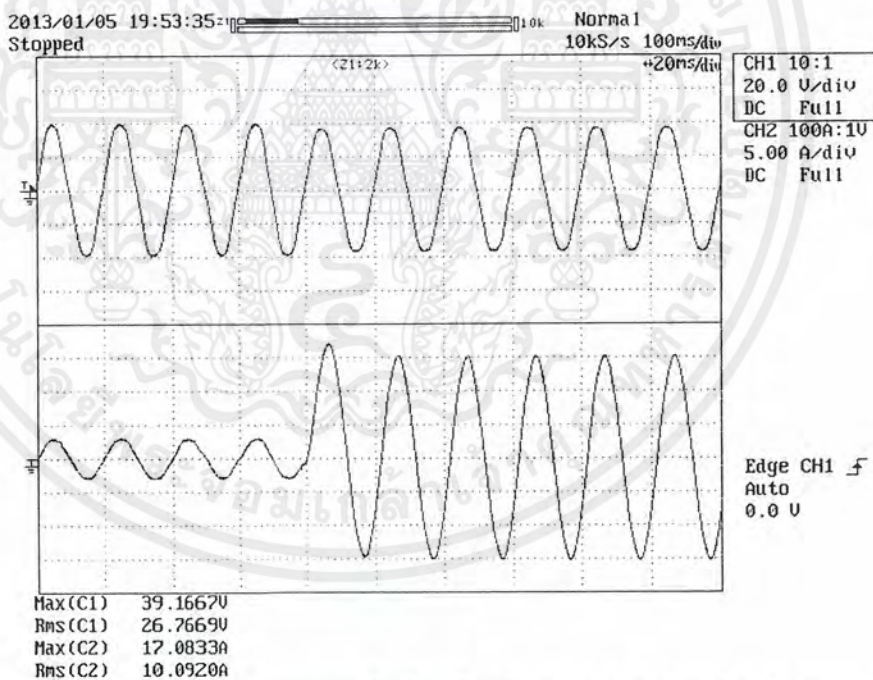
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.5 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 10.04 แอมแปร์

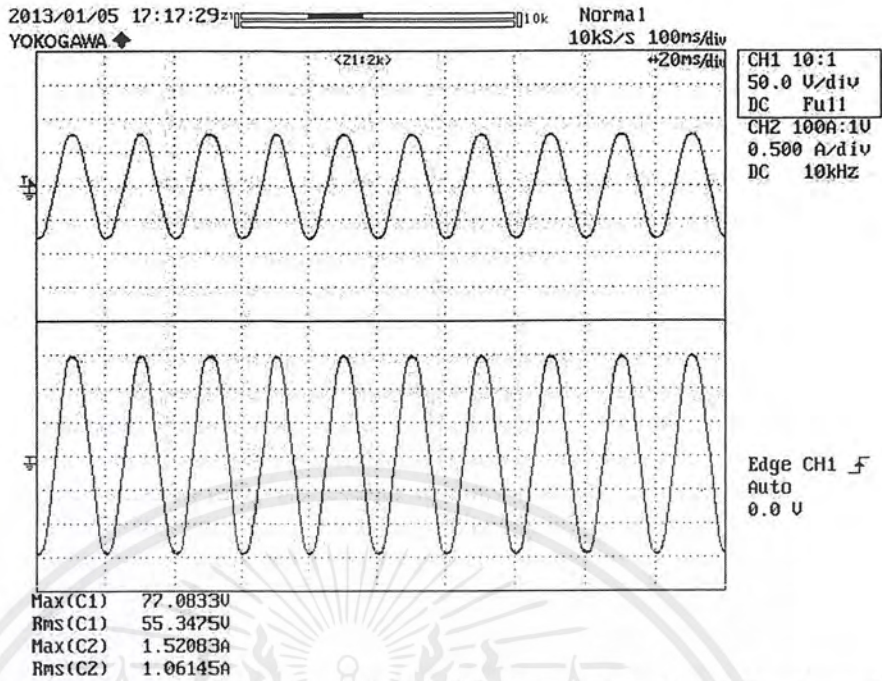
#### 4.1.1.5 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 220-264



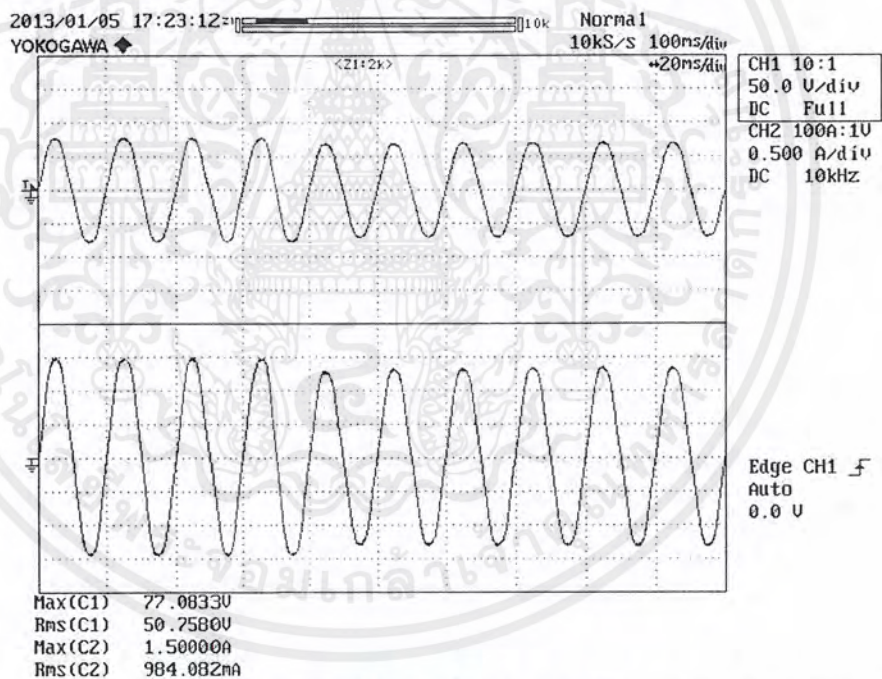
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.6 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 220-264

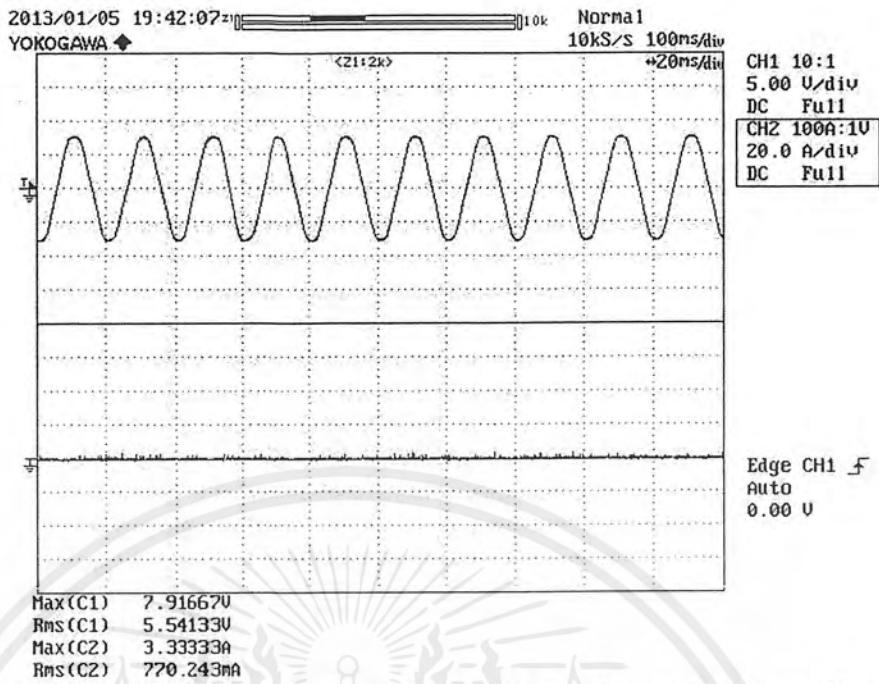


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

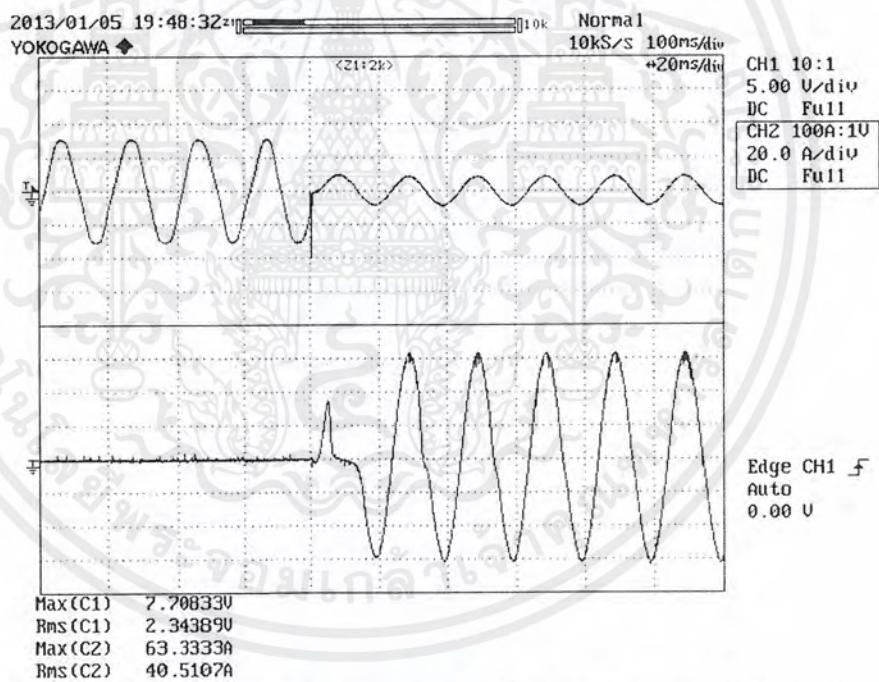


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.6 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 220-264



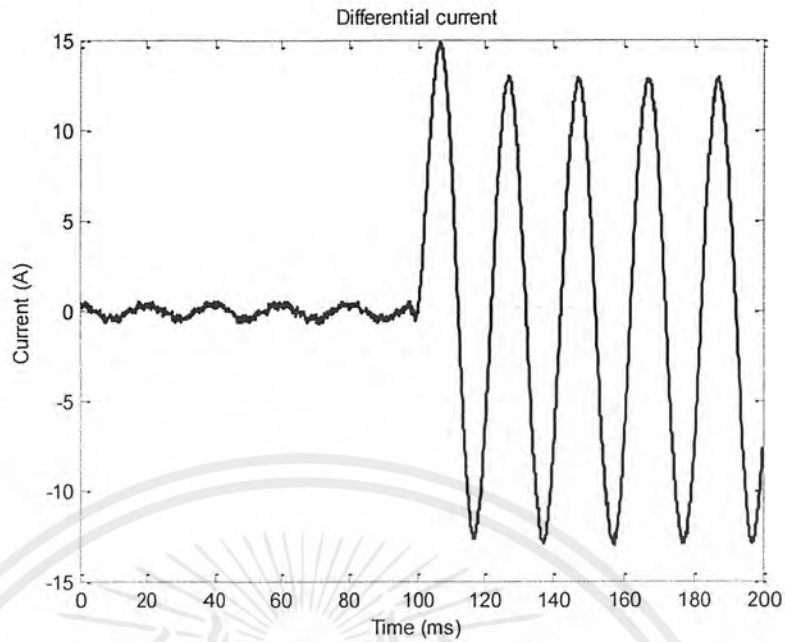
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.6 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 220-264



(ข) กระแสผลต่างก่อนและหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.6 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 220-264

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.6

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.13 แอมแปร์ เป็น 12.08 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.26 โวลต์ เป็น 25.88 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.6 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.06 แอมแปร์ เป็น 0.95 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.35 โวลต์ เป็น 50.56 โวลต์

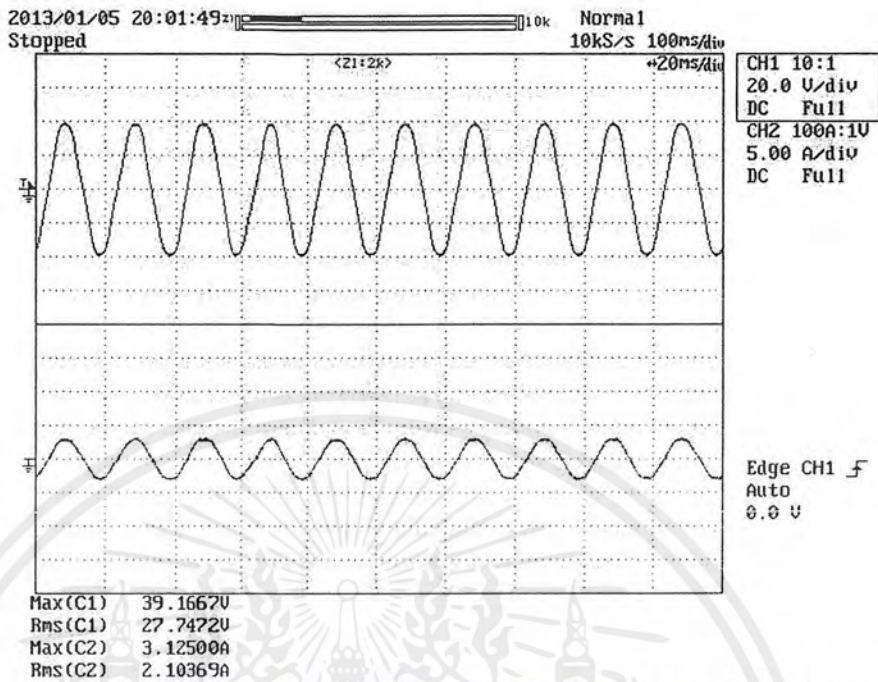
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 220-264 ดังรูปที่ 4.6 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 44.78 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 5.54 โวลต์ เป็น 1.77 โวลต์

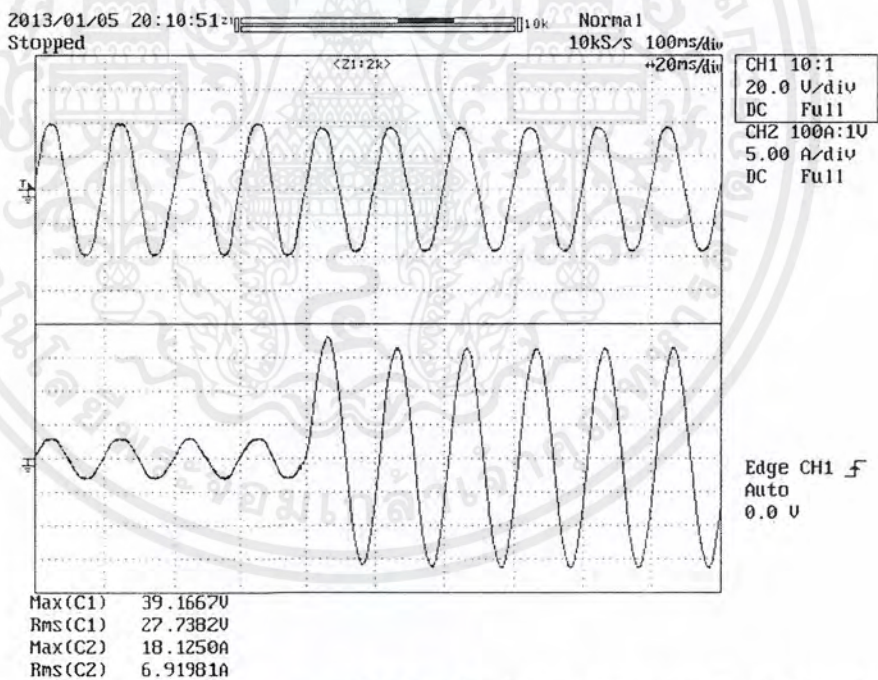
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.6 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.01 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 10.18 แอมแปร์

## 4.1.1.6 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 264-308

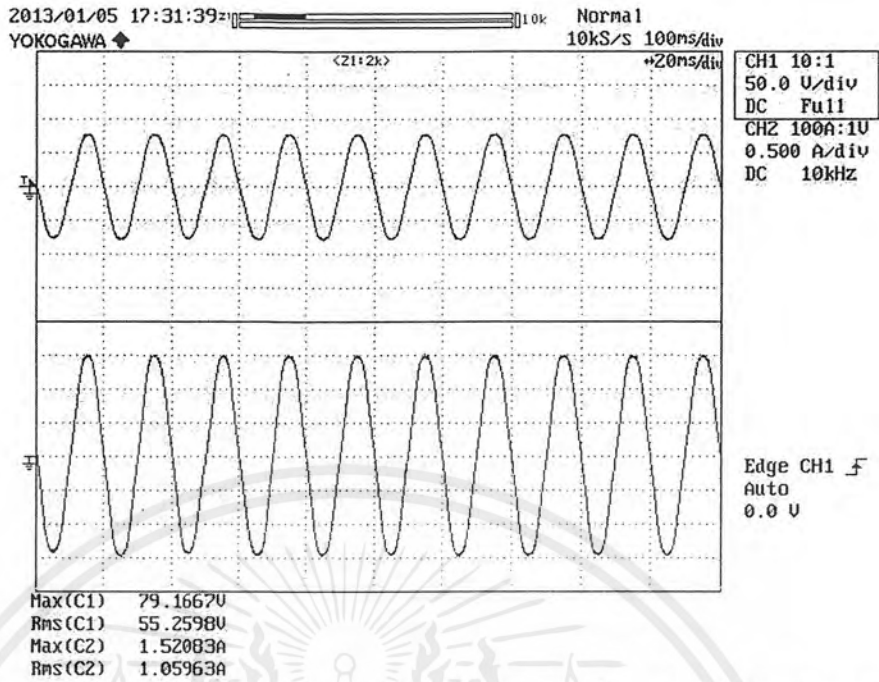


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

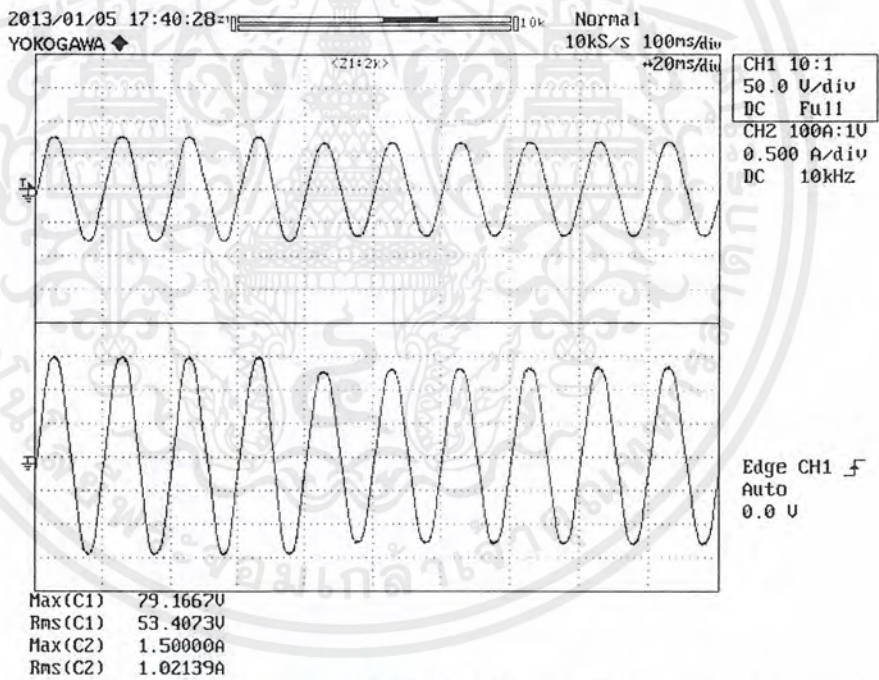


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.7 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซนต์  
ตำแหน่ง 264-308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

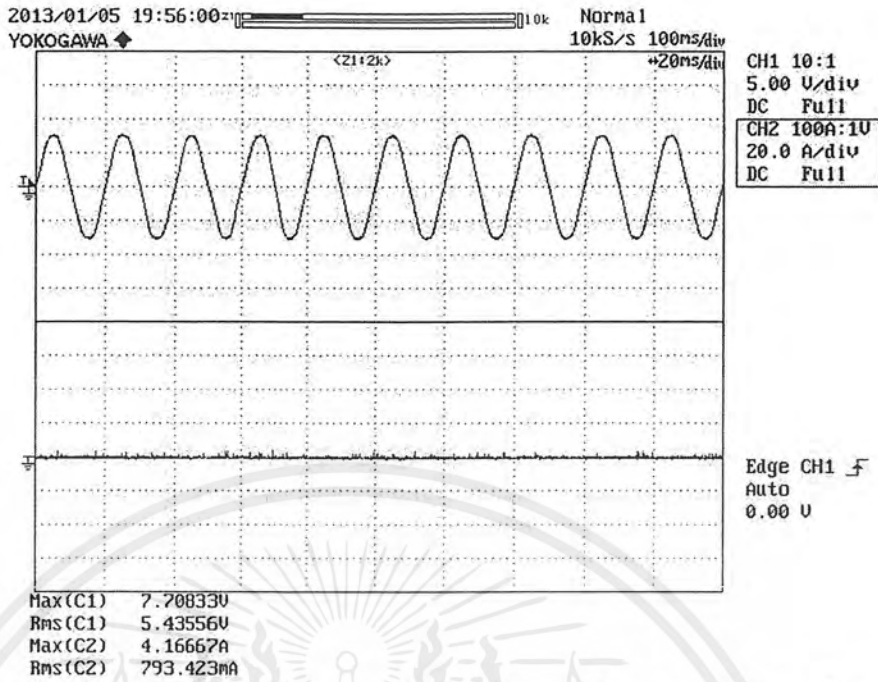


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

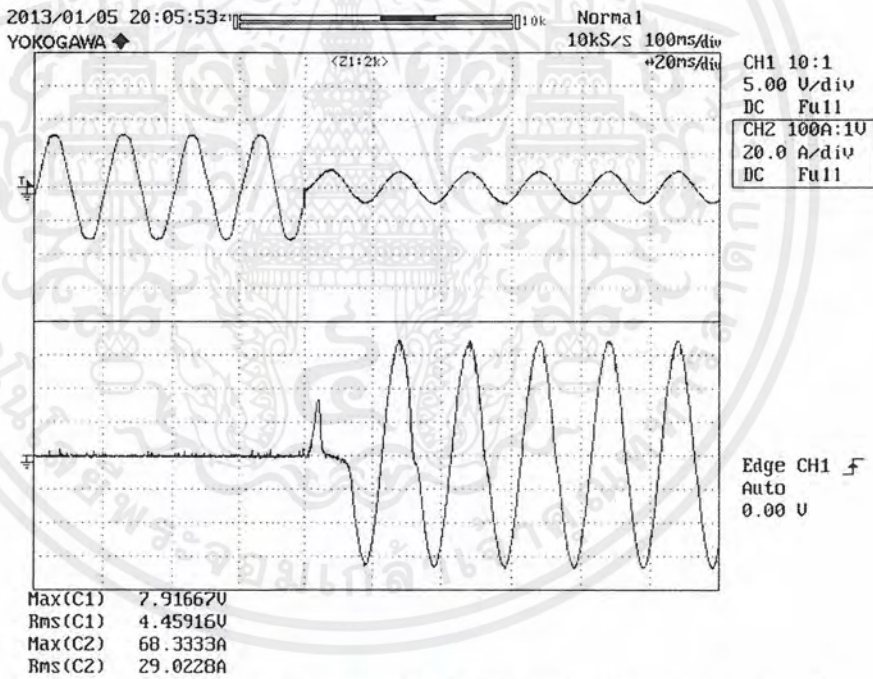


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.7 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 264-308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



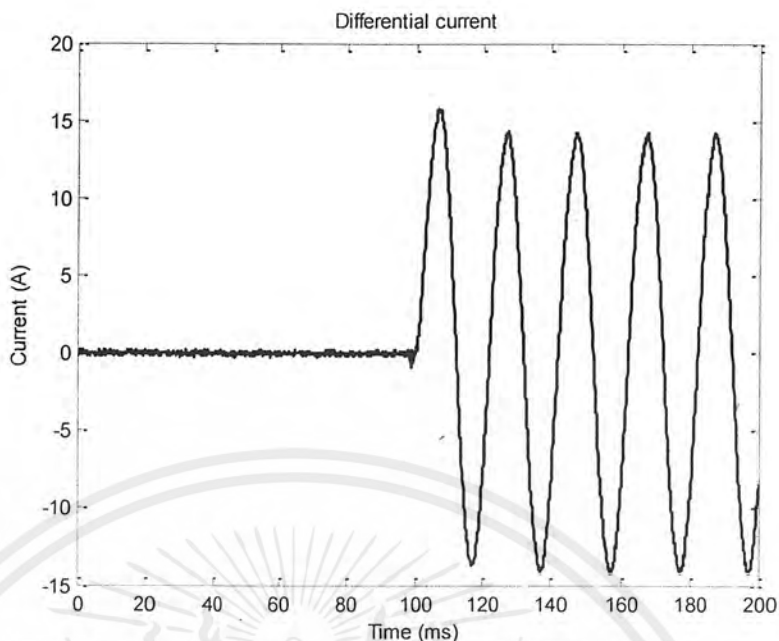
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.7 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 264-308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อนและหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.7 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซนต์ ตำแหน่ง 264-308

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.7

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.7 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.10 แอมแปร์ เป็น 12.82 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 27.75 โวลต์ เป็น 25.88 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.7 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.06 แอมแปร์ เป็น 0.95 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.26 โวลต์ เป็น 49.50 โวลต์

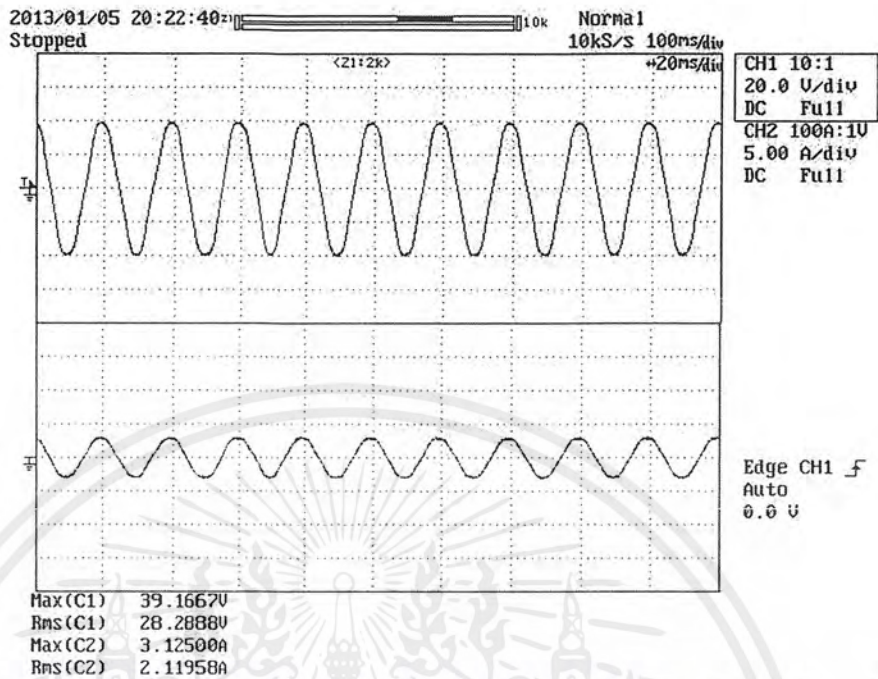
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนของลัดวงจรที่ตำแหน่ง 264-308 ดังรูปที่ 4.7 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 48.32 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 5.44 โวลต์ เป็น 1.77 โวลต์

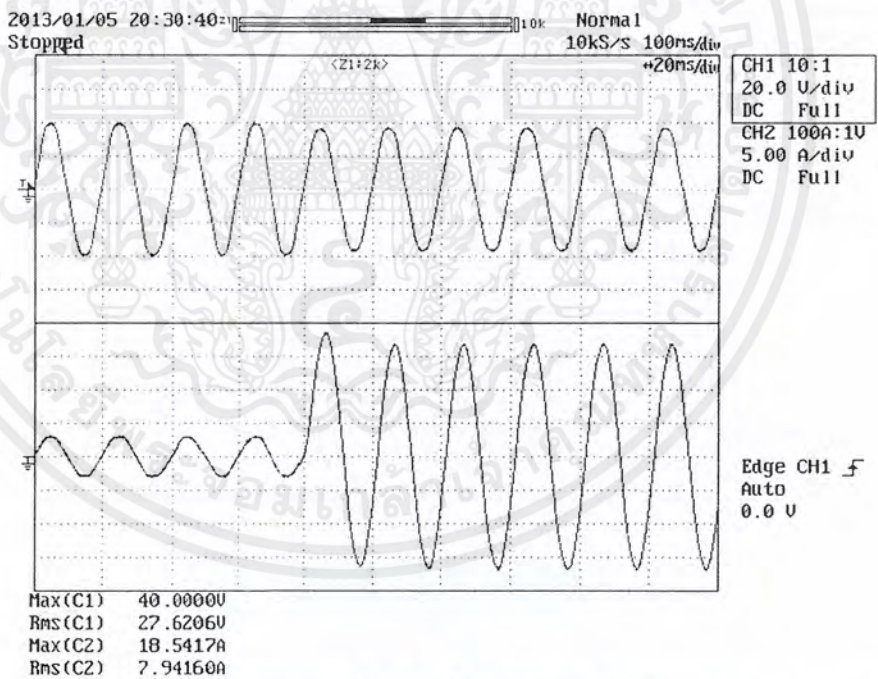
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.7 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.02 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 10.92 แอมแปร์

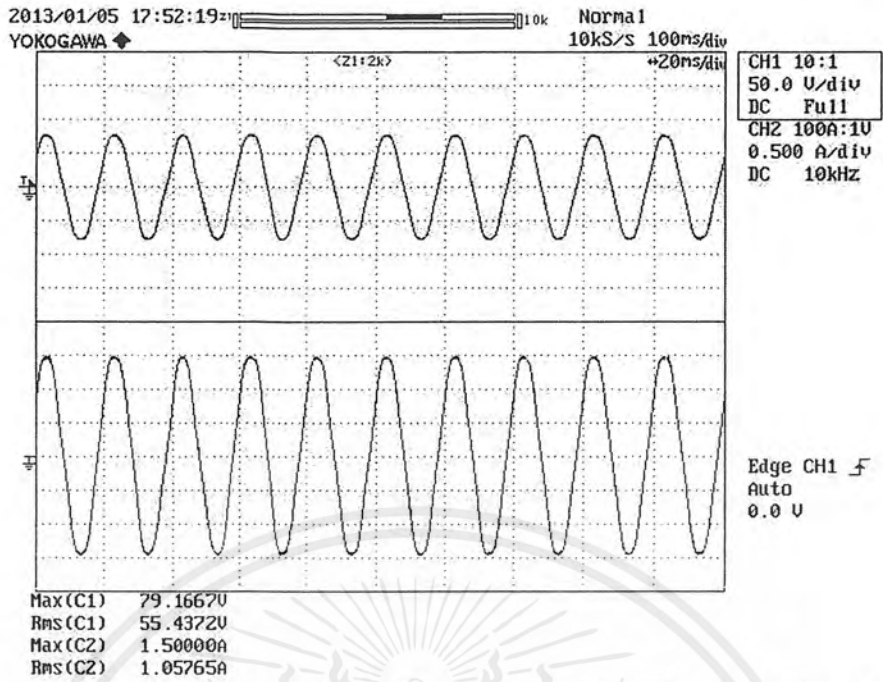
## 4.1.1.7 การลัดวงจรระหว่างแท็บขดลวด ตำแหน่ง 308-352



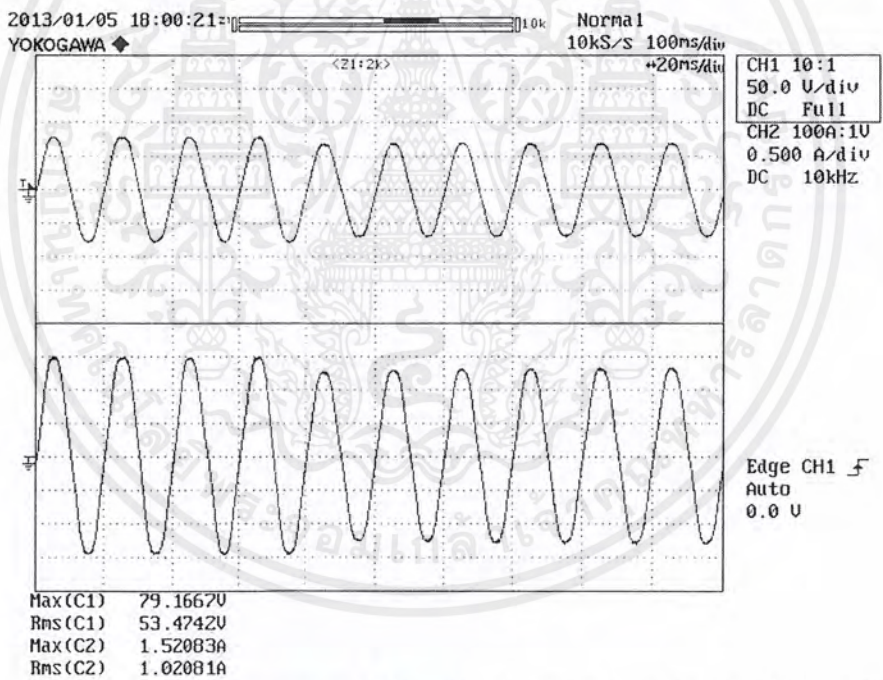
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.8 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซนต์ ตำแหน่ง 308-352

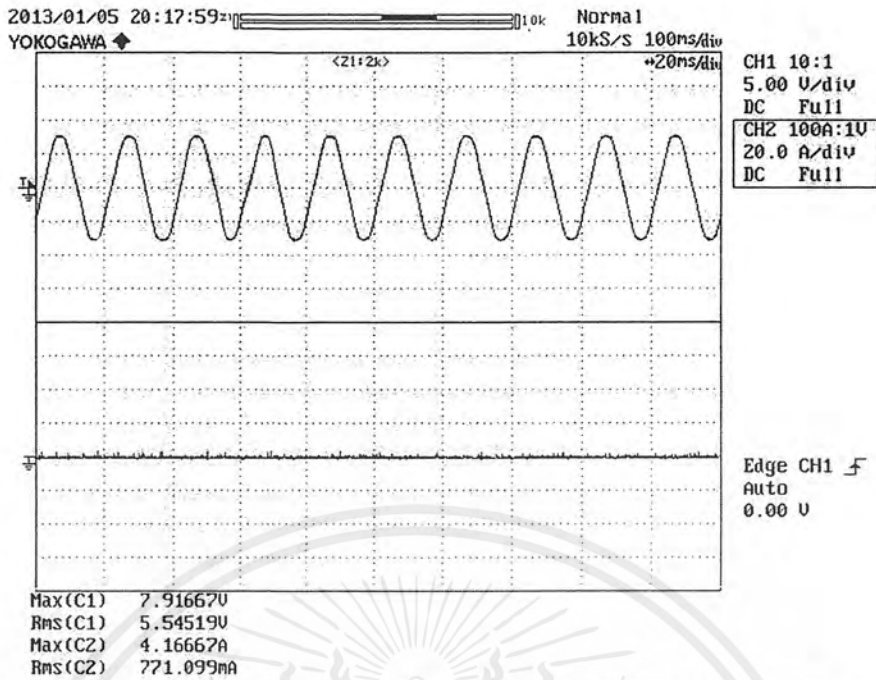


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

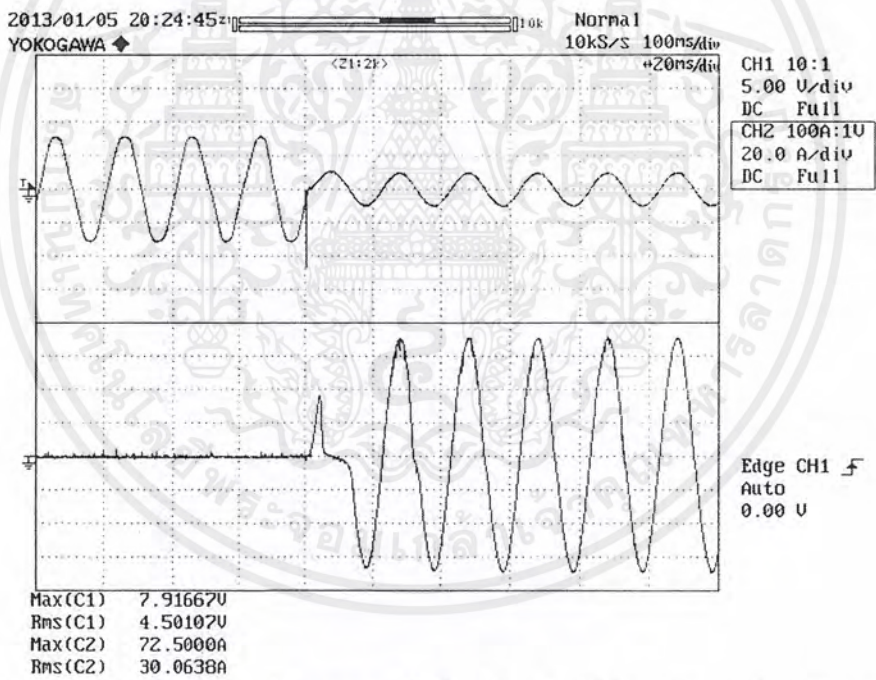


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.8 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 308-352

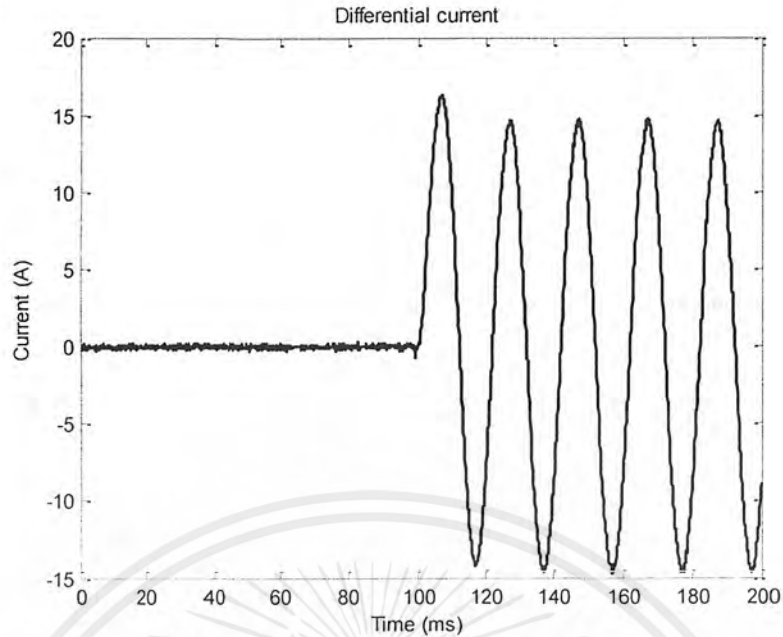


(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.8 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 308-352



(ข) กระแสผลต่างก่อนและหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.8 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 308-352

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.8

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.8 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.12 แอมแปร์ เป็น 11.11 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.29 โวลต์ เป็น 26.02 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.8 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.06 แอมแปร์ เป็น 0.93 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.44 โวลต์ เป็น 49.50 โวลต์

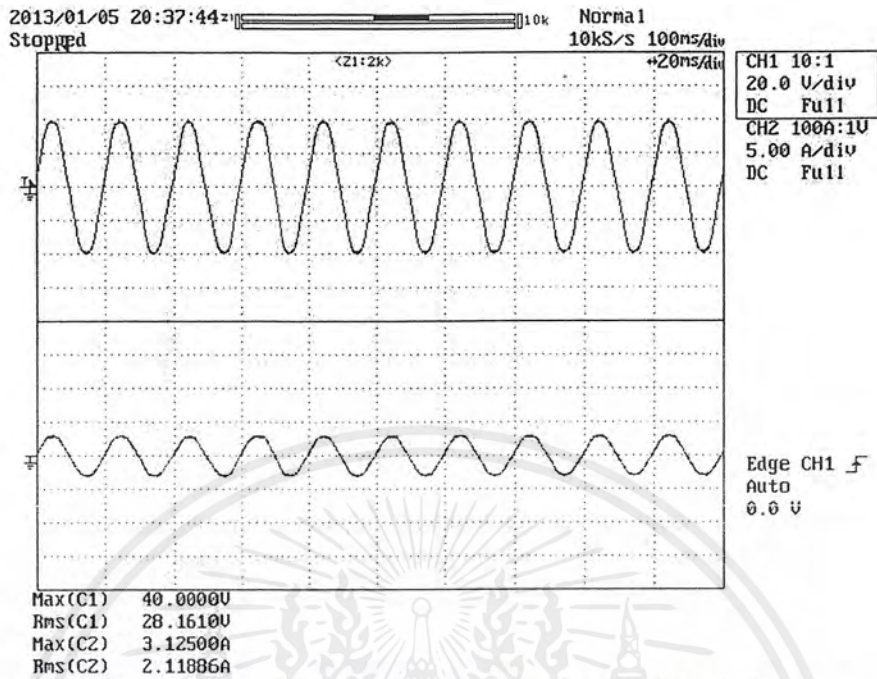
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 308-352 ดังรูปที่ 4.8 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 51.27 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 5.55 โวลต์ เป็น 1.84 โวลต์

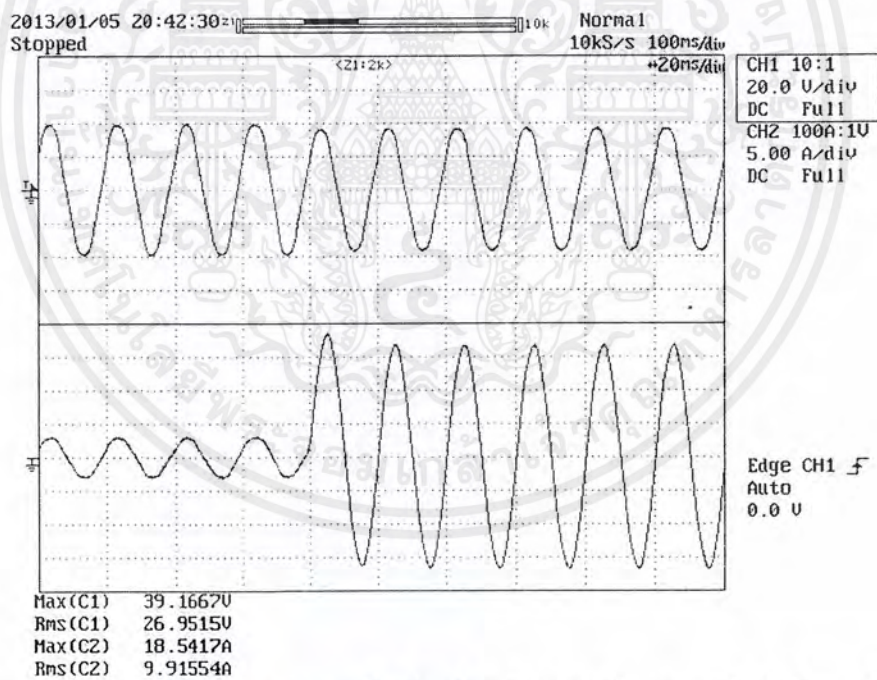
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.8 (ซ)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 9.25 แอมแปร์

## 4.1.1.8 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 352-396

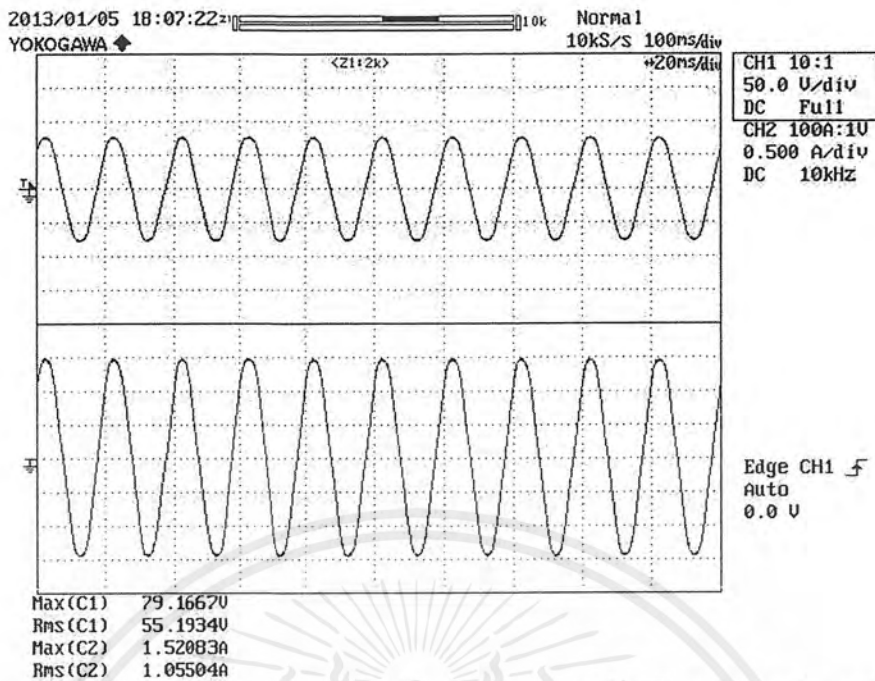


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

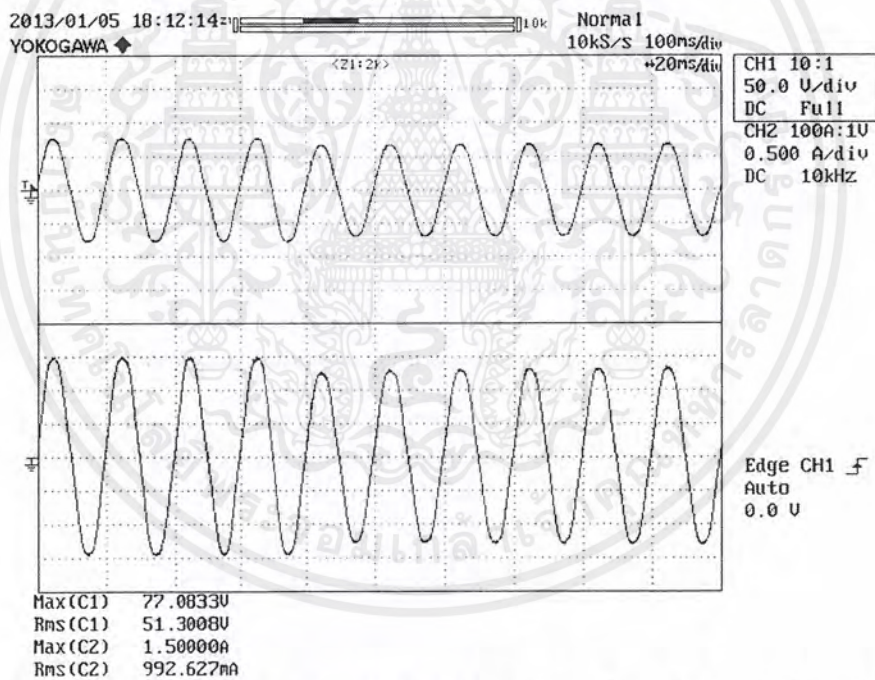


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.9 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 352-396

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



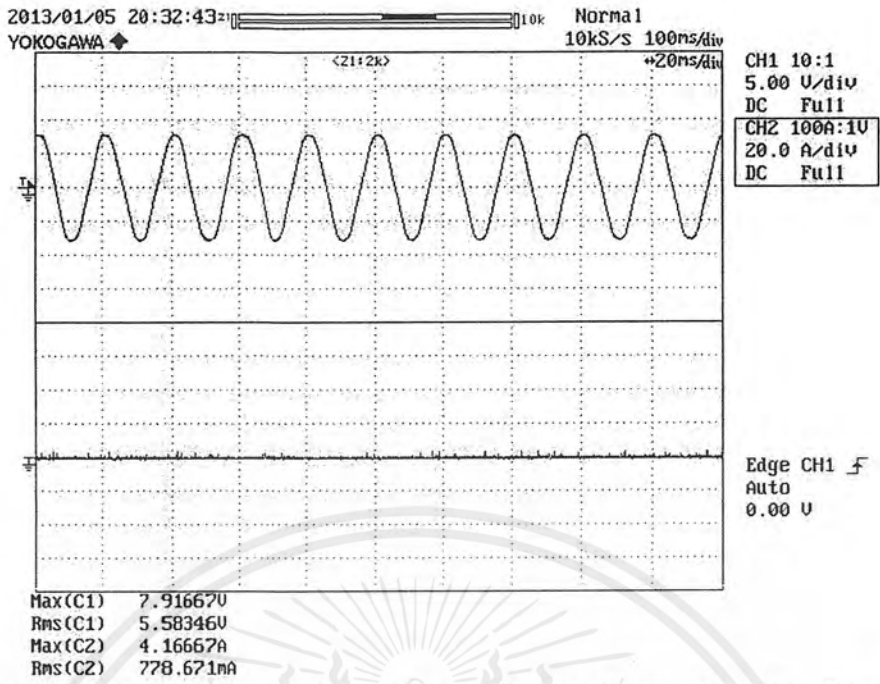
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



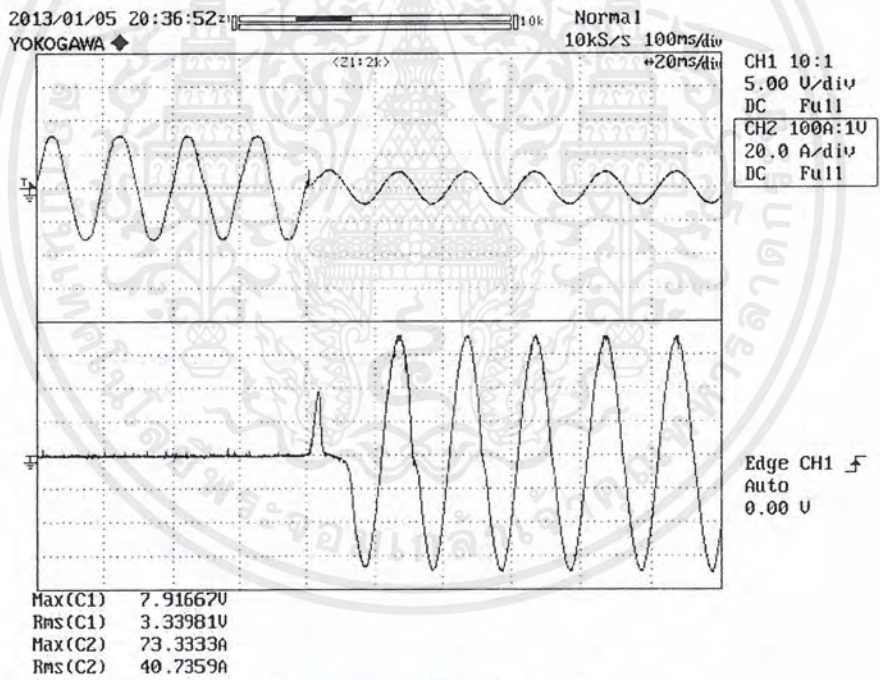
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.9 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 352-396

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



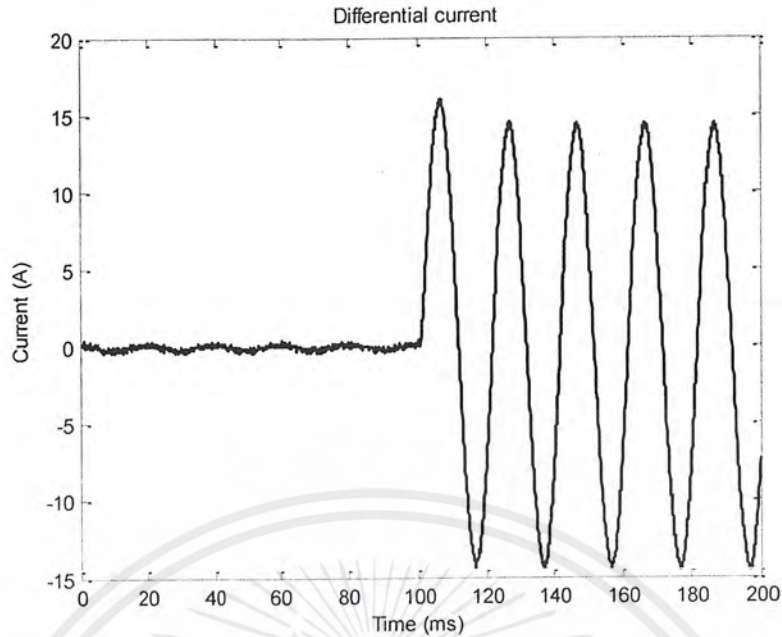
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.9 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 352-396



(ข) กระแสผลต่างก่อนและหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.9 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 352-396

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.9

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.9 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.12 แอมแปร์ เป็น 13.11 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.16 โวลต์ เป็น 26.02 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.9 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.06 แอมแปร์ เป็น 0.93 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.19 โวลต์ เป็น 48.44 โวลต์

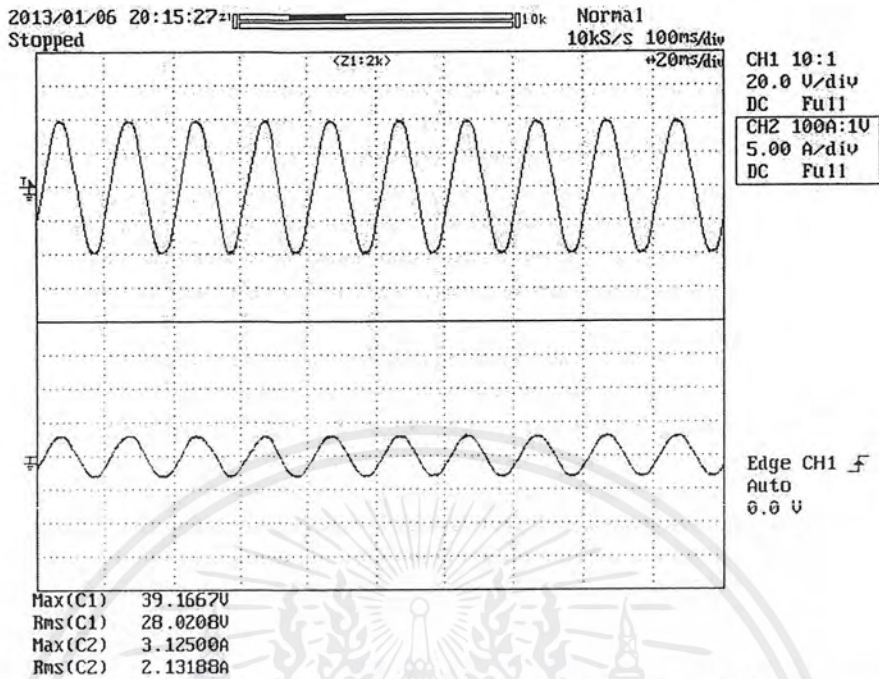
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 352-396 ดังรูปที่ 4.9 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 51.85 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 5.58 โวลต์ เป็น 1.84 โวลต์

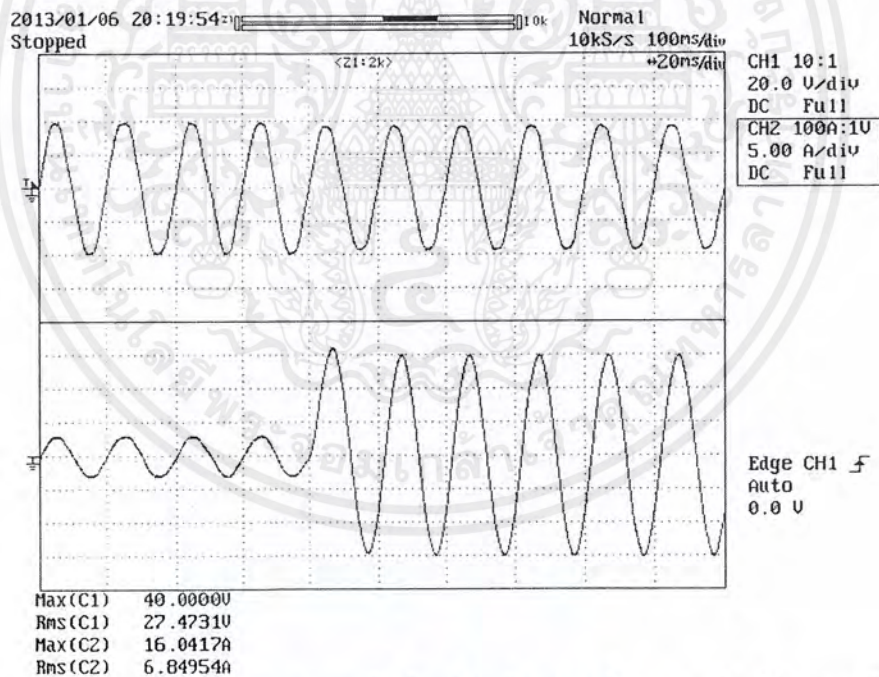
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.9 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 11.25 แอมแปร์

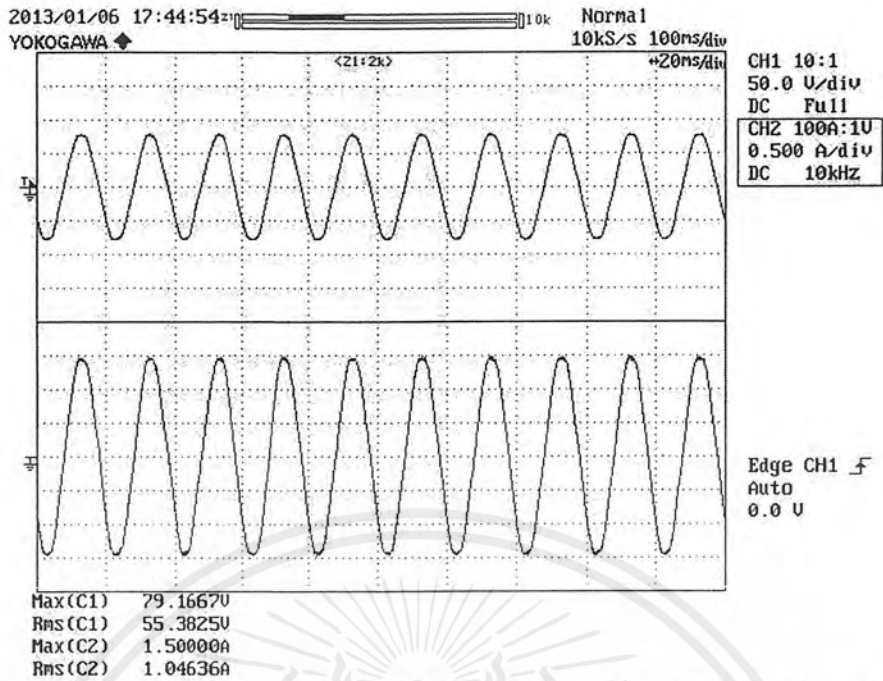
## 4.1.1.9 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 396-440



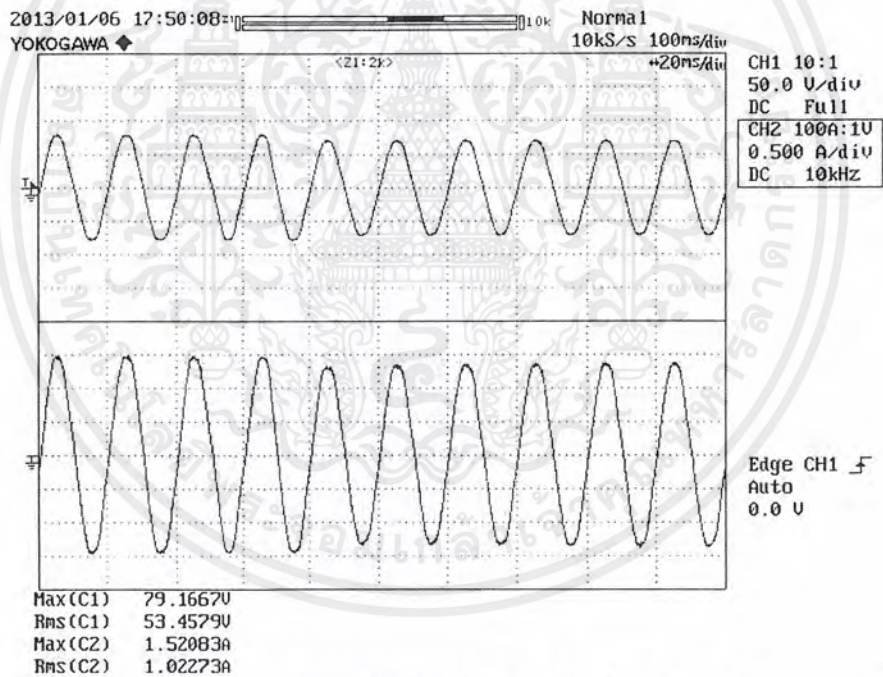
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.10 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 396-440



(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

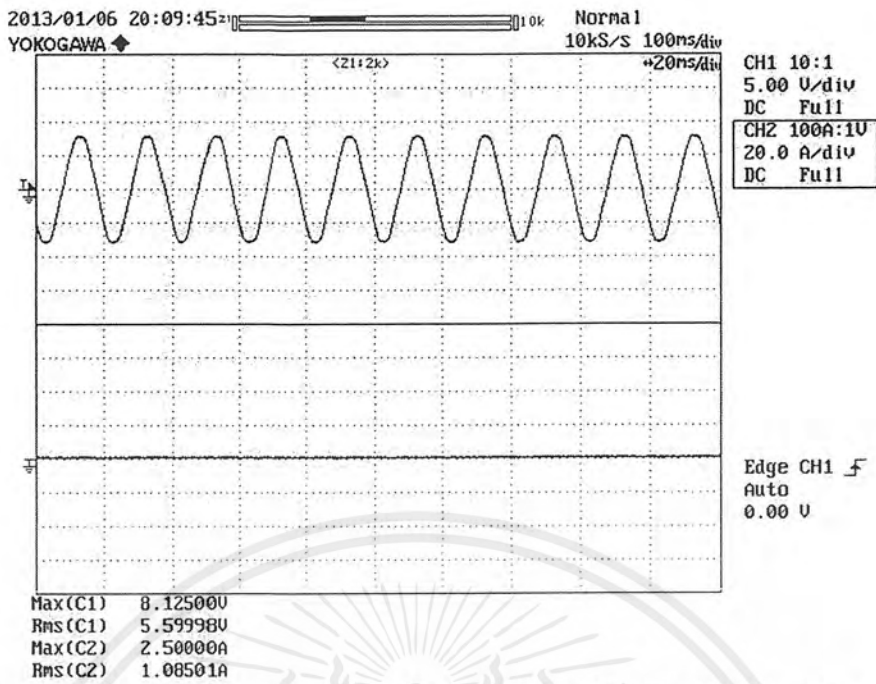


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร

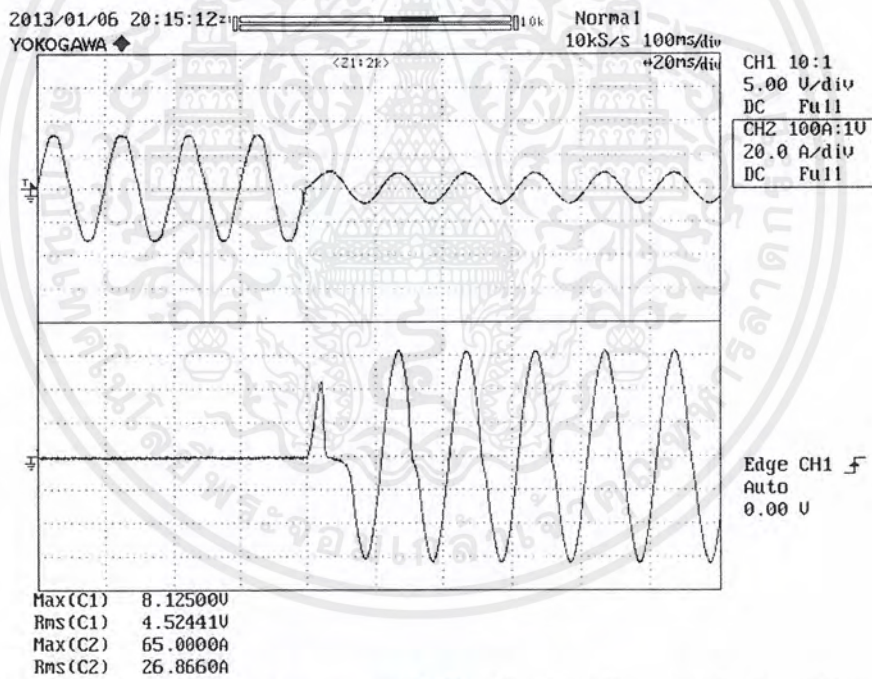
รูปที่ 4.10 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 396-440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

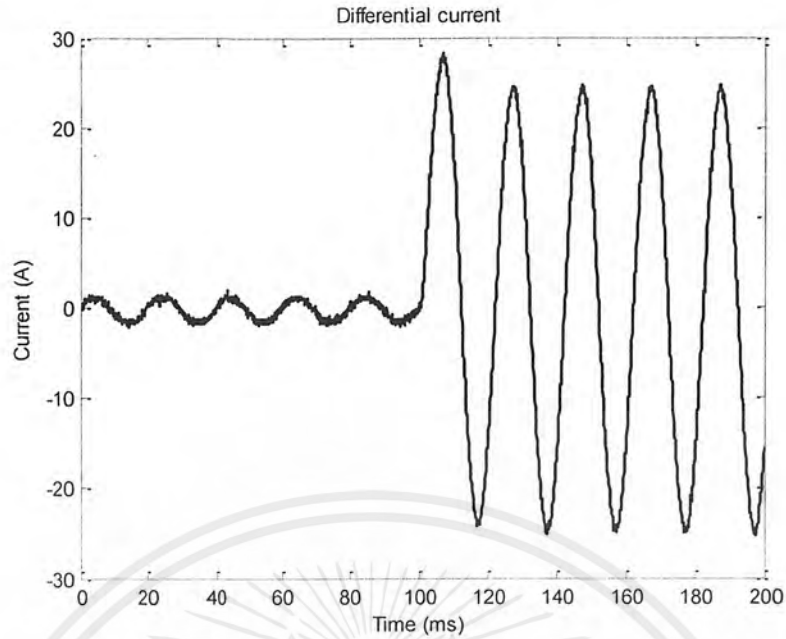


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.10 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 396-440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.10 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 396-440

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.10

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.10 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.13 แอมแปร์ เป็น 11.34 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามามีค่าลดลงจาก 28.02 โวลต์ เป็น 26.02 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.10 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามามีค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.97 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามามีค่าลดลงจาก 55.38 โวลต์ เป็น 49.85 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนของลัดวงจรที่ตำแหน่ง 396-440 ดังรูปที่ 4.10 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 45.96 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามามีค่าลดลงจาก 5.60 โวลต์ เป็น 1.73 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.10 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.03 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 9.40 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V แพบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์

ประเภท ขดลวด	ระดับ แรงดัน หม้อแปลง	โหลด	มุม	ปฐมภูมิ				ทุติยภูมิ				ลัดวงจร				กระแสผลต่าง	
				ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน	หลัง
				แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	ก่อน	หลัง
44-88	0		0	27.82	2.11	26.02	12.67	26.02	1.07	49.50	0.93	5.42	0	1.94	49.50	0.03	10.81
88-132	0		0	28.18	2.13	26.02	12.96	26.02	1.06	48.79	0.93	5.53	0	1.94	50.68	0.01	11.10
132-176	0		0	28.27	2.13	26.02	12.67	26.02	1.06	48.79	0.95	5.55	0	1.87	48.32	0.01	10.77
176-220	0		0	28.21	2.12	26.59	11.94	26.59	1.06	50.56	0.95	5.54	0	1.87	45.96	0	10.04
220-264	0	156 W	0	28.26	2.13	25.88	12.08	25.88	1.06	50.56	0.95	5.54	0	1.77	44.78	0.01	10.18
264-308	0		0	27.75	2.10	25.88	12.82	25.88	1.06	49.50	0.95	5.44	0	1.77	48.32	0.02	10.92
308-352	0		0	28.29	2.12	26.02	11.11	26.02	1.06	49.50	0.93	5.55	0	1.84	51.27	0	9.25
352-396	0		0	28.16	2.12	26.02	13.11	26.02	1.06	48.44	0.93	5.58	0	1.84	51.85	0	11.25
396-440	0		0	28.02	2.13	26.02	11.34	26.02	1.05	49.85	0.97	5.60	0	1.73	45.96	0.03	9.40

จากการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V แพบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองก่อน และหลังการลัดวงจร พบว่า

ทางด้านปฐมภูมิ แรงดันไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร กระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งแพบขดลวด โดยที่แพบขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

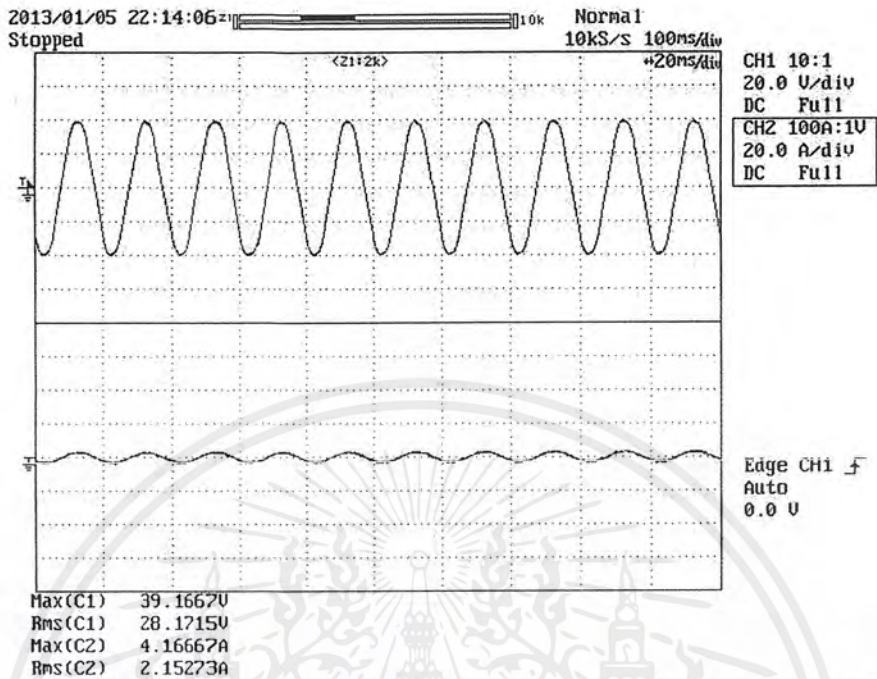
ทางด้านทุติยภูมิ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งแพบขดลวด โดยที่แพบขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

ทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจร แนวโน้มพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า คล้ายกับทางด้านปฐมภูมิ แต่ค่าแอมพลิจูดของแรงดันต่ำกว่า ค่าแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรสูงกว่า

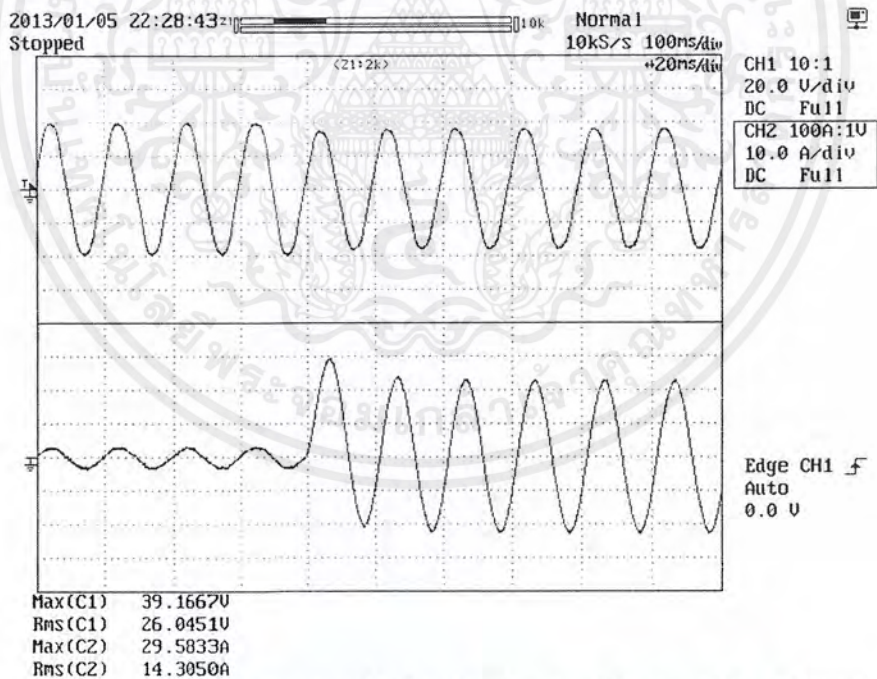
เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งแพบขดลวด โดยที่แพบขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า กระแสผลต่างมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

## 4.1.2 กรณีแทปขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์

### 4.1.2.1 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 44-132

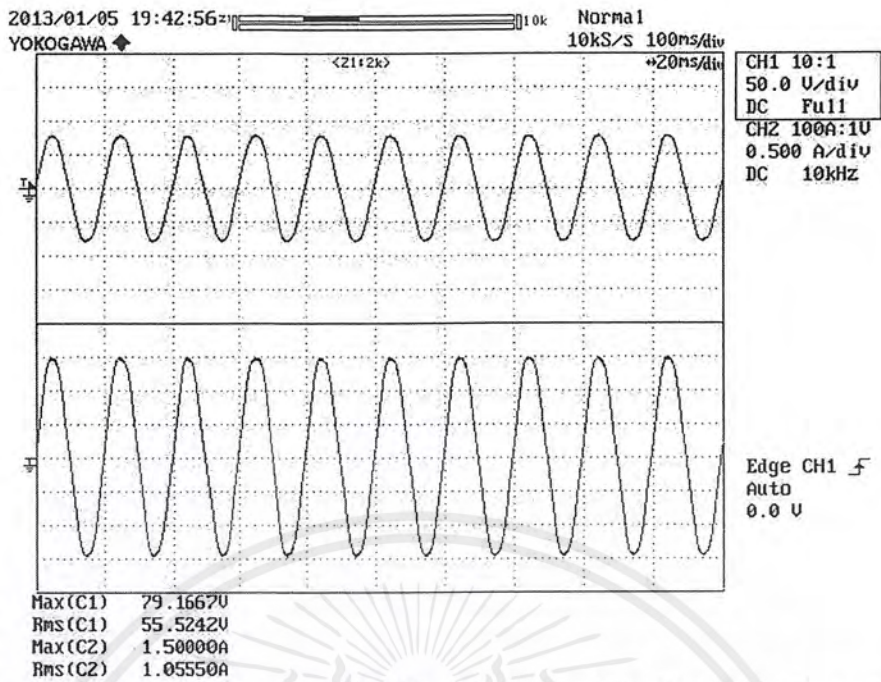


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

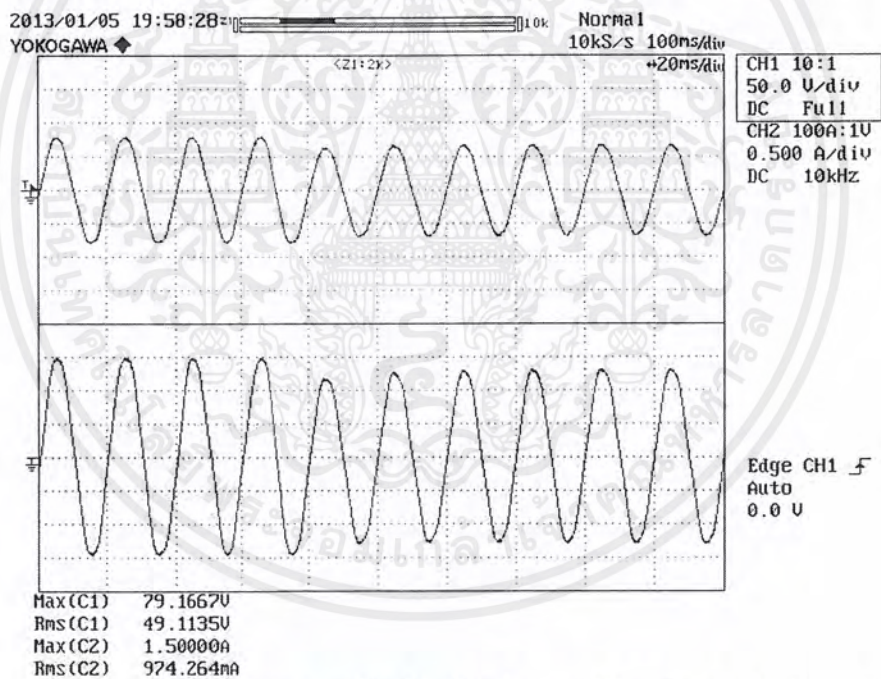


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.11 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

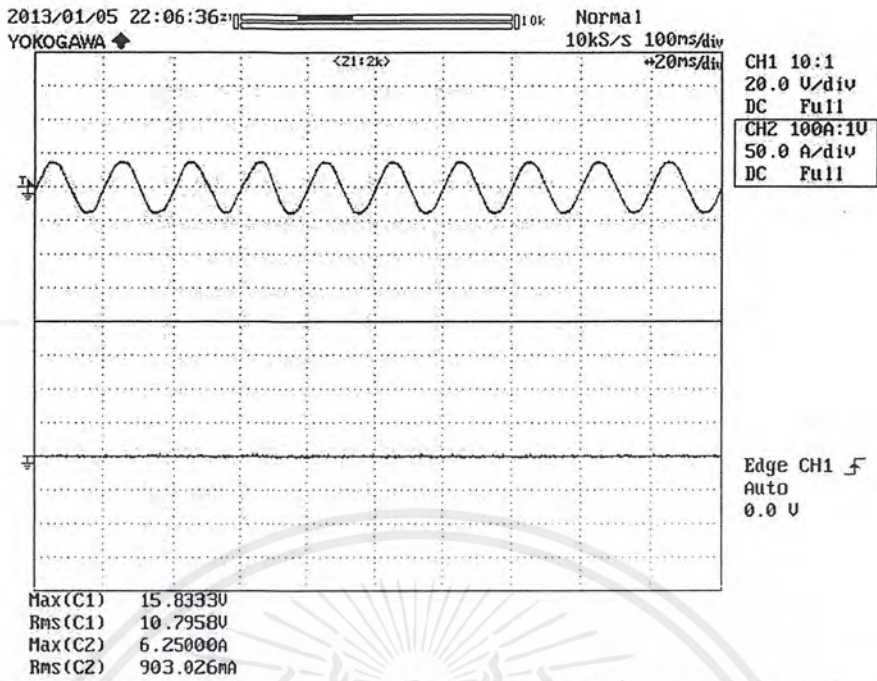


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

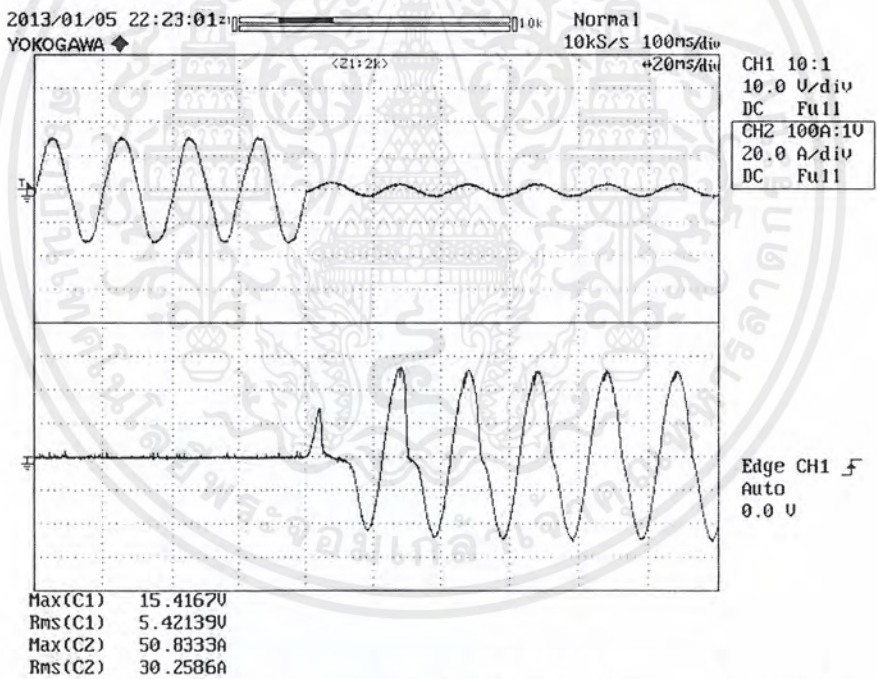


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.11 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



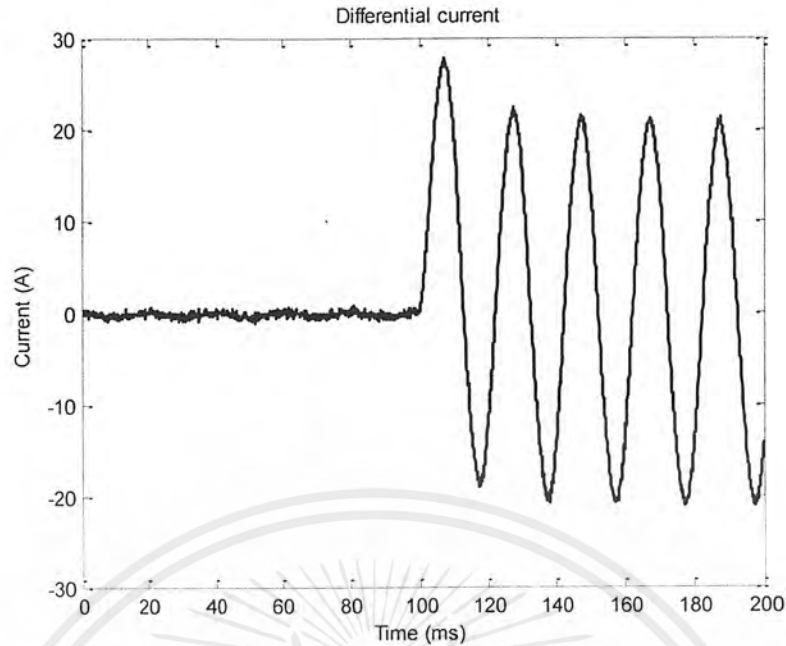
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.11 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 44-132



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.11 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-132

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.11

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.15 แอมแปร์ เป็น 20.92 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 28.17 โวลต์ เป็น 25.46 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.11 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 1.06 แอมแปร์ เป็น 0.93 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 55.52 โวลต์ เป็น 48.44 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 44-132 ดังรูปที่ 4.11 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

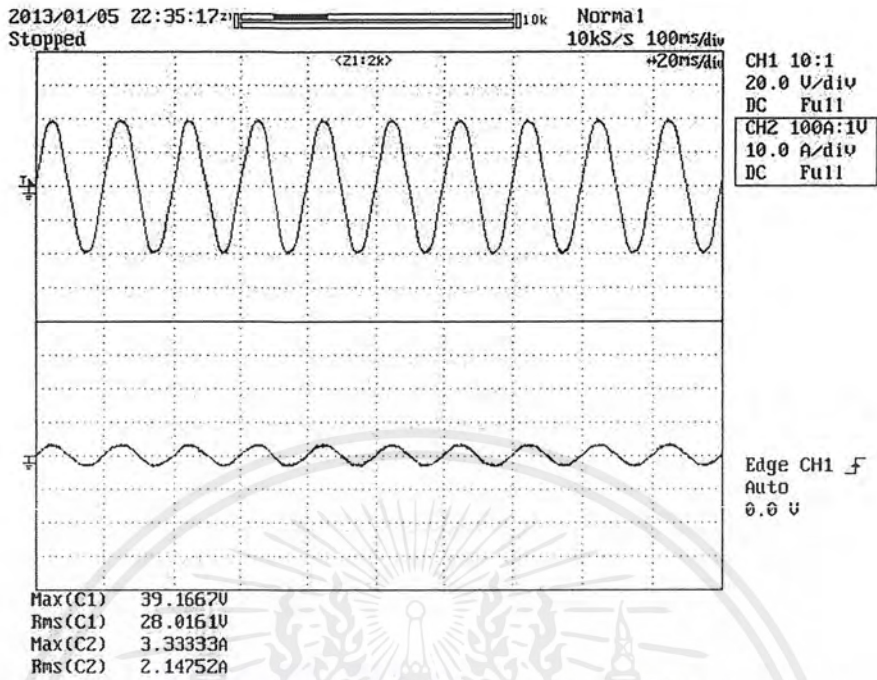
- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 35.94 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 10.80 โวลต์ เป็น 1.34 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.11 (ซ)

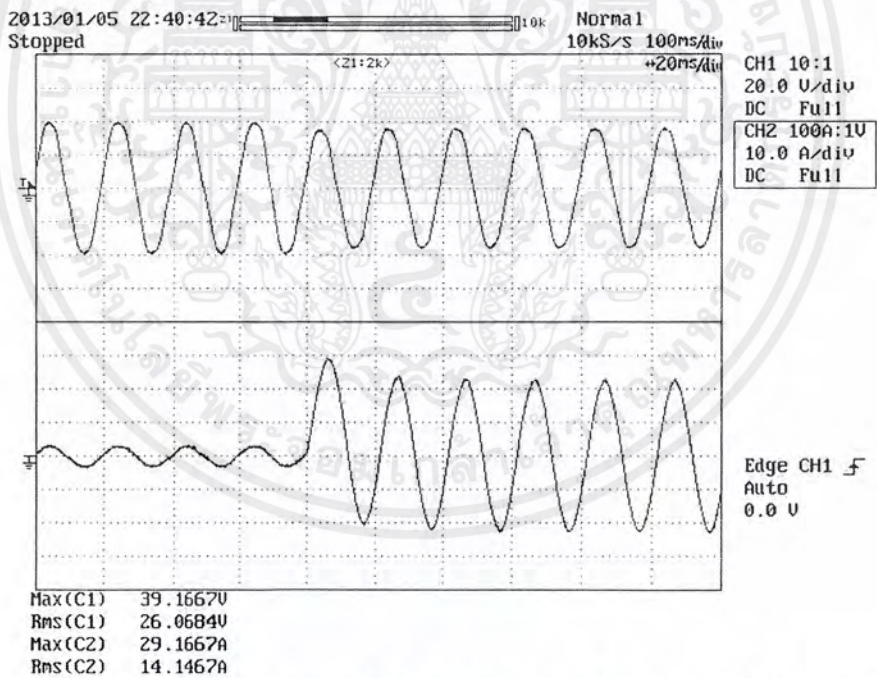
- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.03 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 19.06 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

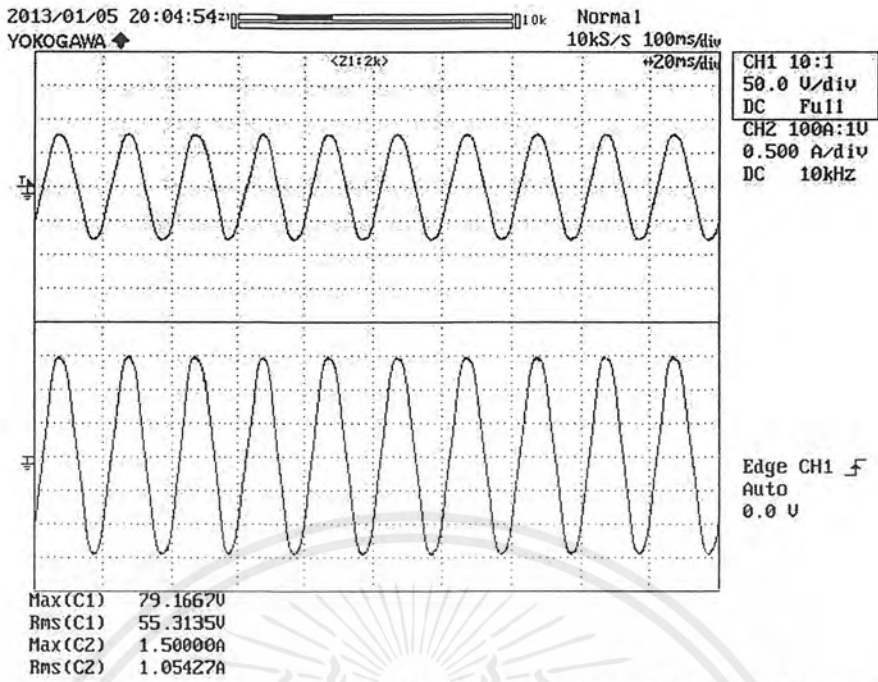
4.1.2.2 การลัดวงจรระหว่างแท็บขดลวด ตำแหน่ง 88-176



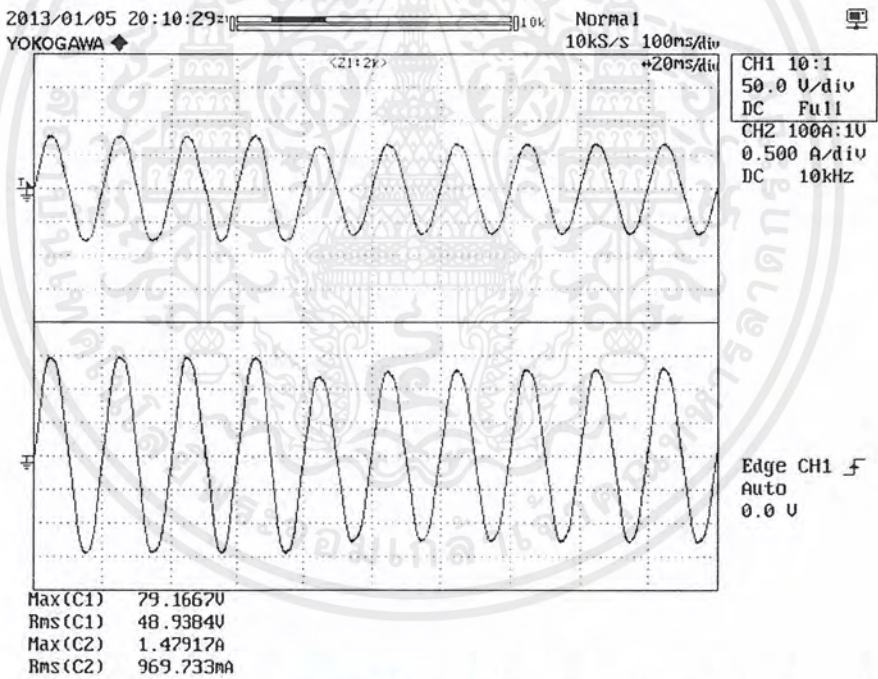
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.12 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 88-176



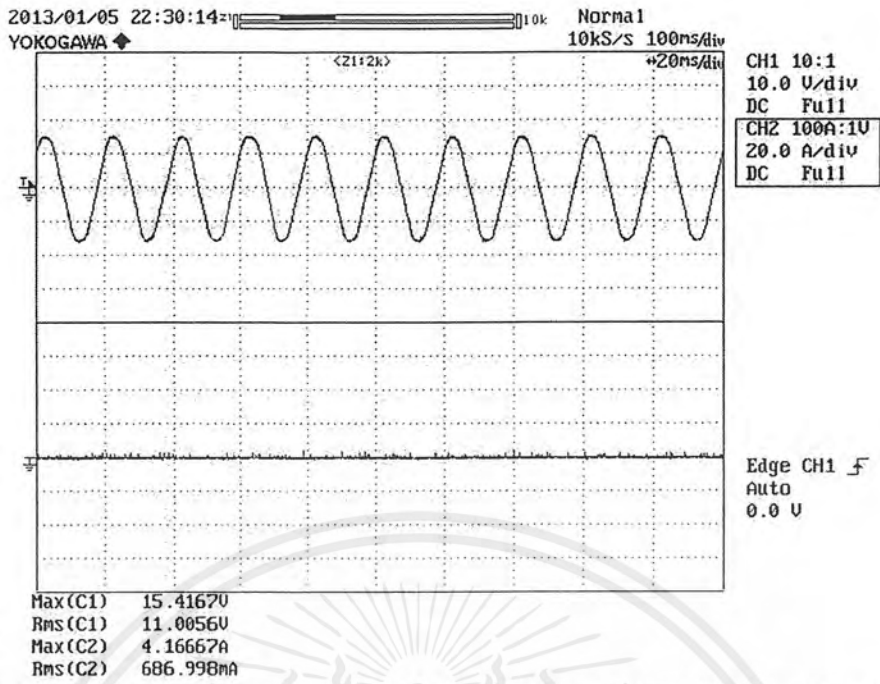
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



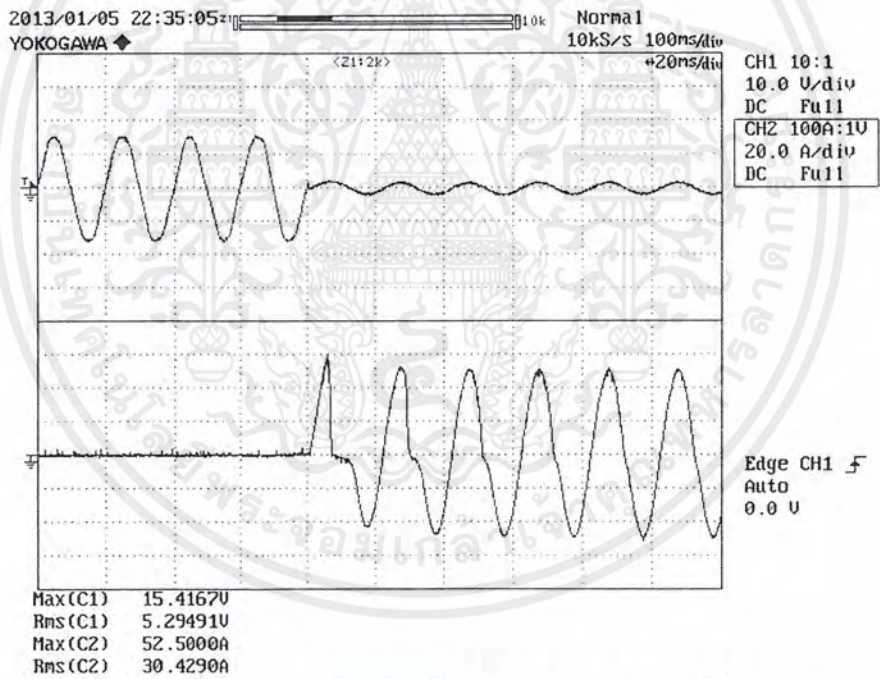
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.12 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 88-176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

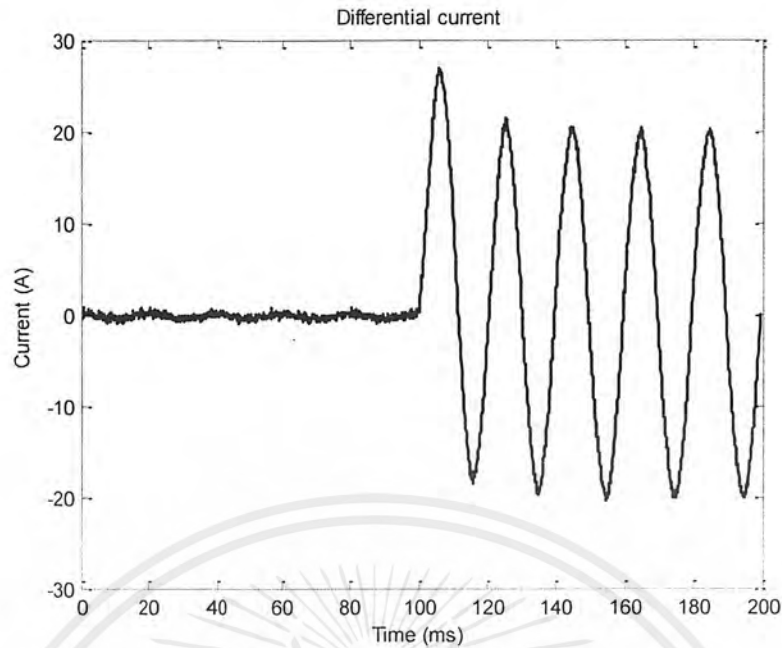


(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.12 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 88-176



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.12 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เปอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 88-176

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.12

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.15 แอมแปร์ เป็น 20.63 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.02 โวลต์ เป็น 25.60 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.12 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.92 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.31 โวลต์ เป็น 47.38 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 88-176 ดังรูปที่ 4.12 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

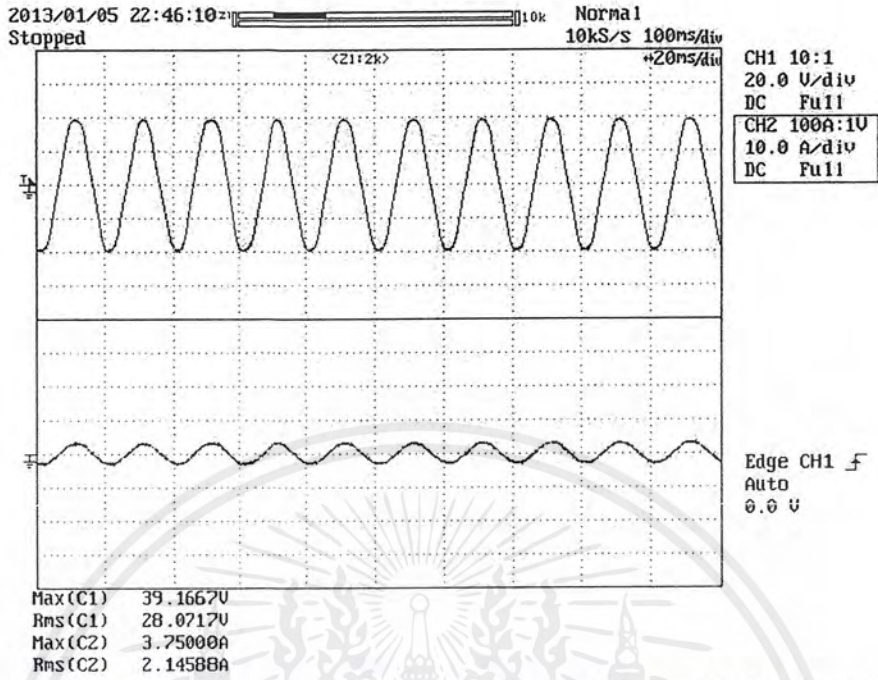
- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 37.12 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 11.00 โวลต์ เป็น 1.34 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.12 (ข)

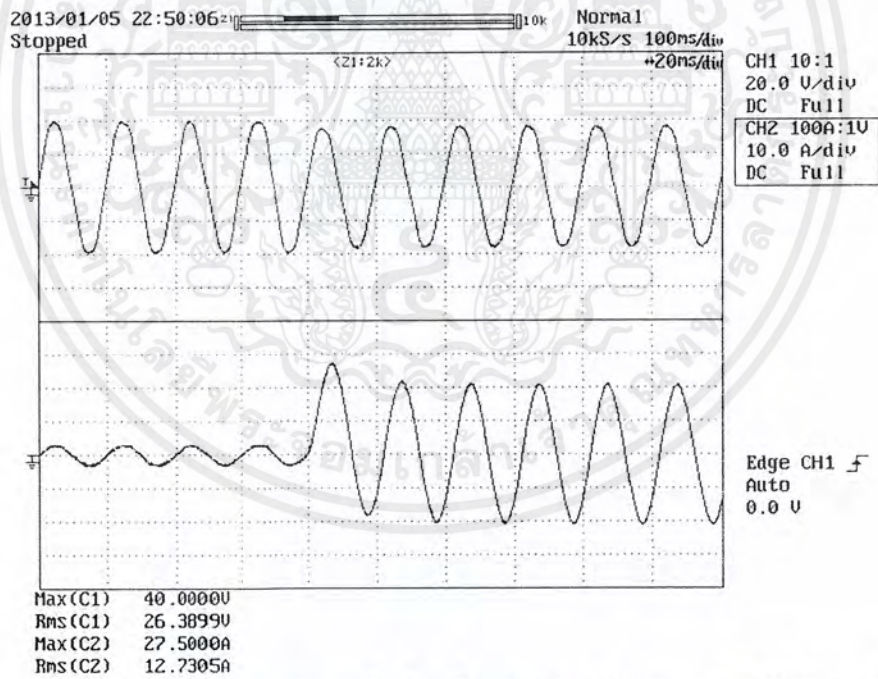
- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.05 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 18.79 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.3 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 132-220

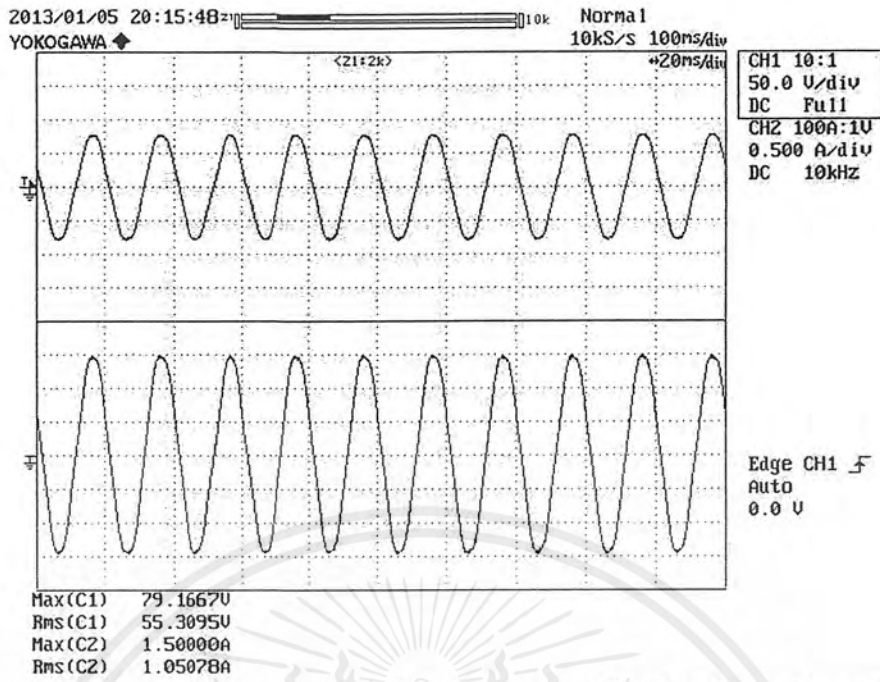


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

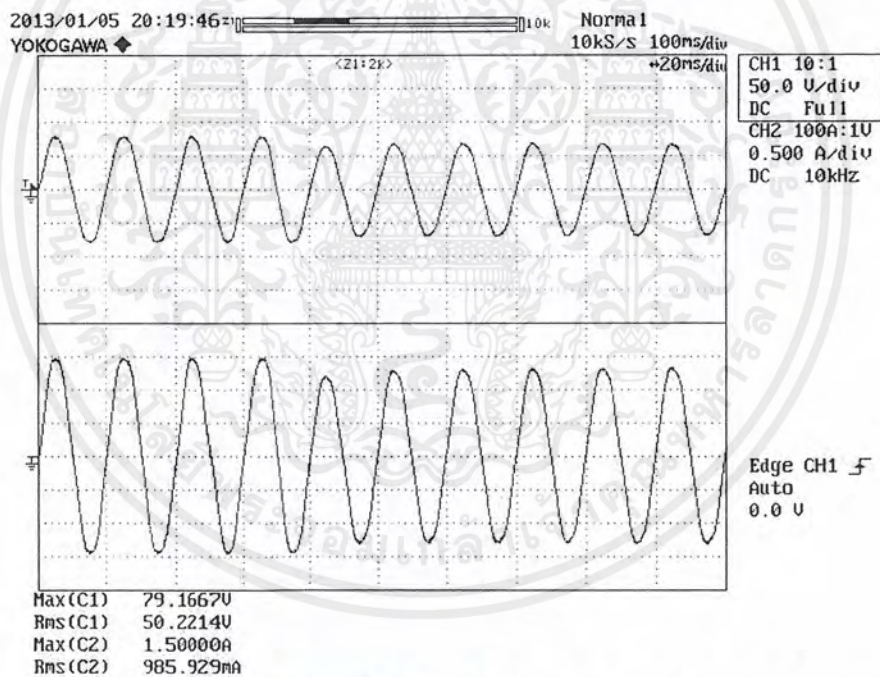


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.13 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 132-220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

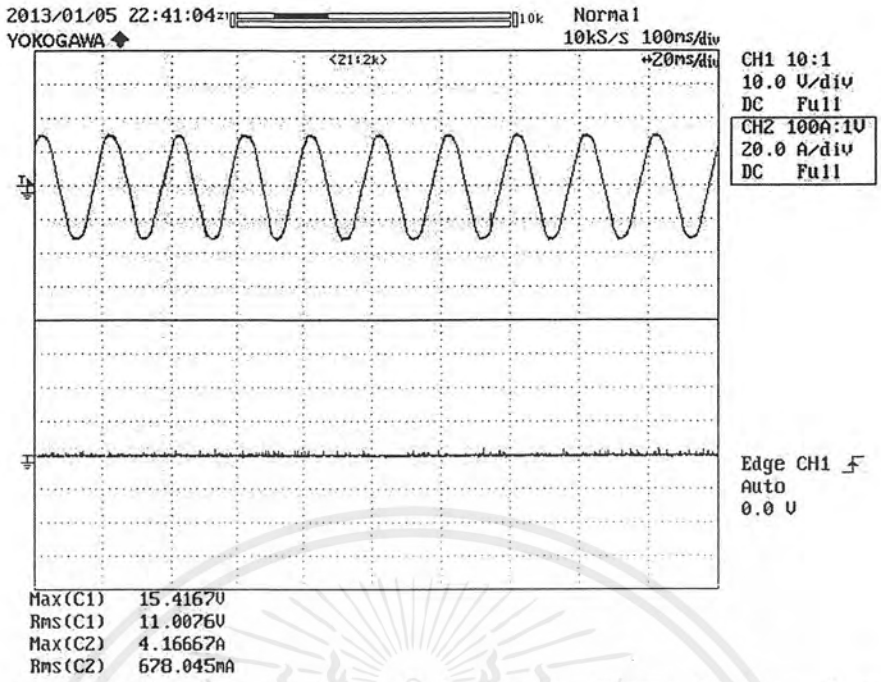


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

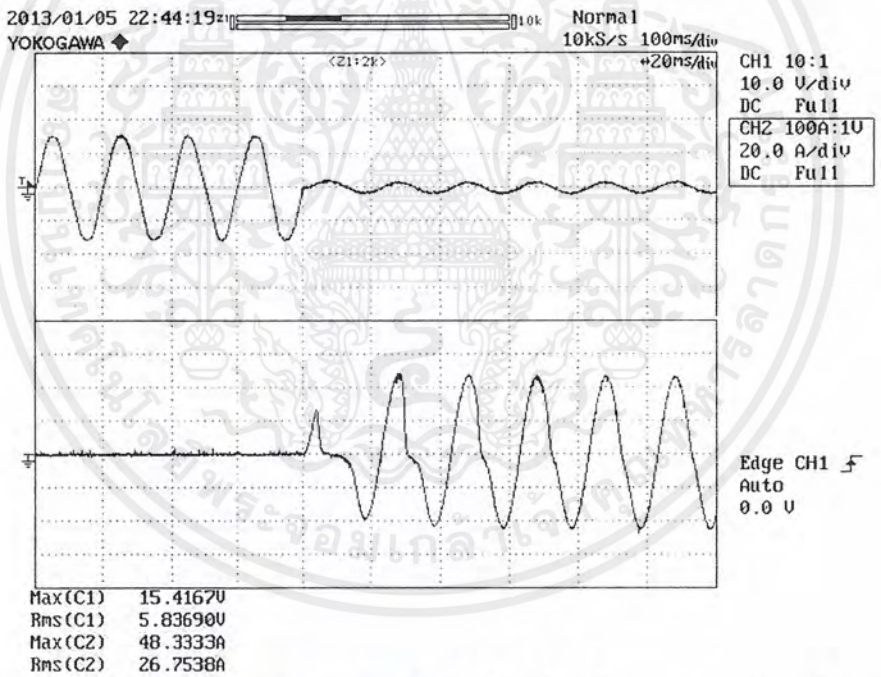


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.13 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 132-220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

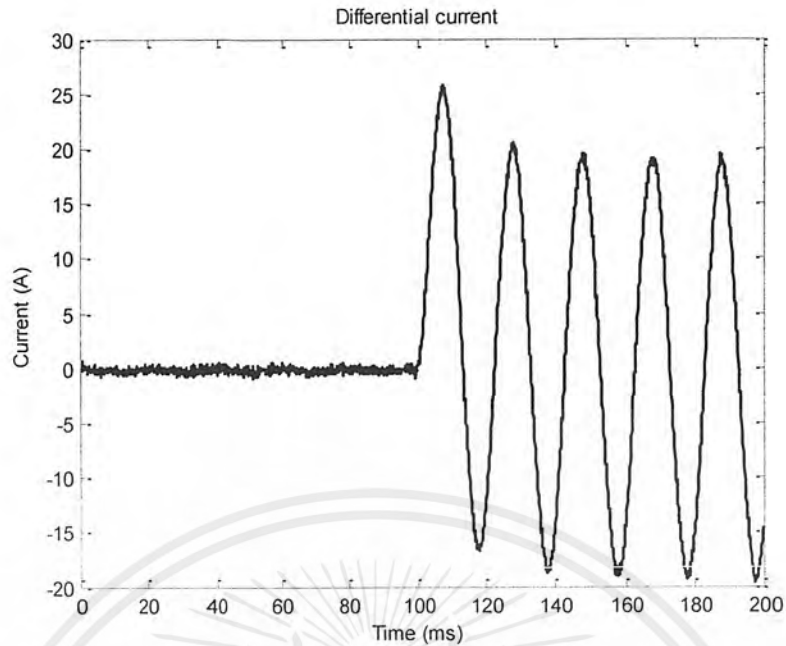


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.13 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 132-220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.13 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 132-220

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.13

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.15 แอมแปร์ เป็น 19.45 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.07 โวลต์ เป็น 25.46 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.13 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.95 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.31 โวลต์ เป็น 48.08 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 132-220 ดังรูปที่ 4.13 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

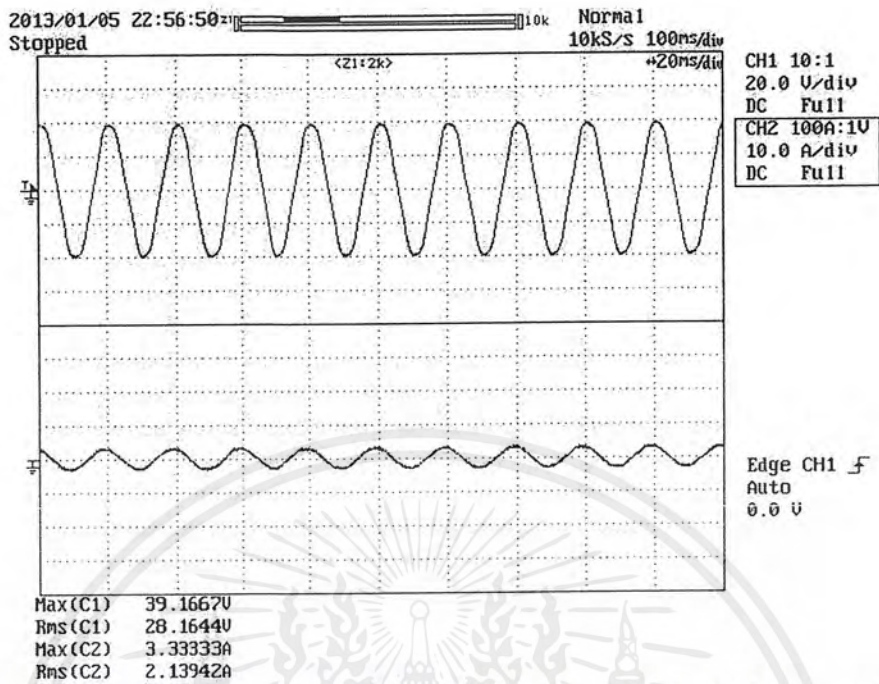
- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 34.17 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 11.01 โวลต์ เป็น 1.41 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.13 (ซ)

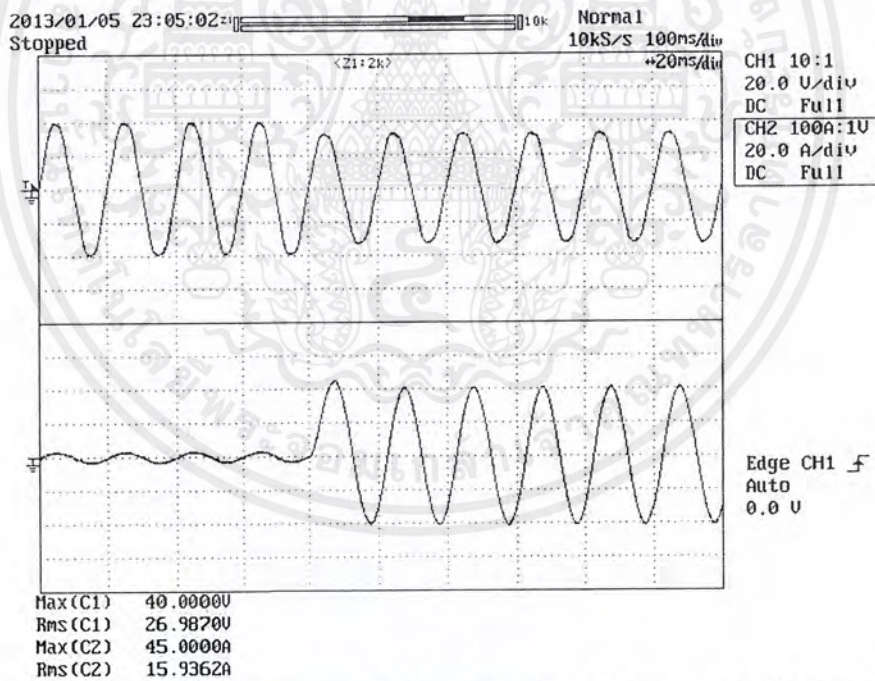
- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.05 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 17.55 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

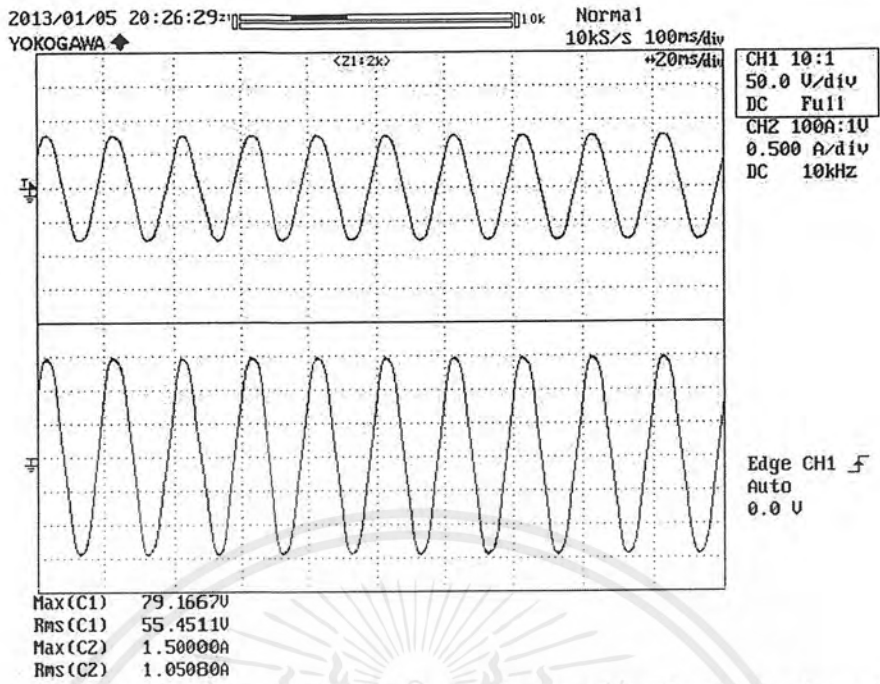
#### 4.1.2.4 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 176-264



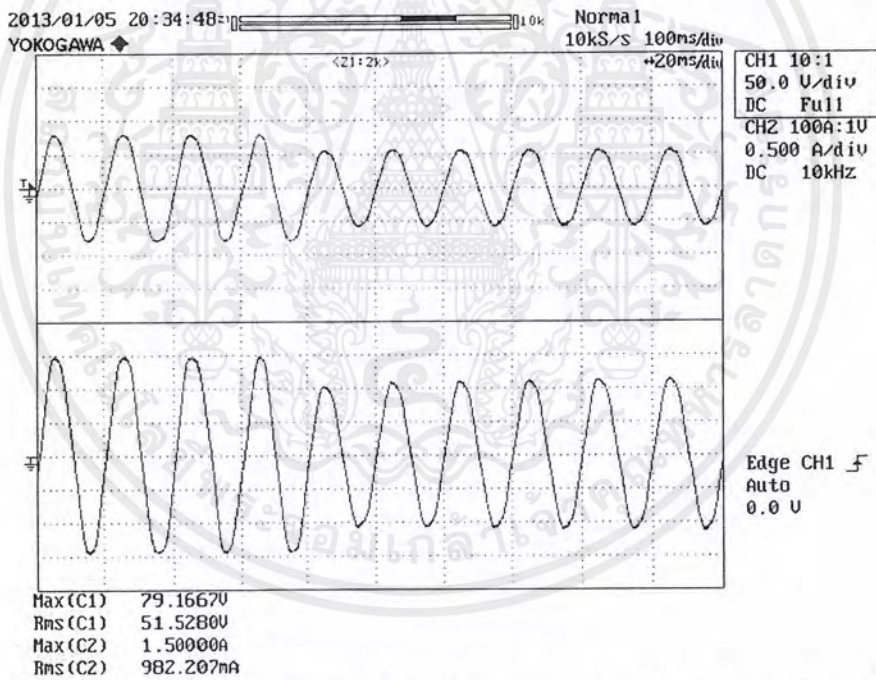
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.14 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 176-264

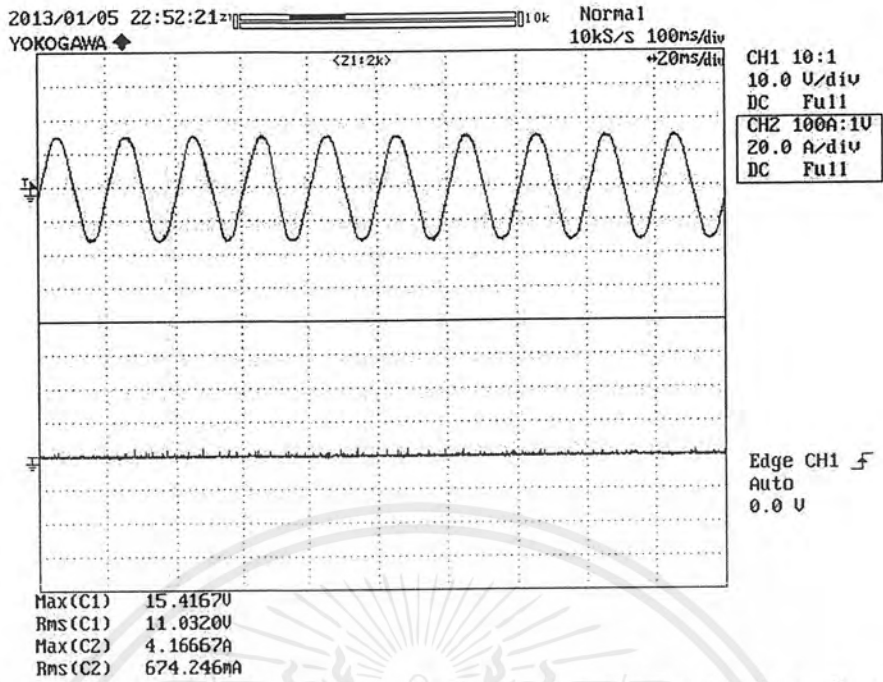


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

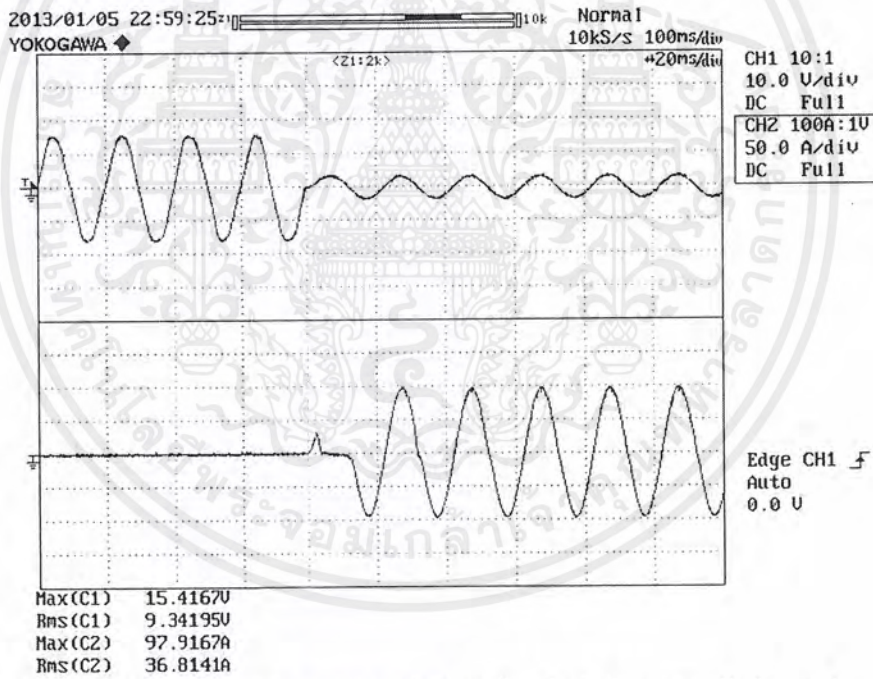


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.14 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 176-264

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

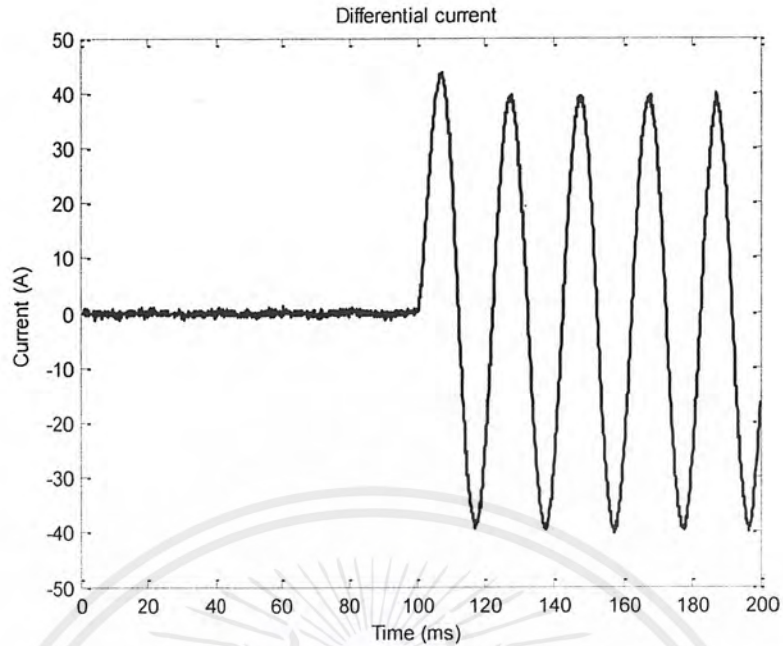


(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.14 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 176-264



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.14 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 176-264

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.14

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.14 แอมแปร์ เป็น 31.82 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.16 โวลต์ เป็น 23.33 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.14 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.81 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.45 โวลต์ เป็น 40.31 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 176-264 ดังรูปที่ 4.14 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

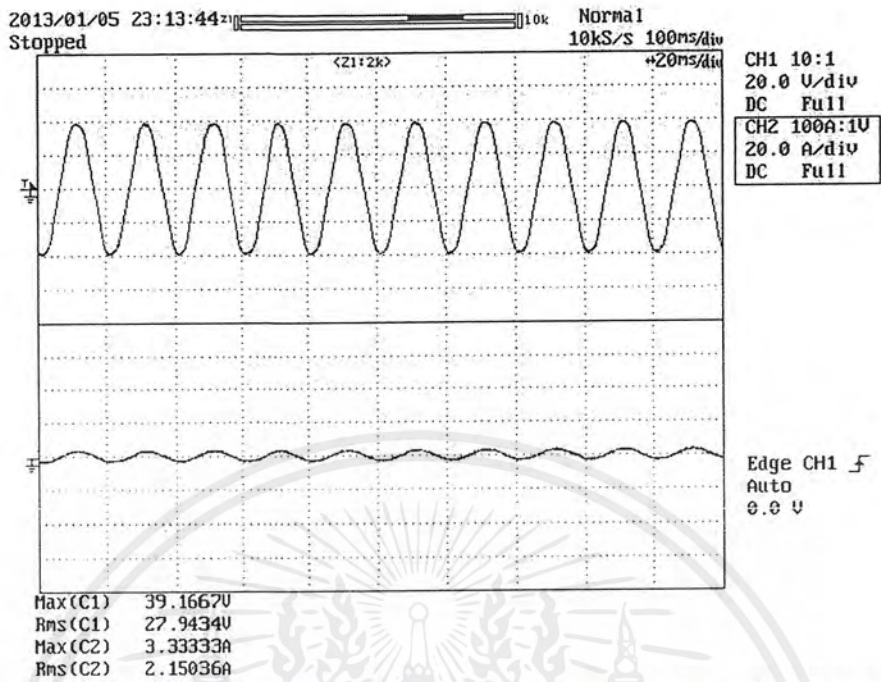
- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 69.24 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 11.03 โวลต์ เป็น 2.26 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.14 (ข)

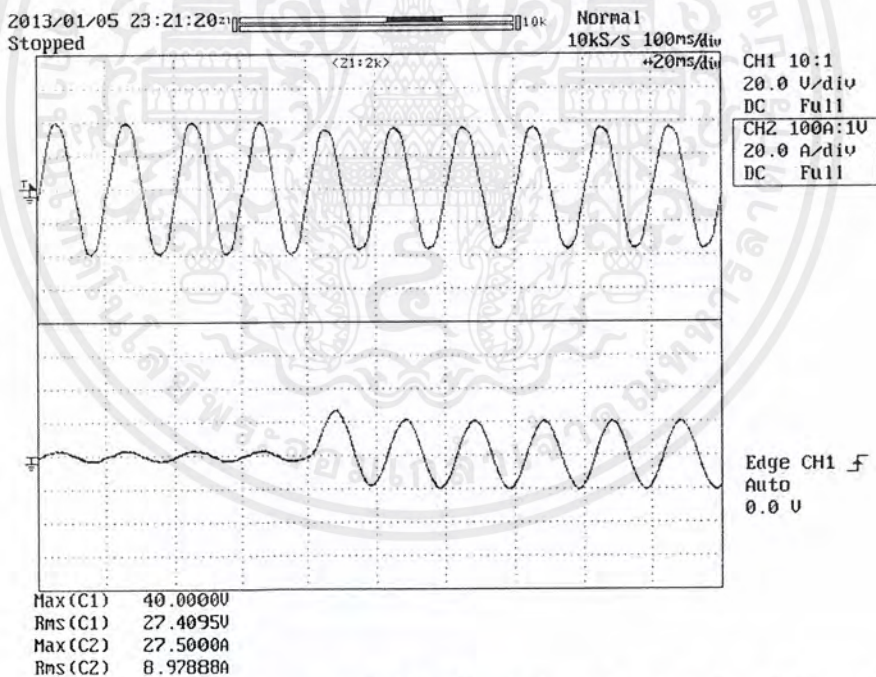
- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.04 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 30.20 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1.2.5 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 220-308

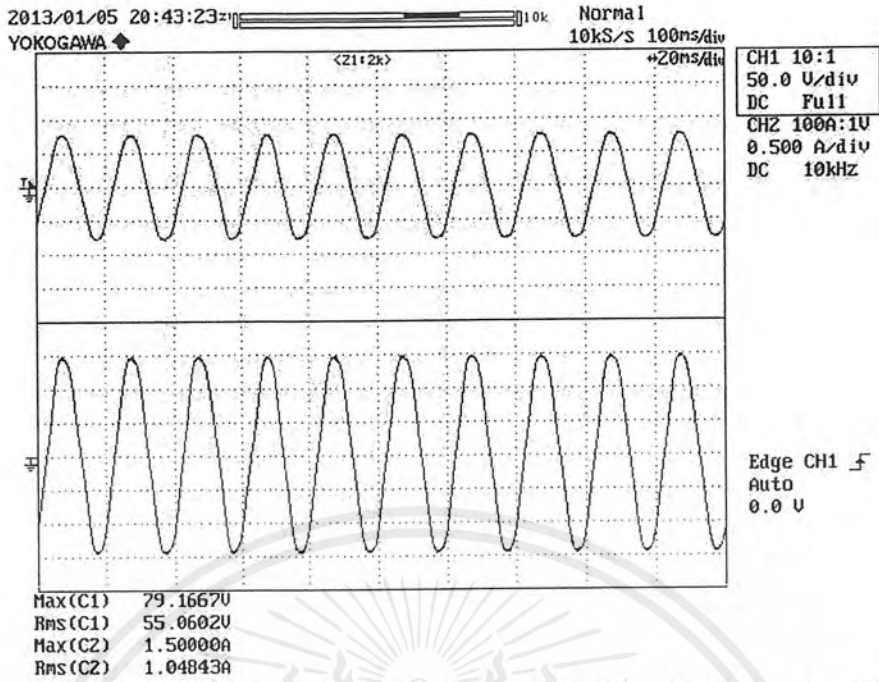


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

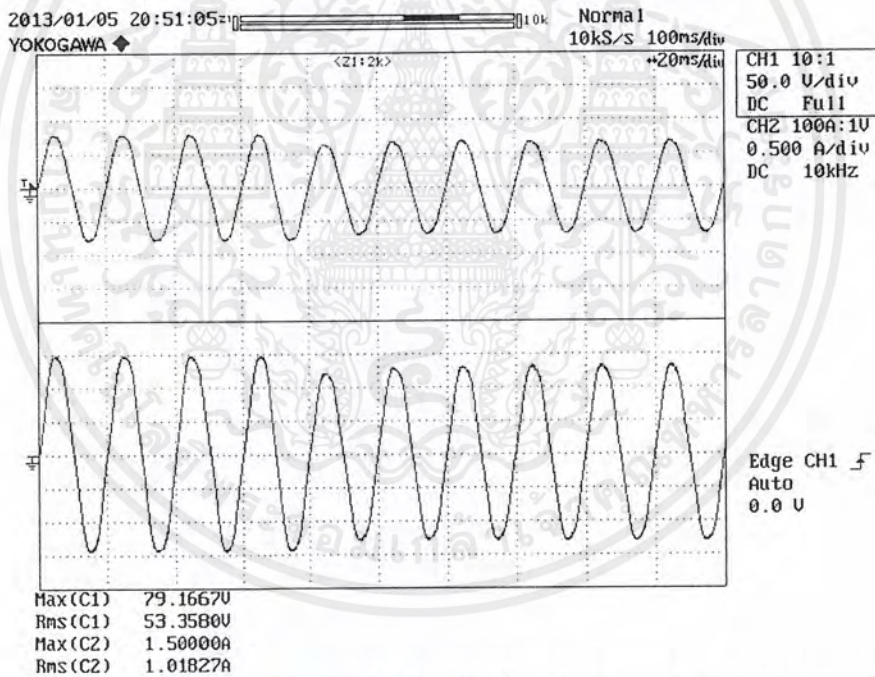


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.15 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 220-308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

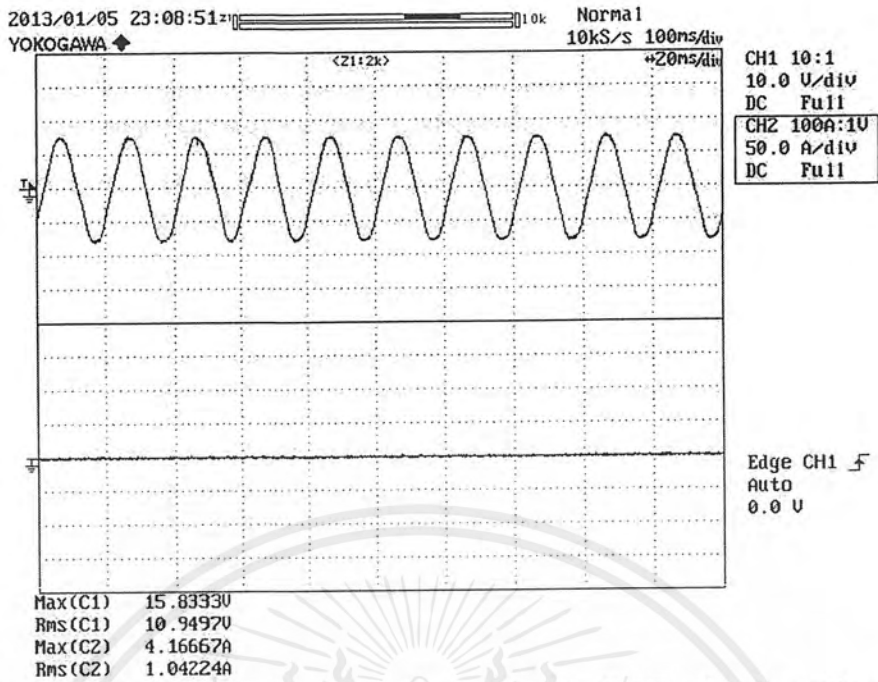


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

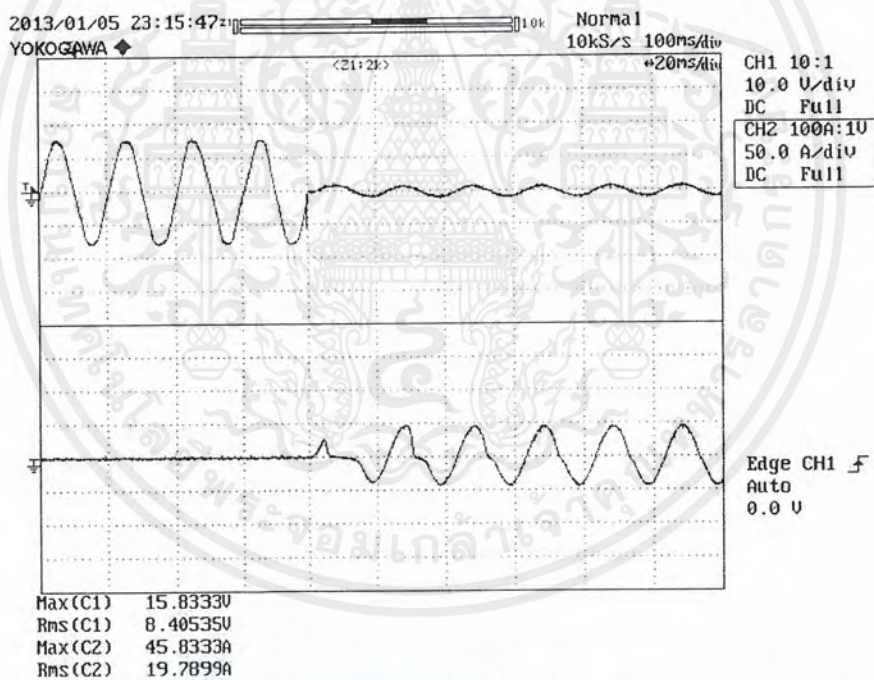


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.15 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 220-308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



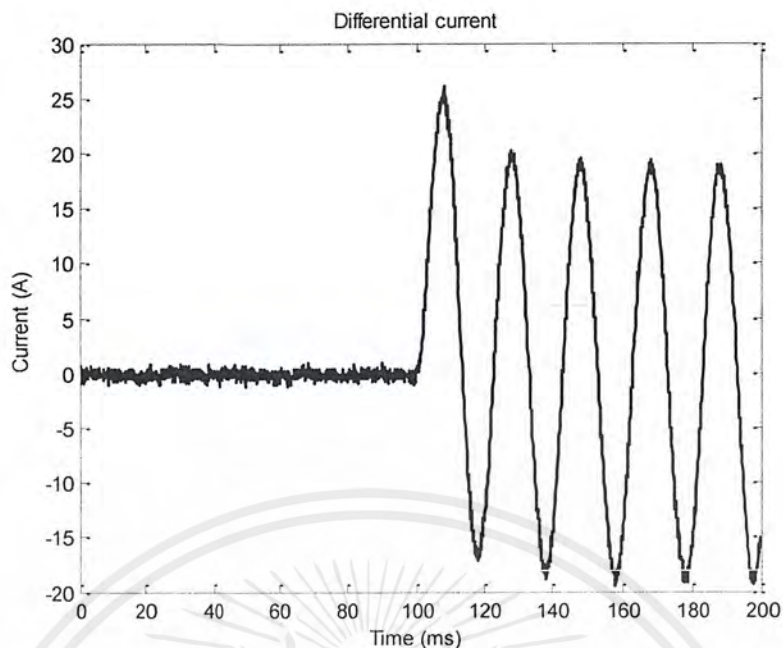
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.15 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 220-308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.15 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 220-308

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.15

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.15 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.15 แอมแปร์ เป็น 19.45 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 27.94 โวลต์ เป็น 25.74 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.15 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.94 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 55.06 โวลต์ เป็น 48.79 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 220-308 ดังรูปที่ 4.15 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

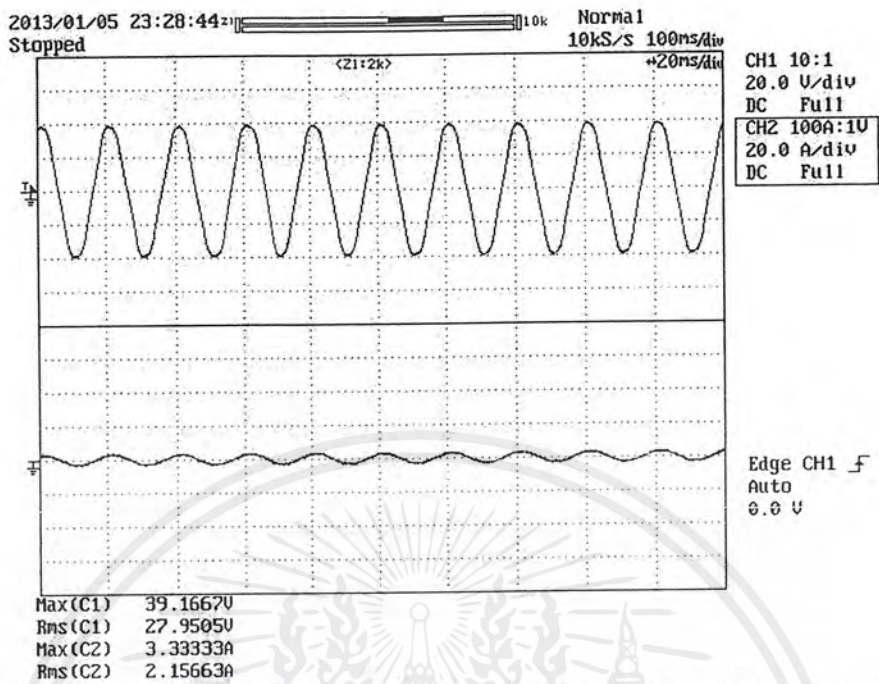
- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 32.41 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 10.95 โวลต์ เป็น 1.27 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.15 (ข)

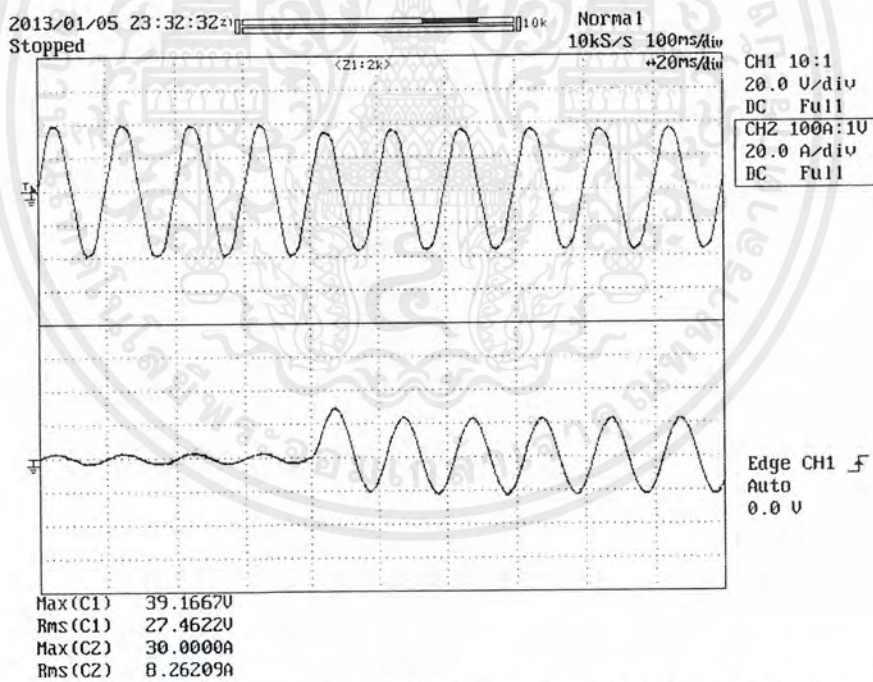
- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.05 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 17.57 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2.6 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 264-352

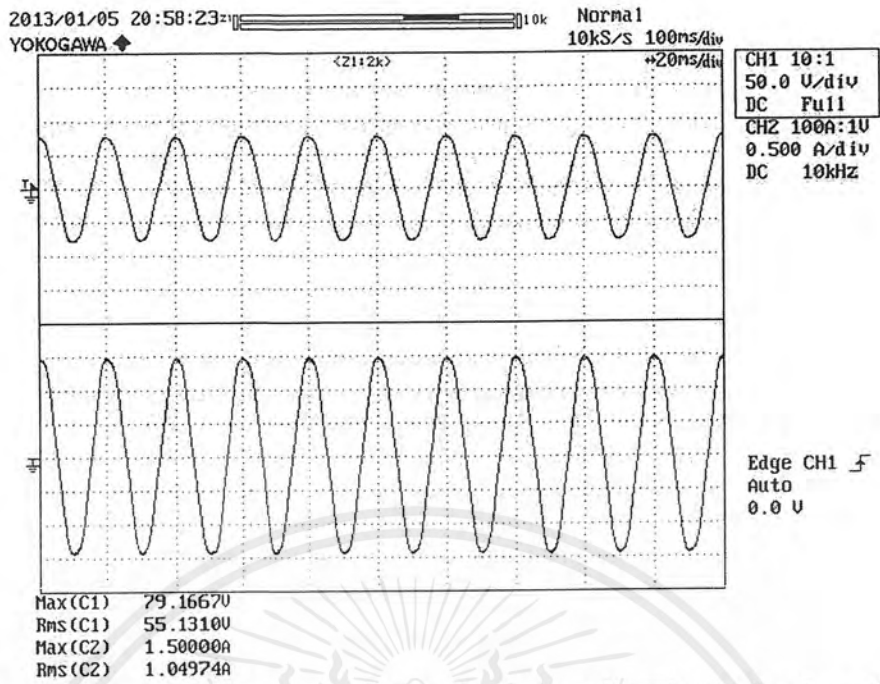


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

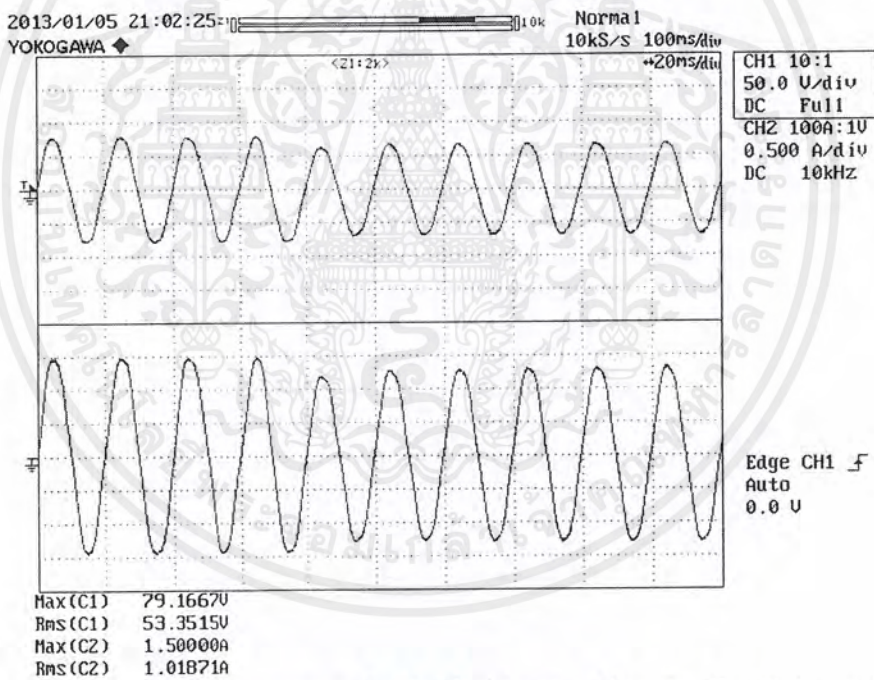


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.16 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 264-352

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

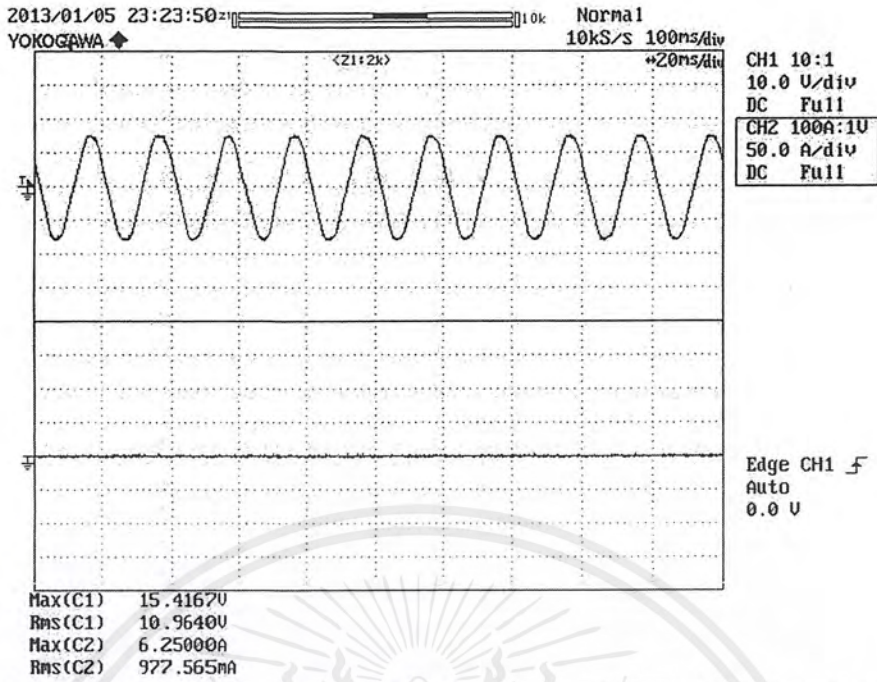


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

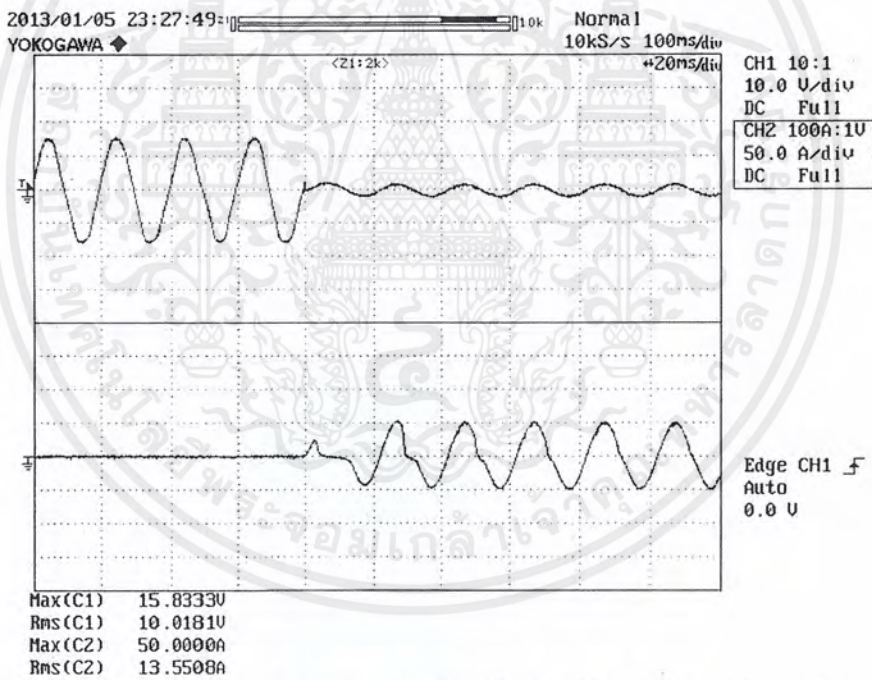


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.16 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 264-352

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

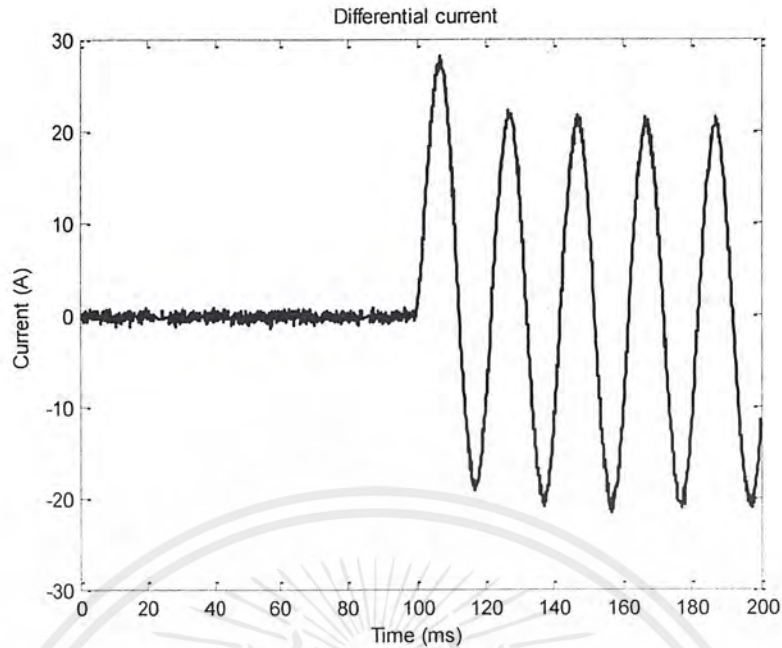


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.16 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 264-352

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.16 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 264-352

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.16

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.16 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.16 แอมแปร์ เป็น 21.21 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 27.95 โวลต์ เป็น 25.74 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.16 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.93 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.13 โวลต์ เป็น 47.73 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 264-352 ดังรูปที่ 4.16 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

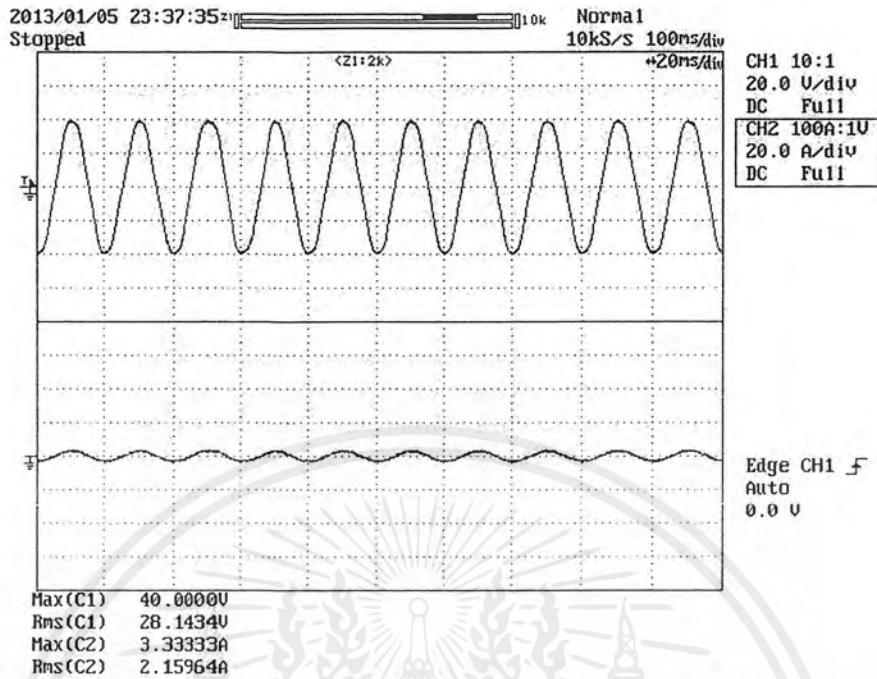
- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 35.36 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 10.96 โวลต์ เป็น 1.27 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.16 (ซ)

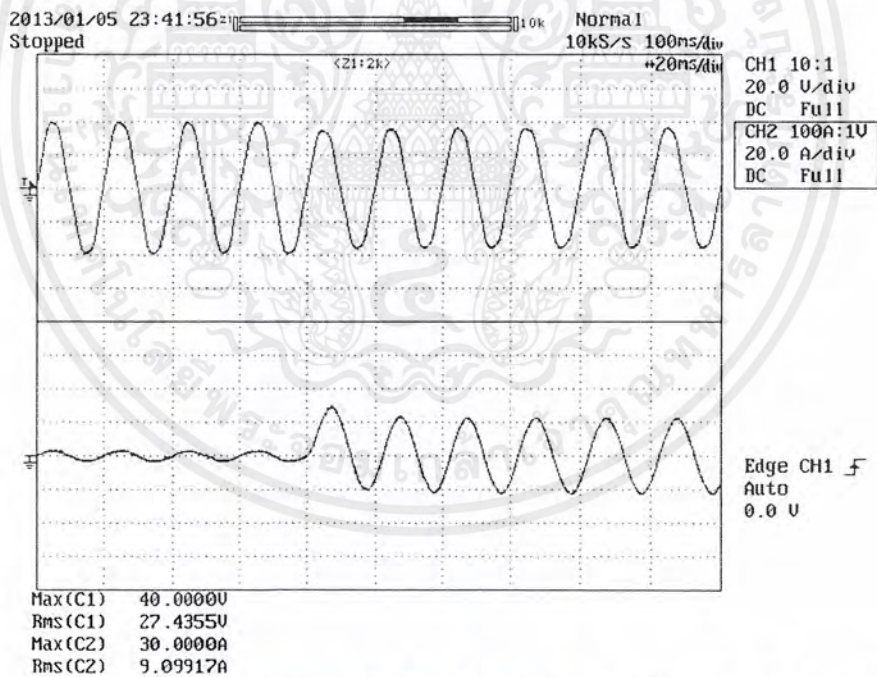
- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.06 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 19.35 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

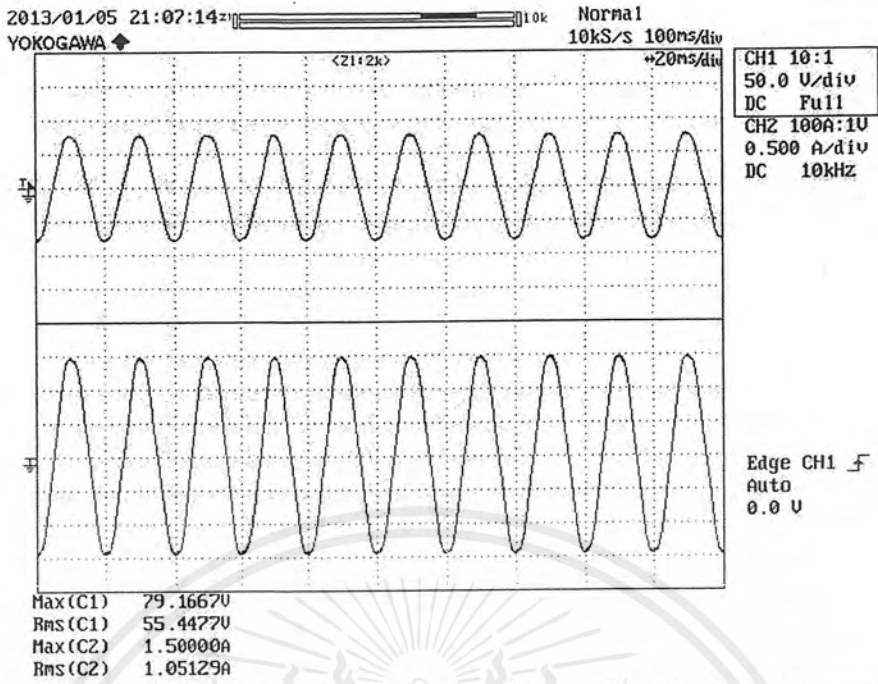
## 4.1.2.7 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 308-396



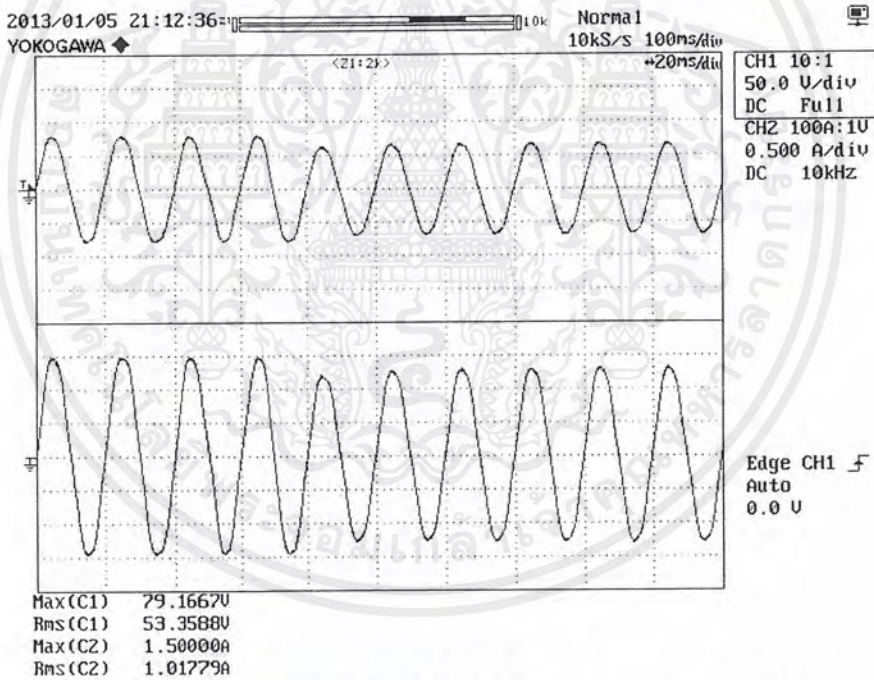
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.17 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซนต์  
ตำแหน่ง 308-396

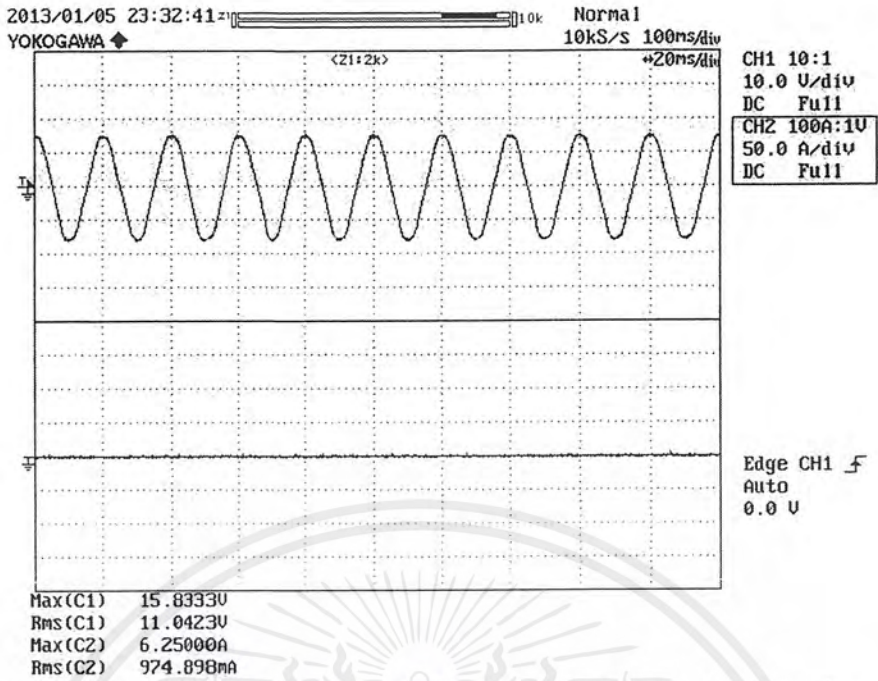


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

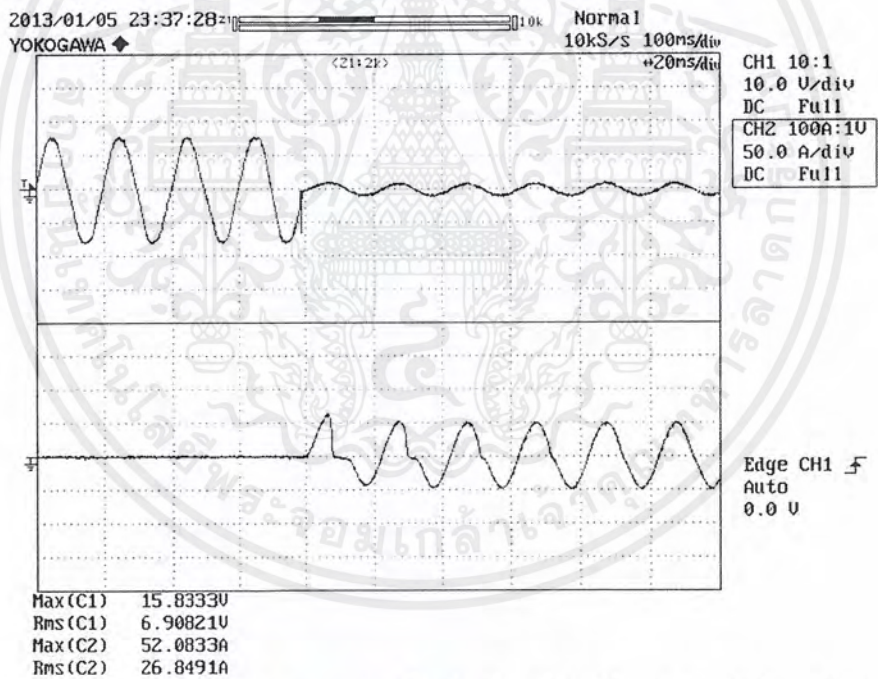


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.17 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 308-396

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

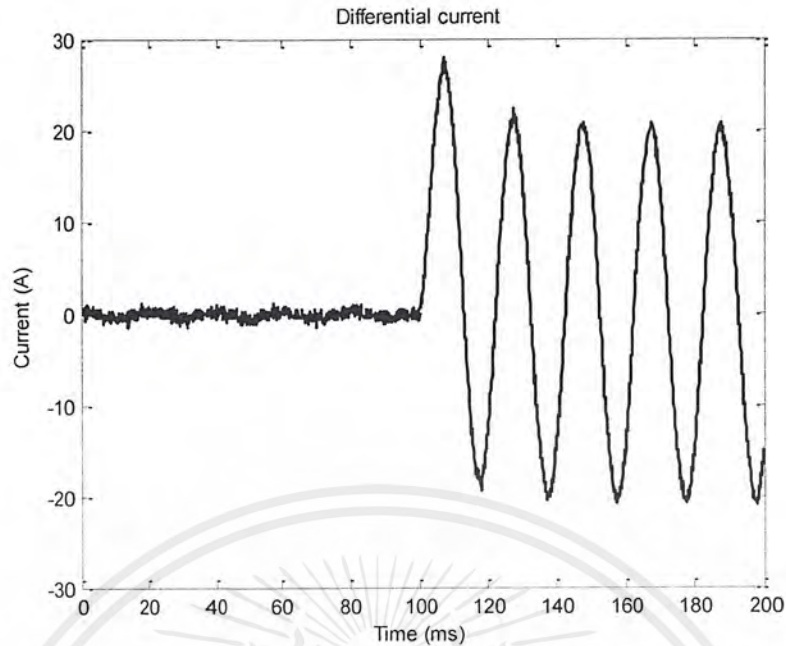


(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.17 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 308-396



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.17 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 308-396

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.17

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.17 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.16 แอมแปร์ เป็น 21.21 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.14 โวลต์ เป็น 25.74 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.17 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.92 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.45 โวลต์ เป็น 47.73 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 264-352 ดังรูปที่ 4.17 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

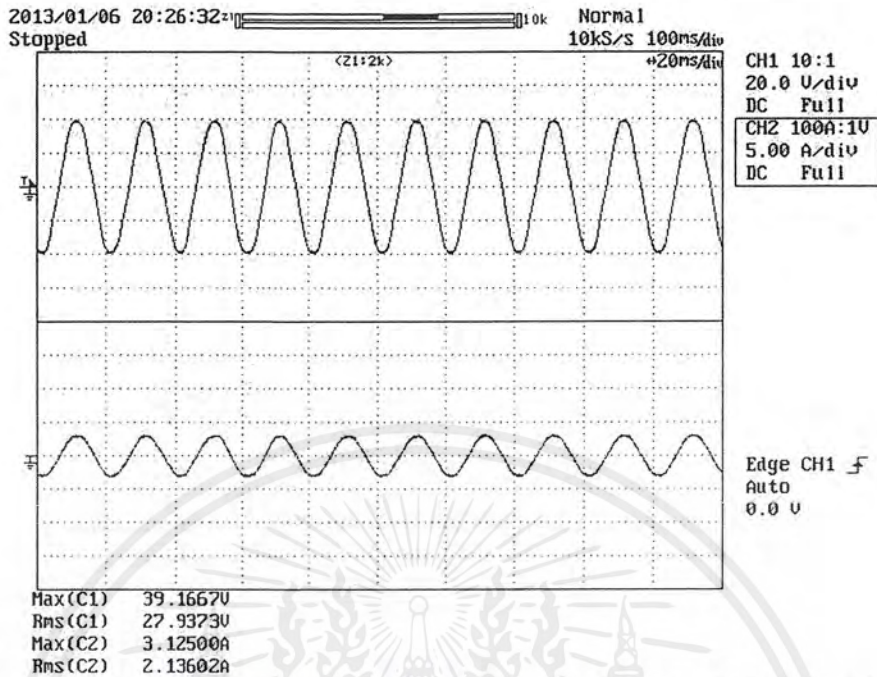
- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 36.83 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 11.04 โวลต์ เป็น 1.34 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.17 (ข)

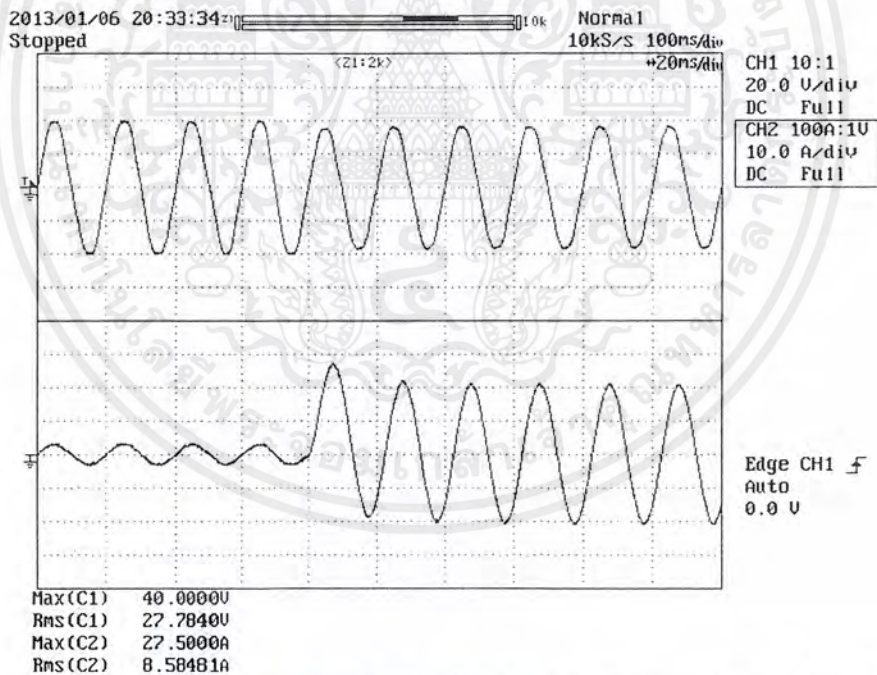
- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.06 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 19.37 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1.2.8 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 352-440

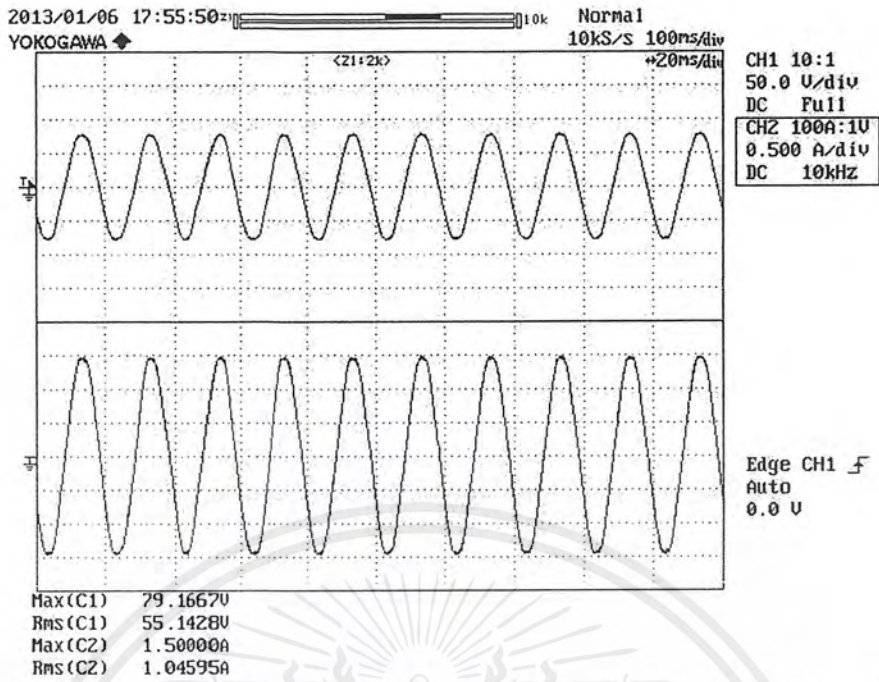


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

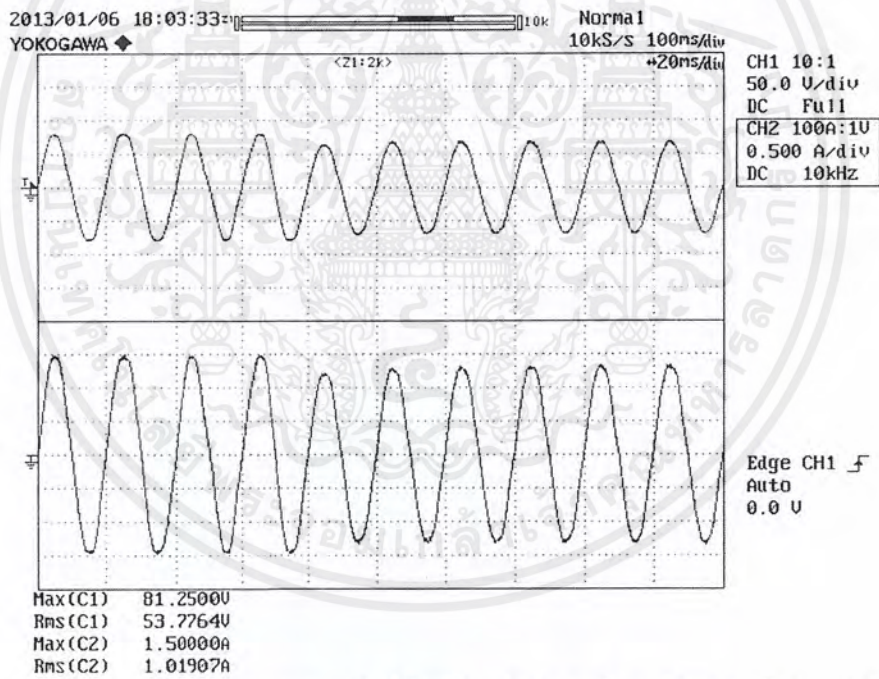


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.18 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 352-440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

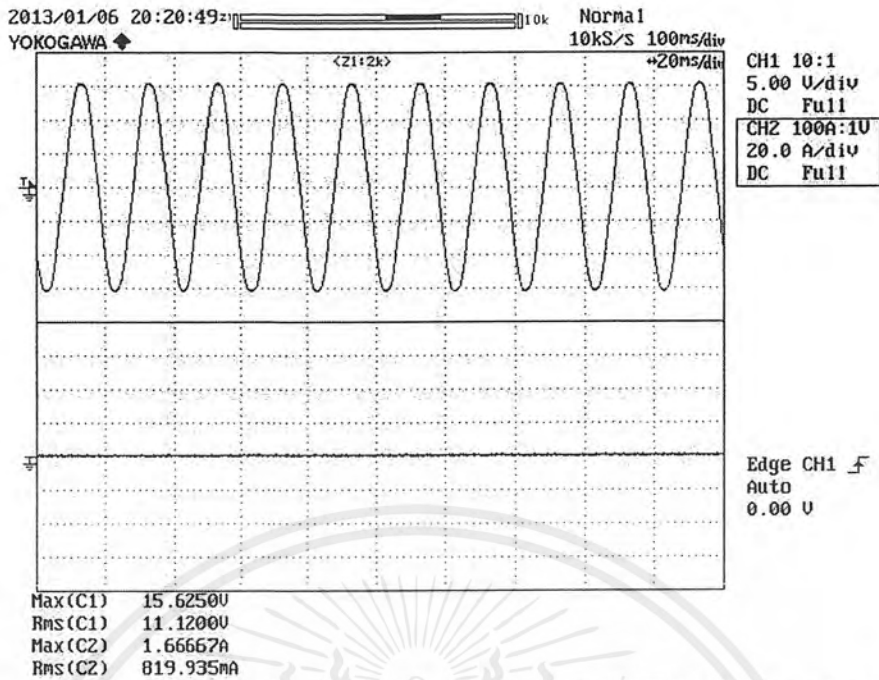


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

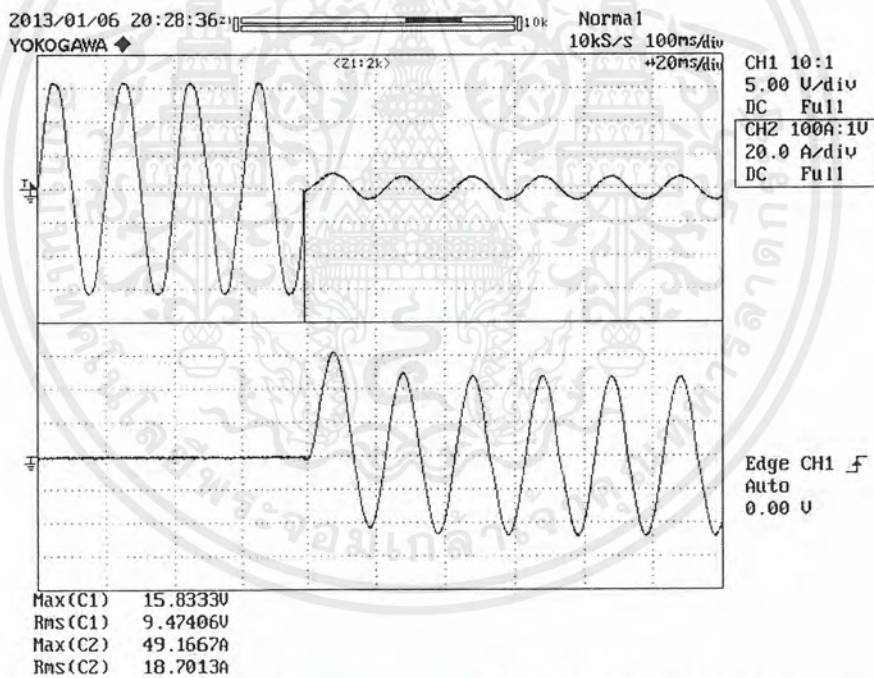


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.18 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 352-440



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

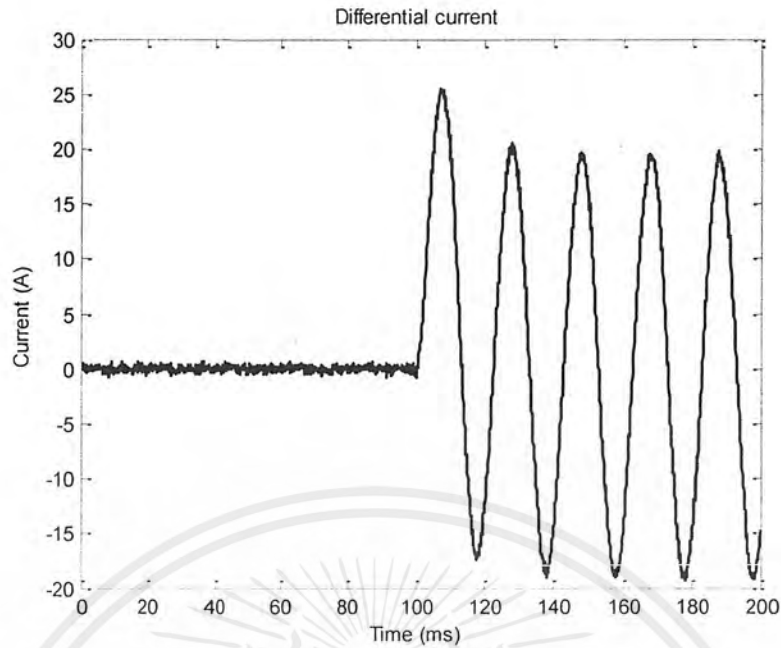


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.18 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 352-440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.18 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 352-440

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.18

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.18 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.14 แอมแปร์ เป็น 19.45 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 27.94 โวลต์ เป็น 25.88 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.18 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.93 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.14 โวลต์ เป็น 49.85 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 352-440 ดังรูปที่ 4.18 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 34.77 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 11.12 โวลต์ เป็น 1.45 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.18 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.04 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 17.59 แอมแปร์

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V แบบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 20 เปอร์เซ็นต์

แอปพลิเคชัน	ระดับแรงดันหม้อแปลง	โหลด	มม	ปฐมภูมิ				ทุติยภูมิ				ลัดวงจร				กระแสผลต่าง	
				ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน	หลัง
				แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส				
44-132	0		28.17	2.15	25.46	20.92	1.06	55.52	48.44	0.93	10.80	0	1.34	35.94	0.03	19.06	
88-176	0		28.02	2.15	25.60	20.63	1.05	55.31	47.38	0.92	11.00	0	1.34	37.12	0.05	18.79	
132-220	0		28.07	2.15	25.46	19.45	1.05	55.31	48.08	0.95	11.01	0	1.41	34.17	0.05	17.55	
176-264	0		28.16	2.14	23.33	31.82	1.05	55.45	40.31	0.81	11.03	0	2.26	69.24	0.04	30.20	
220-308	0	156 W	27.94	2.15	25.74	19.45	1.05	55.06	48.79	0.94	10.95	0	1.27	32.41	0.05	17.57	
264-352	0		27.95	2.16	25.74	21.21	1.05	55.13	47.73	0.93	10.96	0	1.27	35.36	0.06	19.35	
308-396	0		28.14	2.16	25.74	21.21	1.05	55.45	47.73	0.92	11.04	0	1.34	36.83	0.06	19.37	
352-440	0		27.94	2.14	25.88	19.45	1.05	55.14	49.85	0.93	11.12	0	1.45	34.77	0.04	17.59	

จากการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V แบบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองก่อน และหลังการลัดวงจร พบว่า

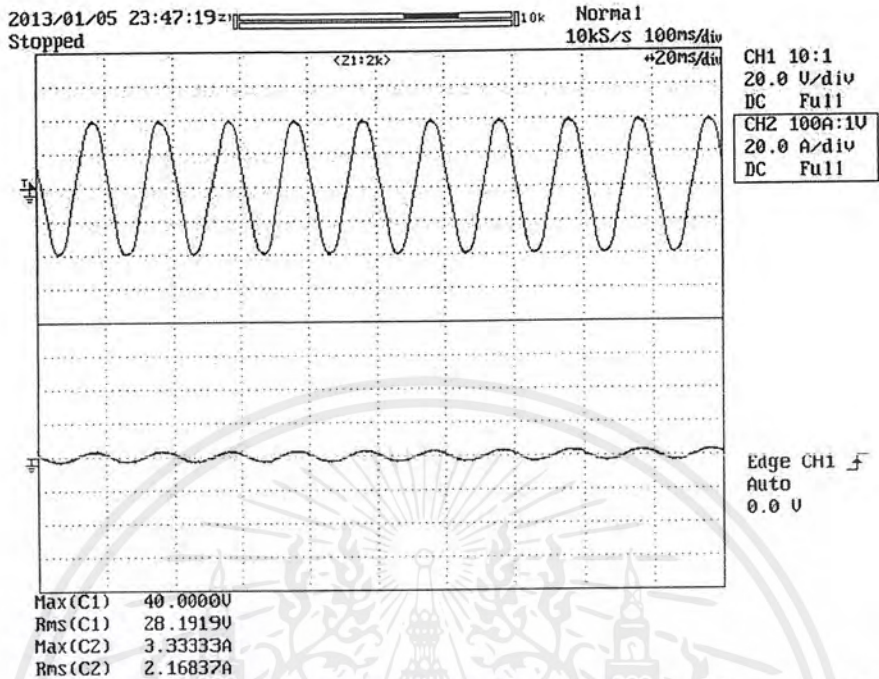
ทางด้านปฐมภูมิ แรงดันไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร กระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งขดลวด โดยที่แบบขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

ทางด้านทุติยภูมิ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งขดลวด โดยที่แบบขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

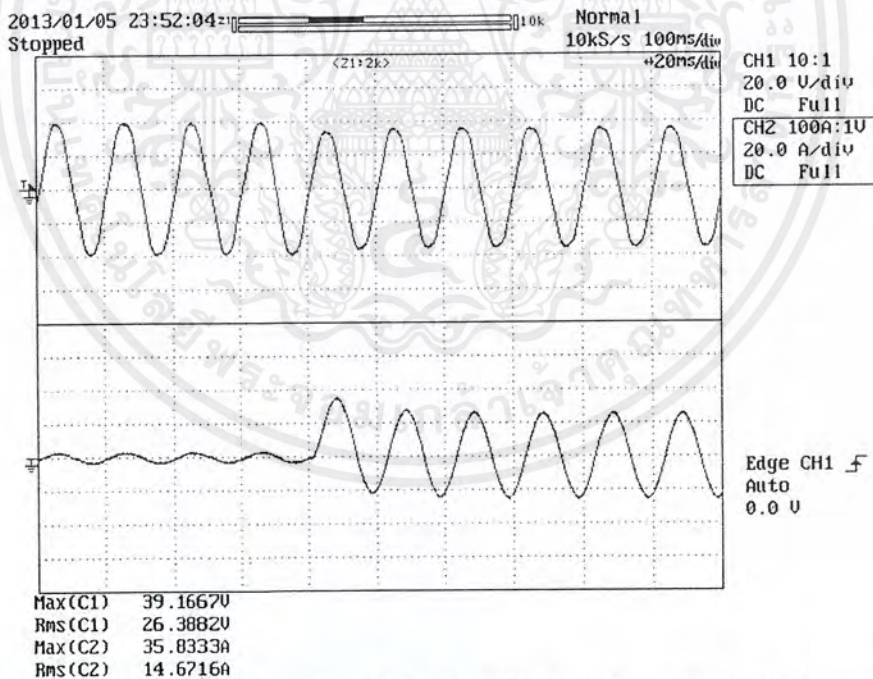
ทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจร แนวโน้มพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า คล้ายกับทางด้านปฐมภูมิ แต่ค่าแอมพลิจูดของแรงดันต่ำกว่า ค่าแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรสูงกว่า เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งขดลวด โดยที่แบบขดลวดแรงดันต่างกัน 20 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า กระแสผลต่างมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

4.1.3 กรณีแทปขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์

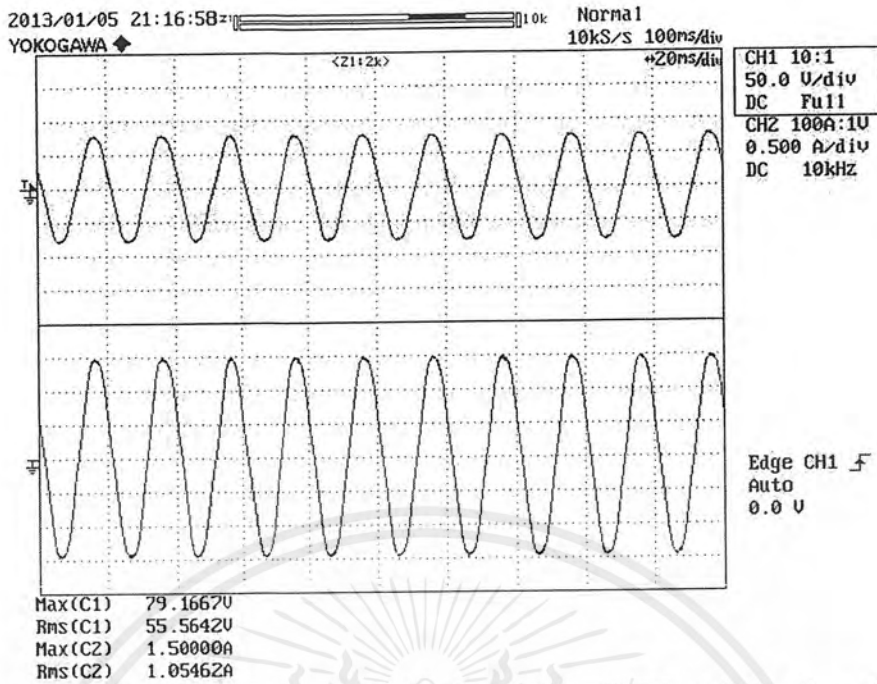
4.1.3.1 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 44-176



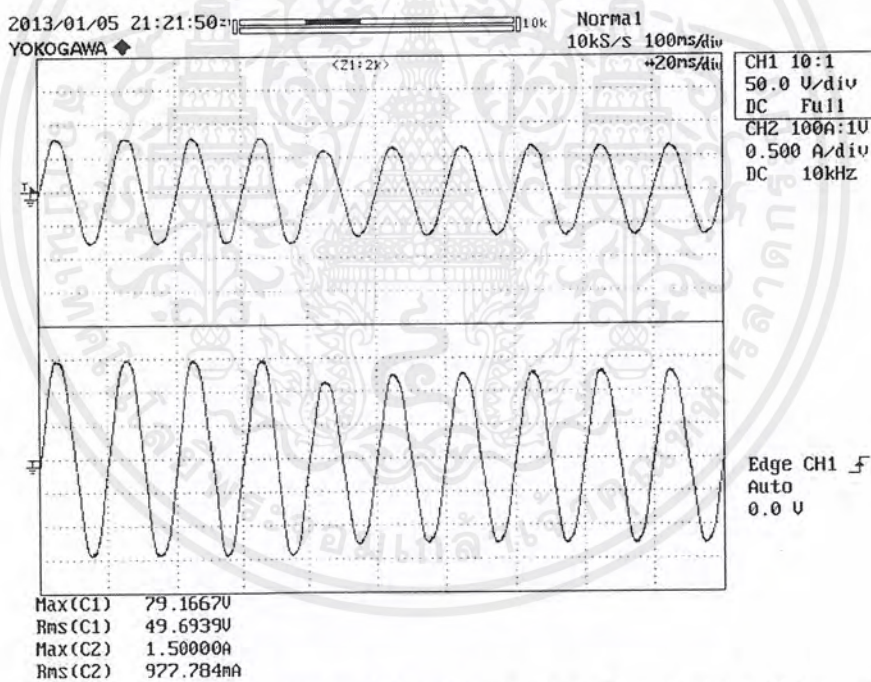
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.19 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-176



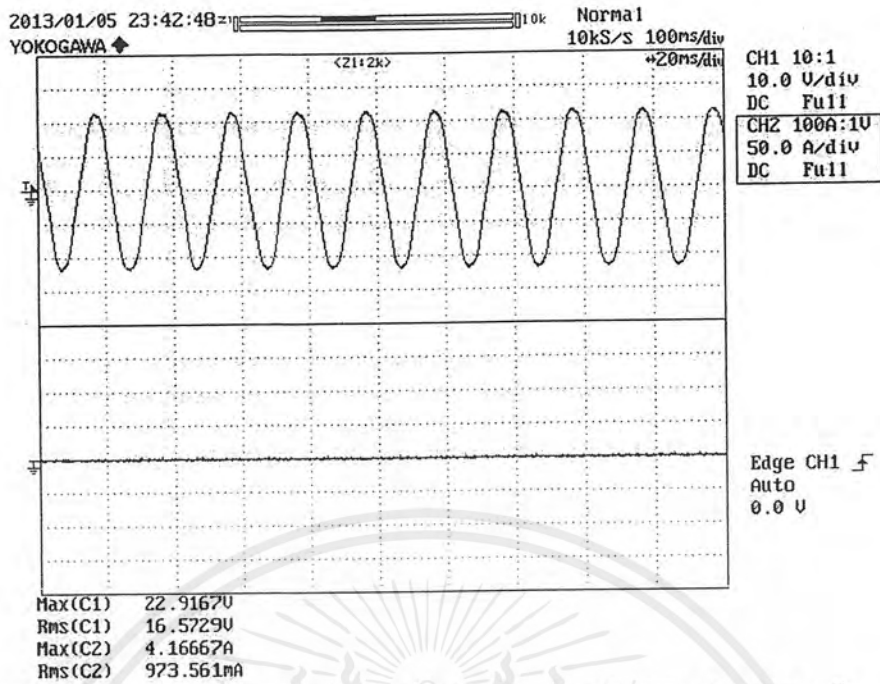
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



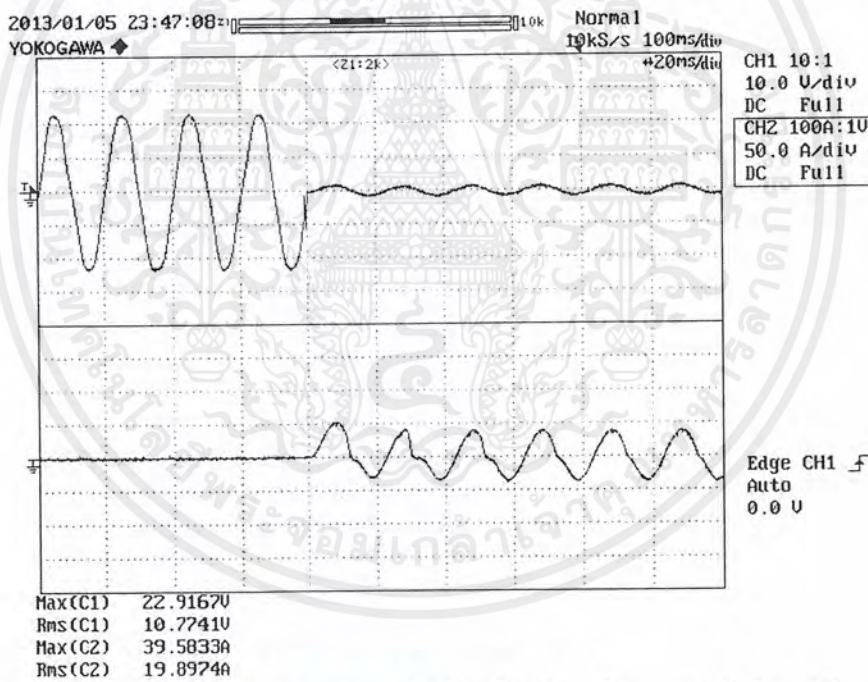
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.19 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 44-176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

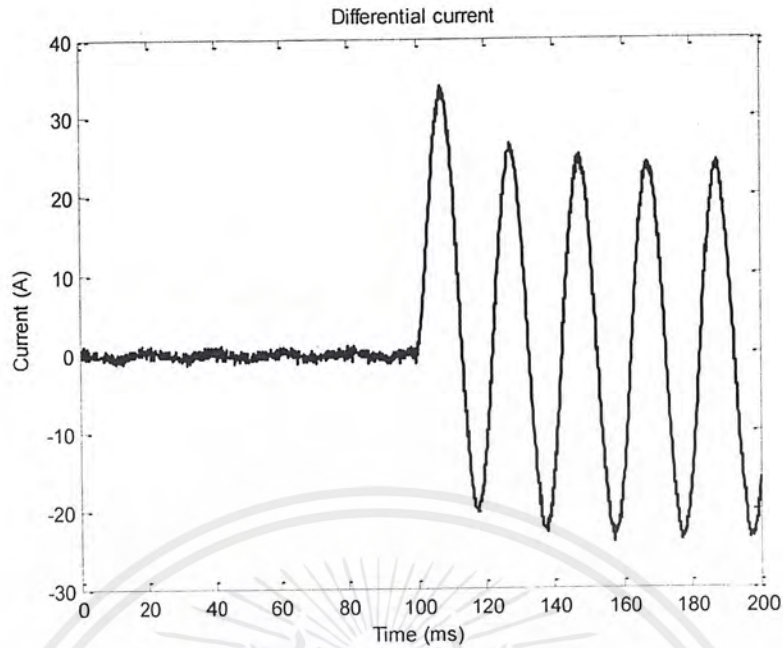


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.19 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 44-176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.19 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-176

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.19

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.19 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.17 แอมแปร์ เป็น 25.34 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.19 โวลต์ เป็น 25.60 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.19 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.92 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.56 โวลต์ เป็น 46.67 โวลต์

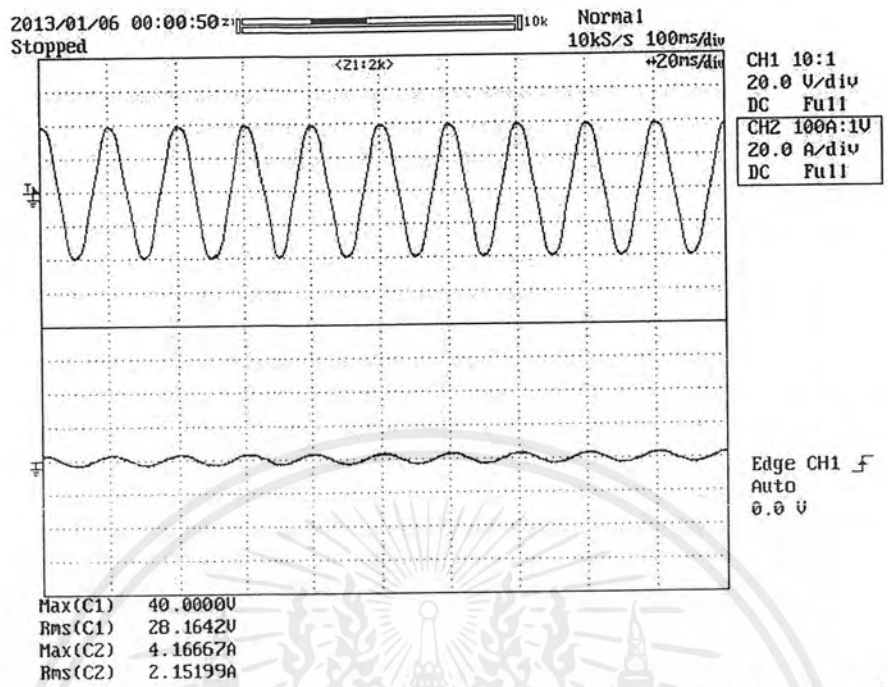
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 44-176 ดังรูปที่ 4.19 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 27.99 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 16.57 โวลต์ เป็น 1.06 โวลต์

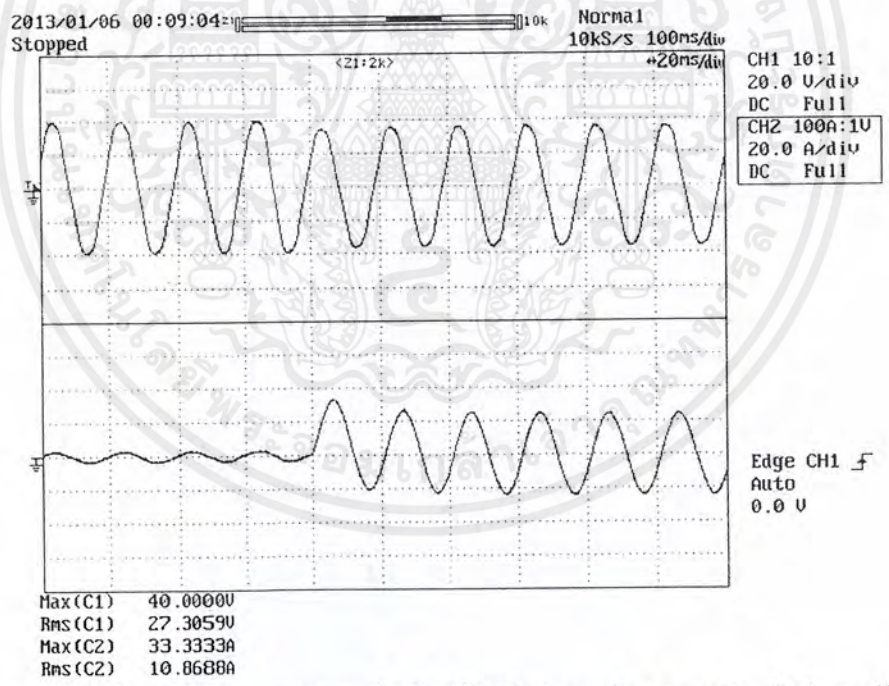
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.19 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.07 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 23.50 แอมแปร์

4.1.3.2 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 88-220

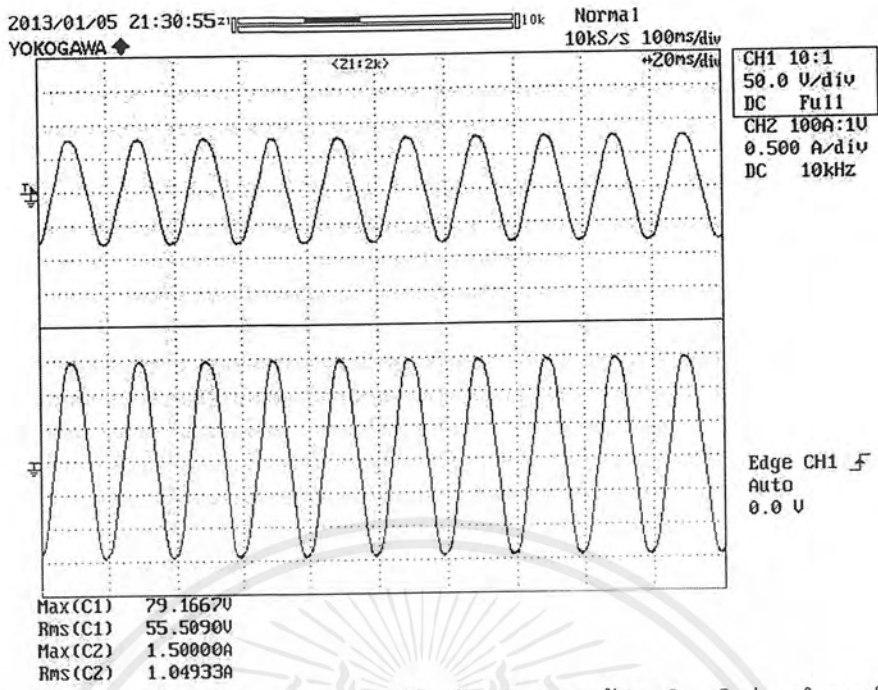


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

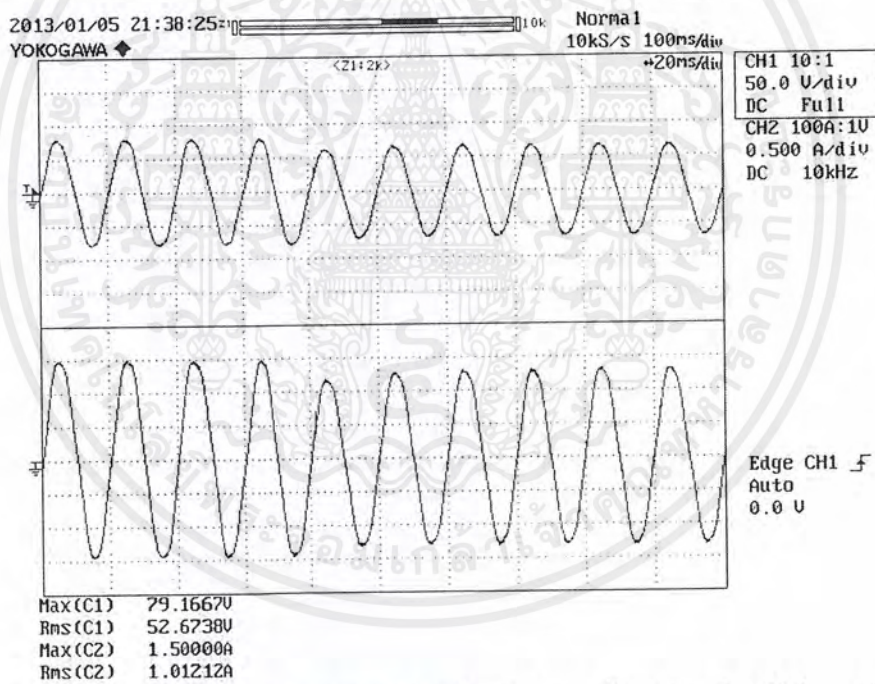


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.20 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 88-220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

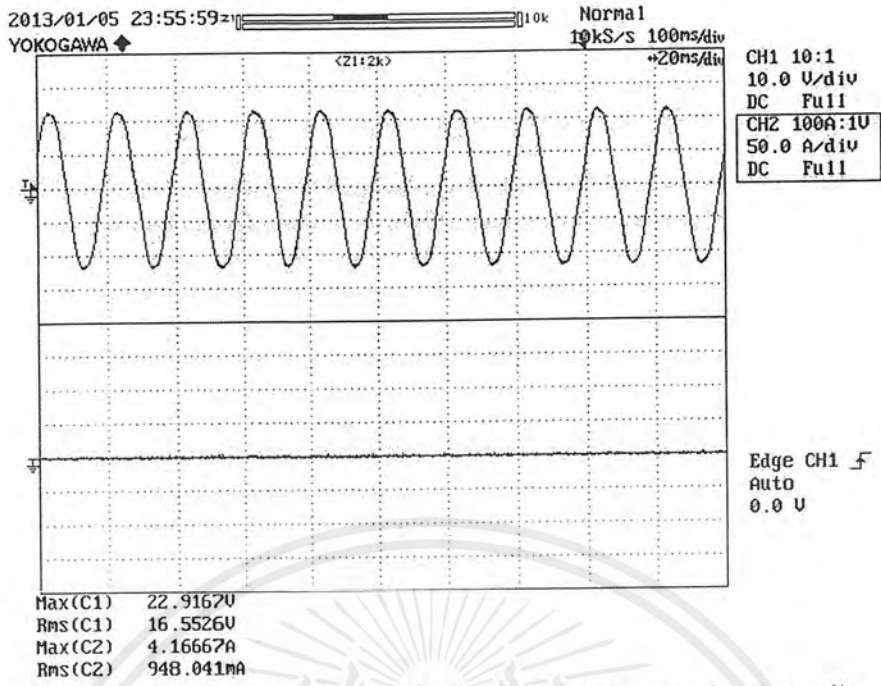


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

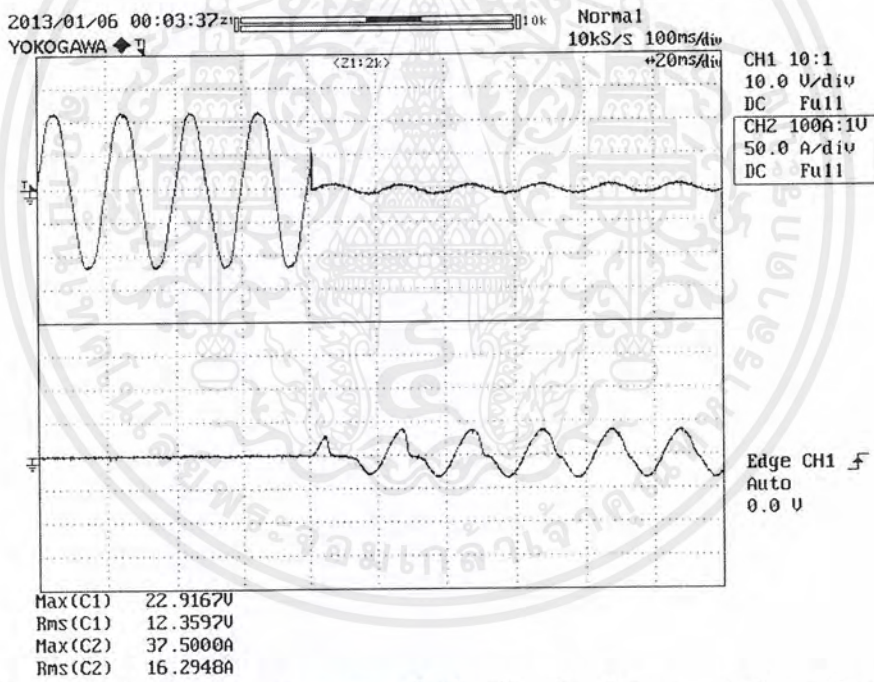


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.20 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 88-220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

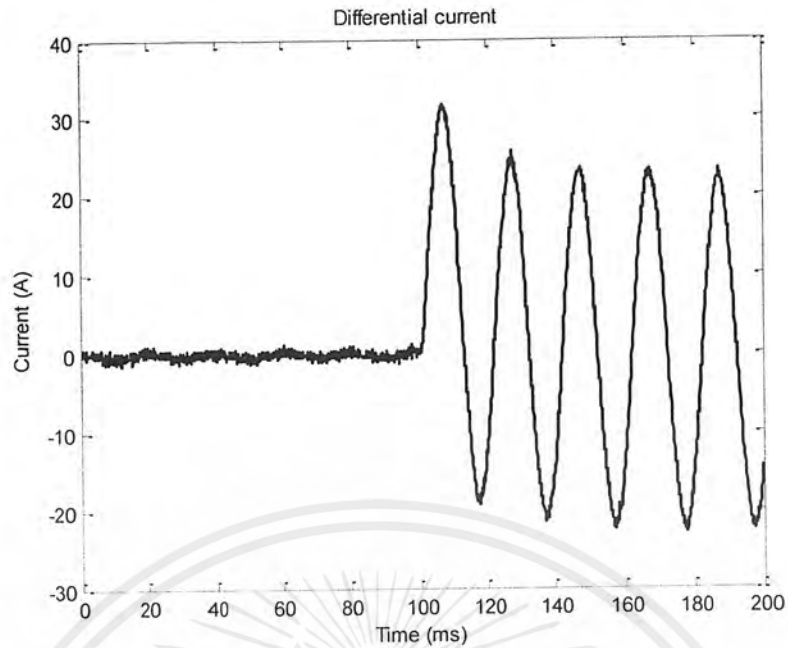


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.20 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 88-220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.20 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 88-220

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.20

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.20 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.15 แอมแปร์ เป็น 23.57 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.16 โวลต์ เป็น 25.46 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.20 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.92 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.51 โวลต์ เป็น 47.38 โวลต์

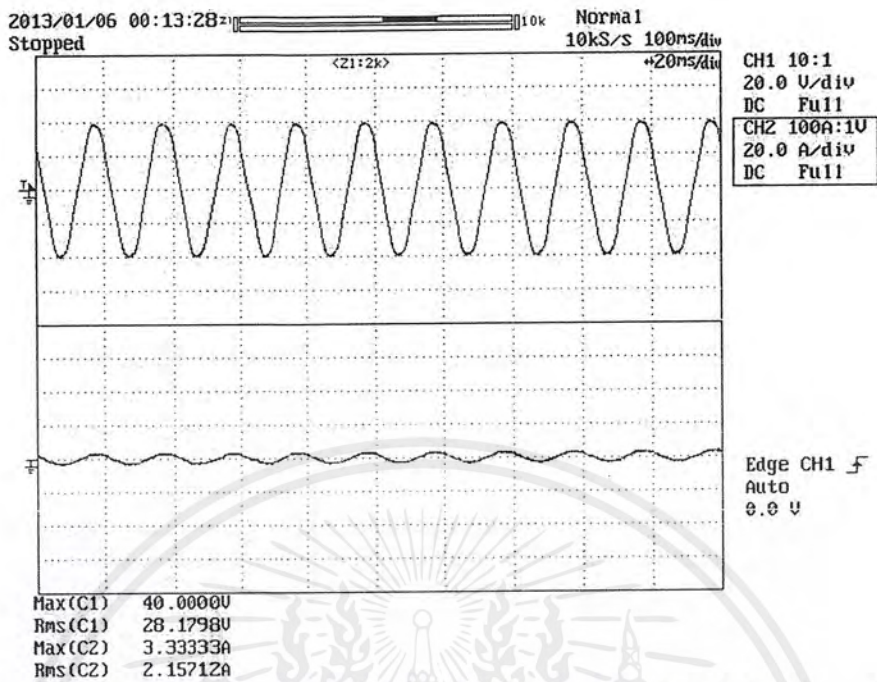
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนของลัดวงจรที่ตำแหน่ง 88-220 ดังรูปที่ 4.20 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 26.52 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 16.55 โวลต์ เป็น 1.06 โวลต์

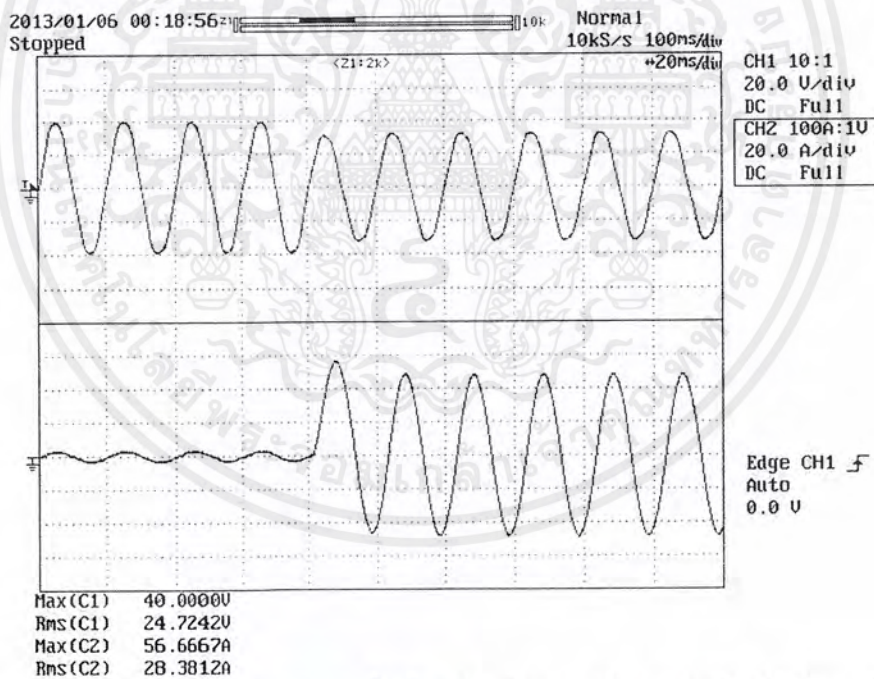
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.20 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.05 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 21.73 แอมแปร์

4.1.3.3 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 132-264

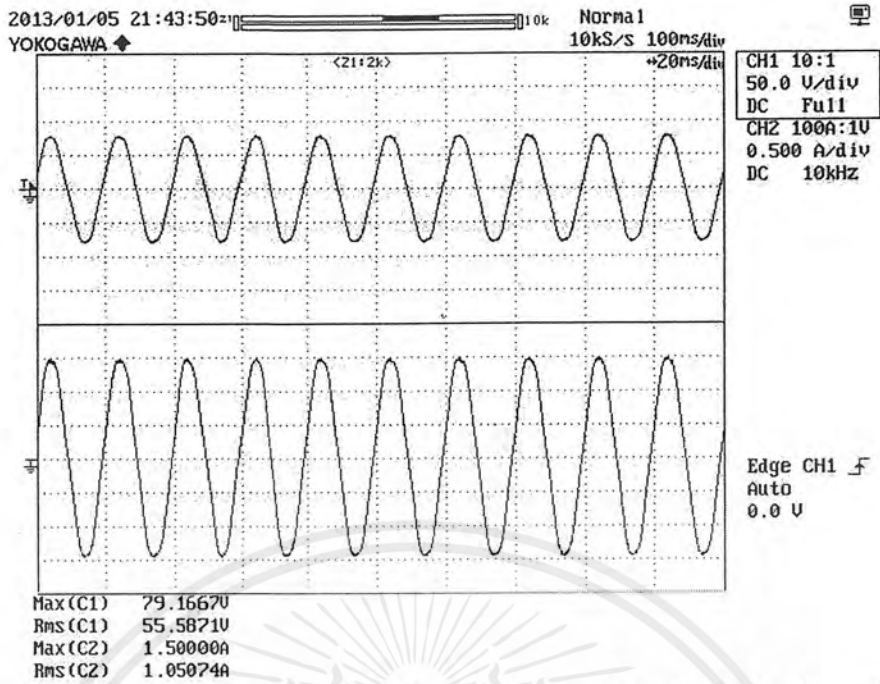


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

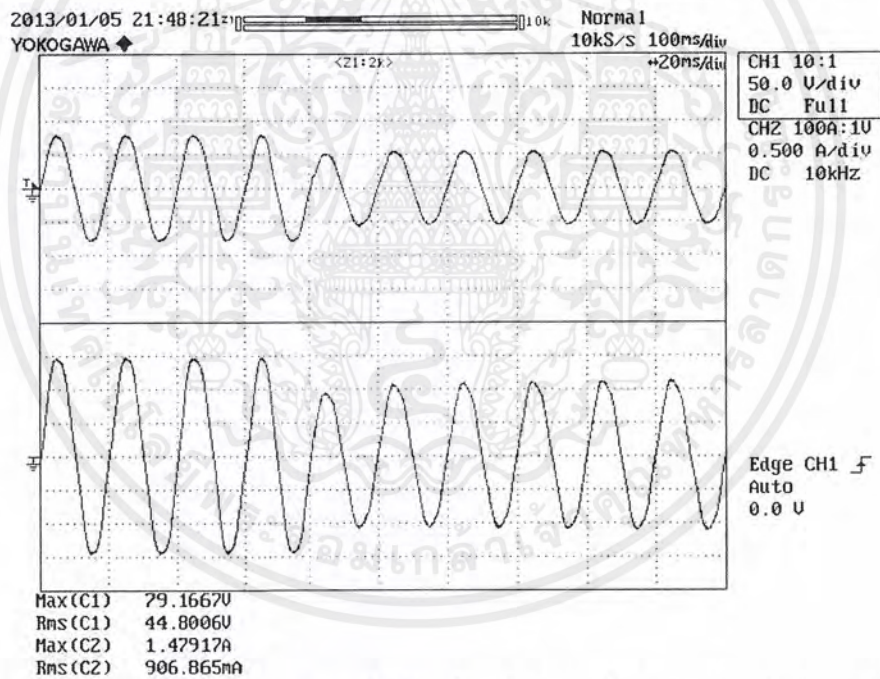


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.21 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 132-264

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

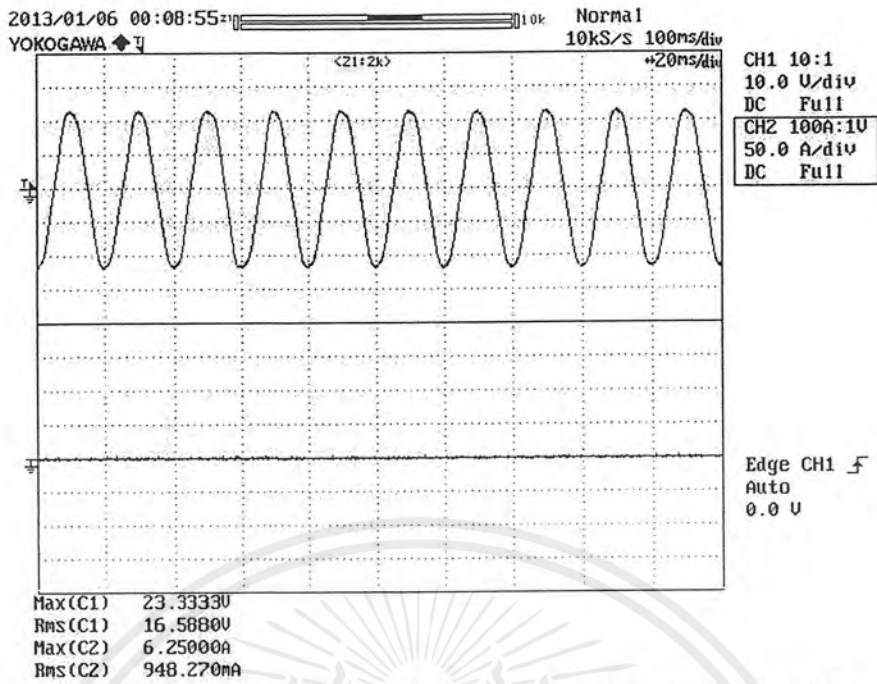


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

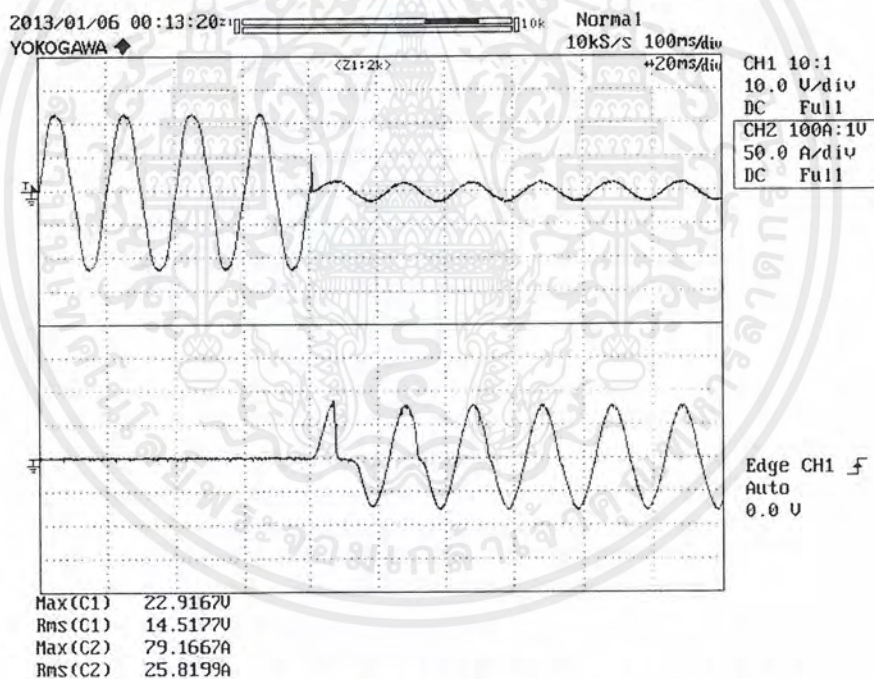


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.21 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 132-264

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

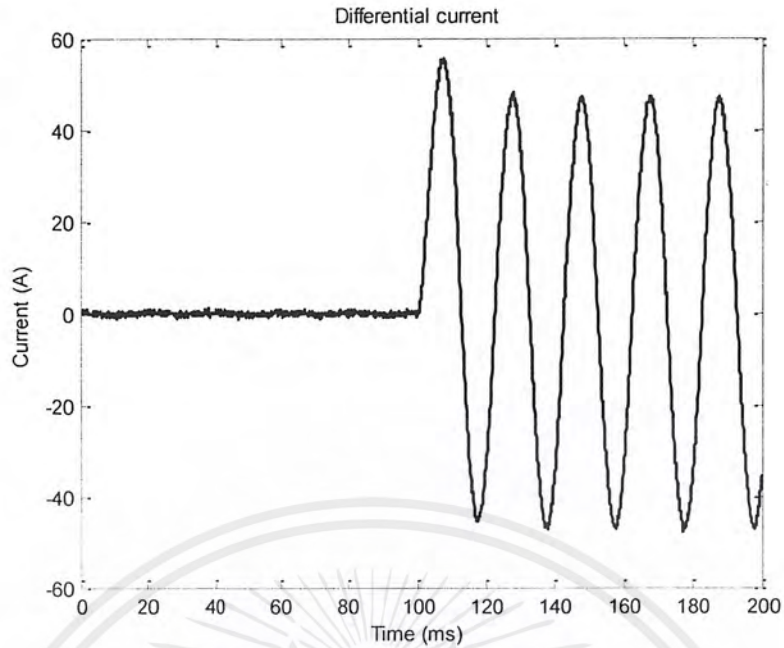


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.21 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 132-264

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.21 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 132-264

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.21

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.21 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.16 แอมแปร์ เป็น 40.07 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 28.18 โวลต์ เป็น 23.05 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.21 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.78 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 55.56 โวลต์ เป็น 38.18 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 132-264 ดังรูปที่ 4.21 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

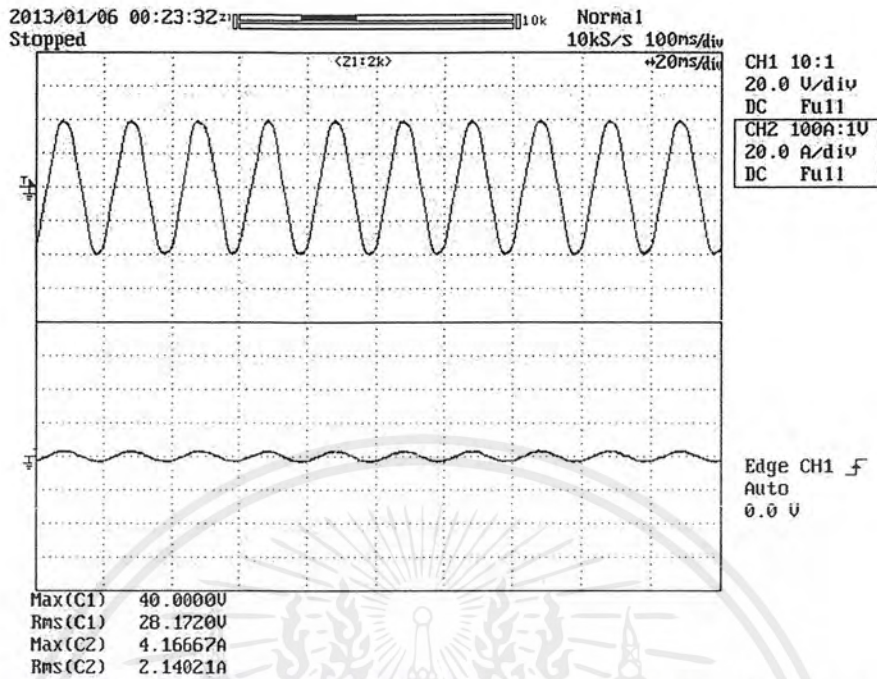
- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 55.97 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 16.58 โวลต์ เป็น 1.63 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.21 (ข)

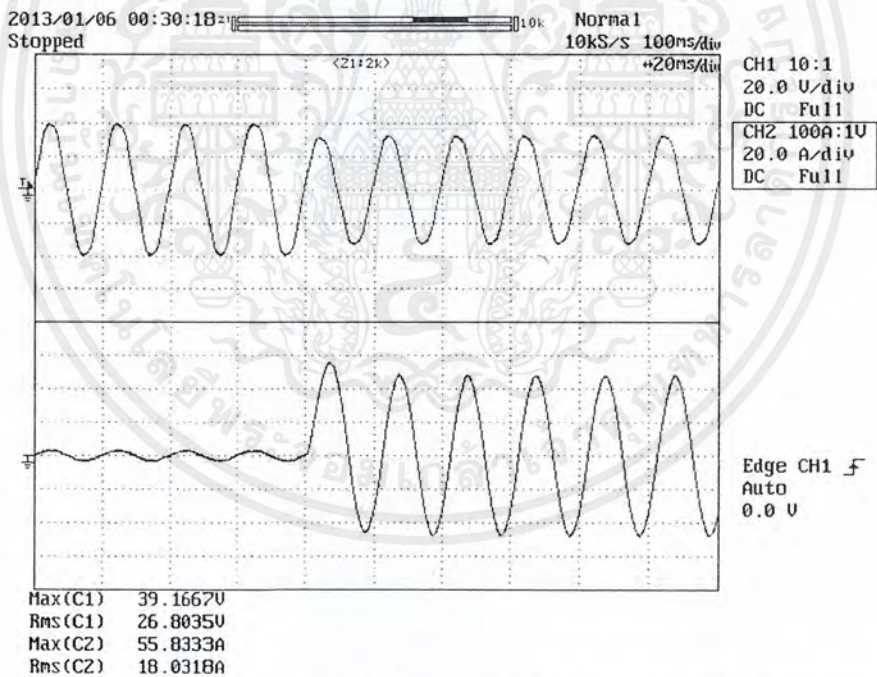
- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.06 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 38.51 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

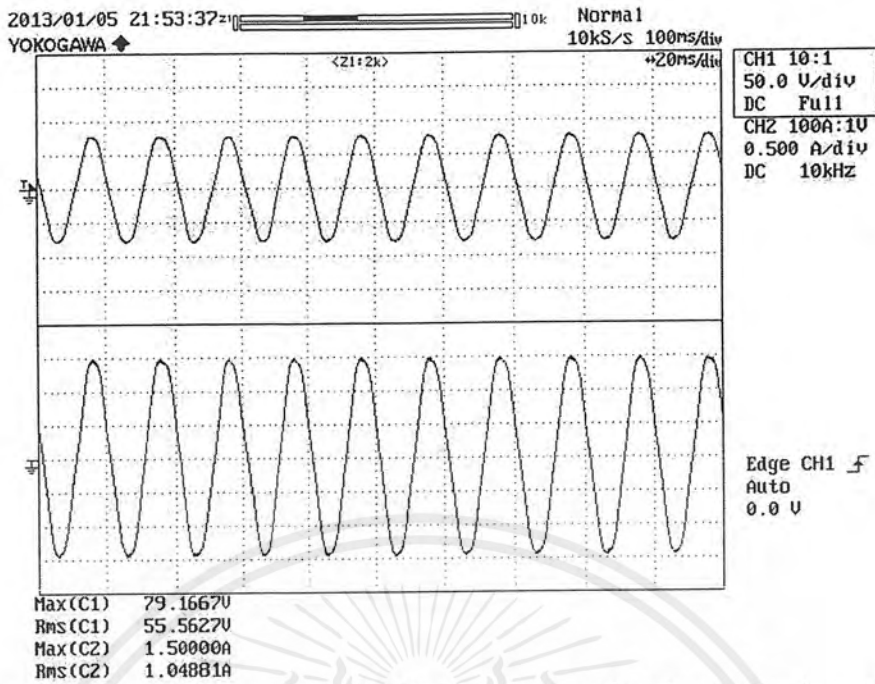
## 4.1.3.4 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 176-308



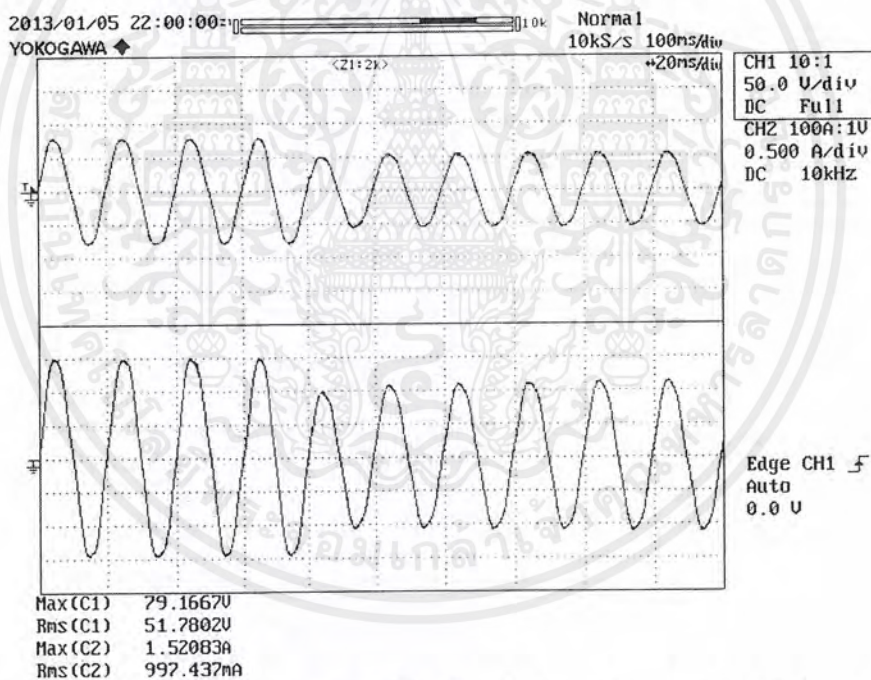
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.22 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซนต์  
ตำแหน่ง 176-308



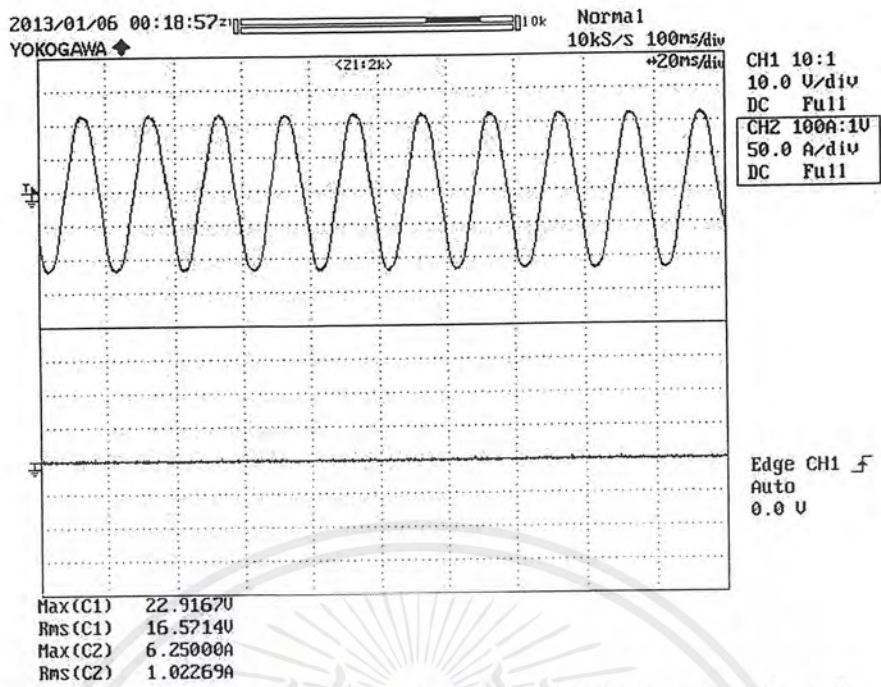
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



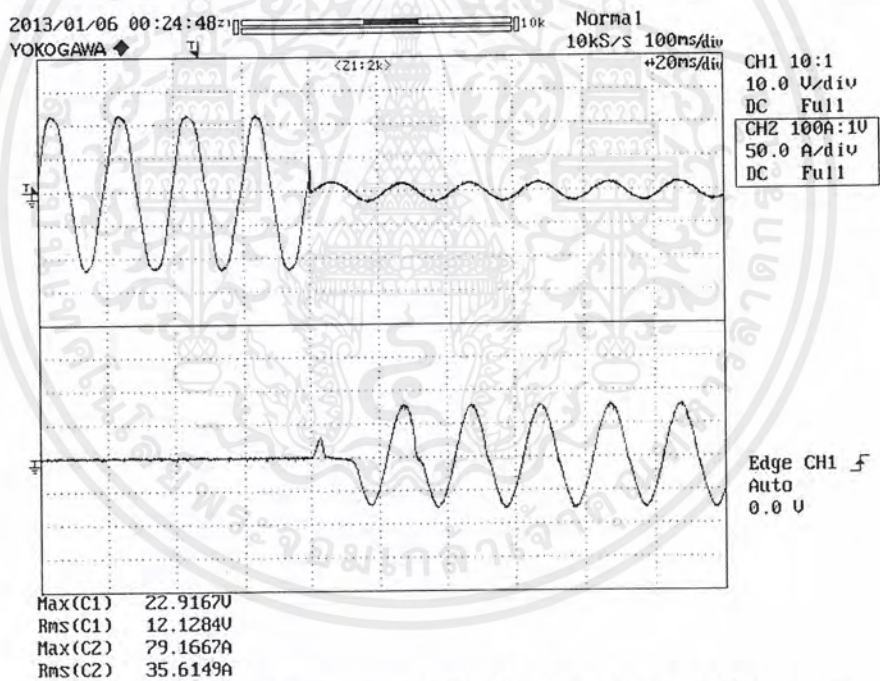
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.22 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 176-308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

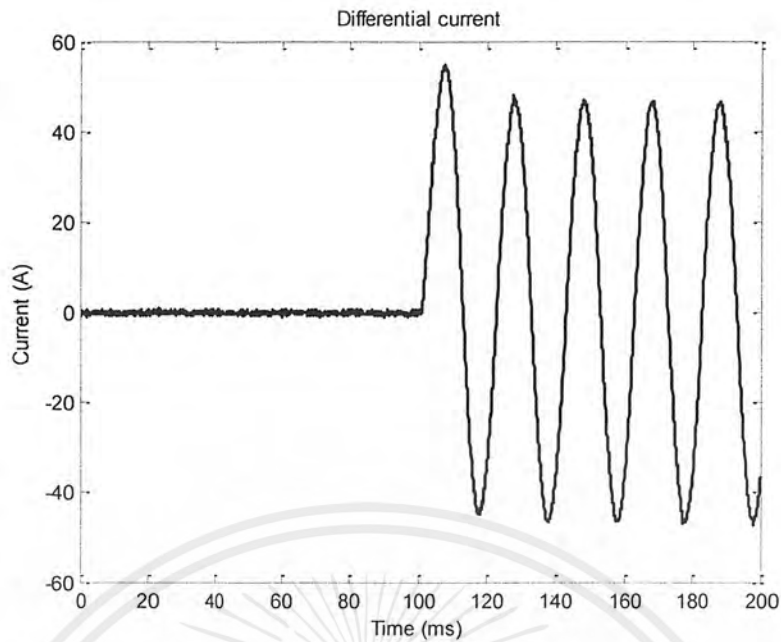


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.22 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 176-308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.22 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 176-308

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.22

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.22 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.14 แอมแปร์ เป็น 39.48 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 28.17 โวลต์ เป็น 23.05 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.22 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.78 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 55.56 โวลต์ เป็น 38.18 โวลต์

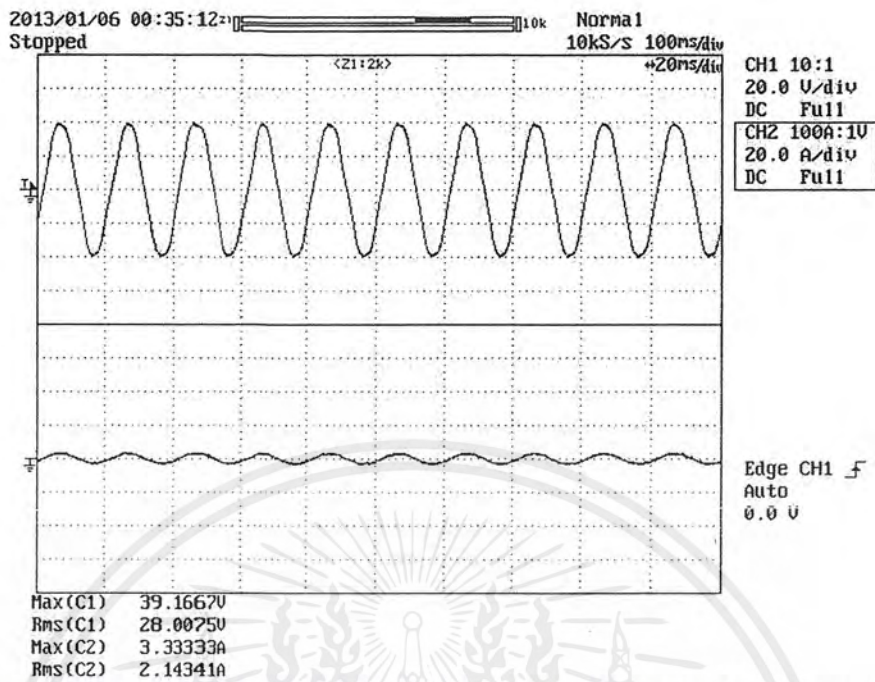
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนของลัดวงจรที่ตำแหน่ง 176-308 ดังรูปที่ 4.22 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 55.97 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 16.57 โวลต์ เป็น 1.98 โวลต์

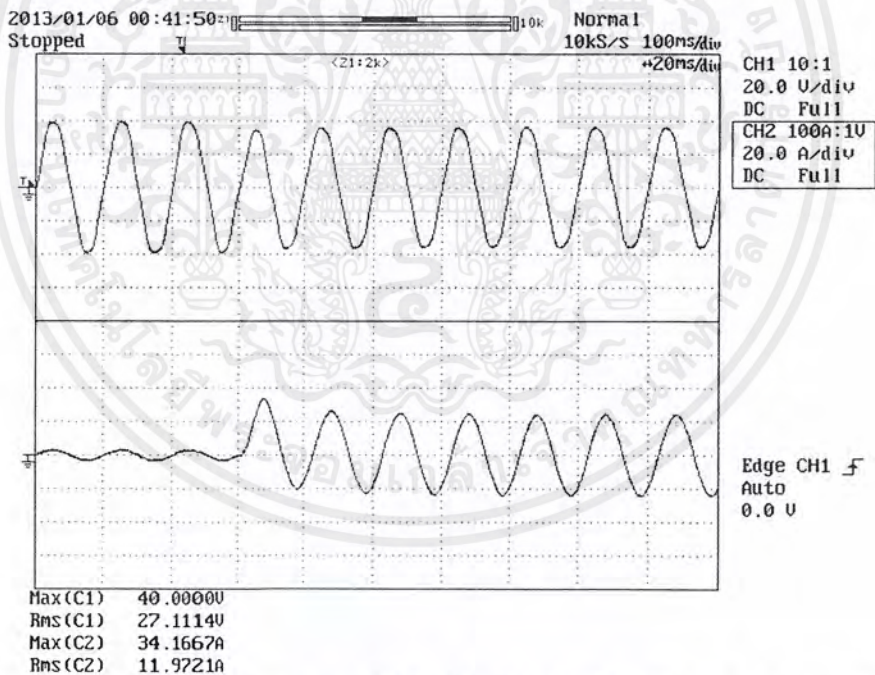
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.22 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.04 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 37.92 แอมแปร์

## 4.1.3.5 การลัดวงจรระหว่างแท็บขดลวด ตำแหน่ง 220-352

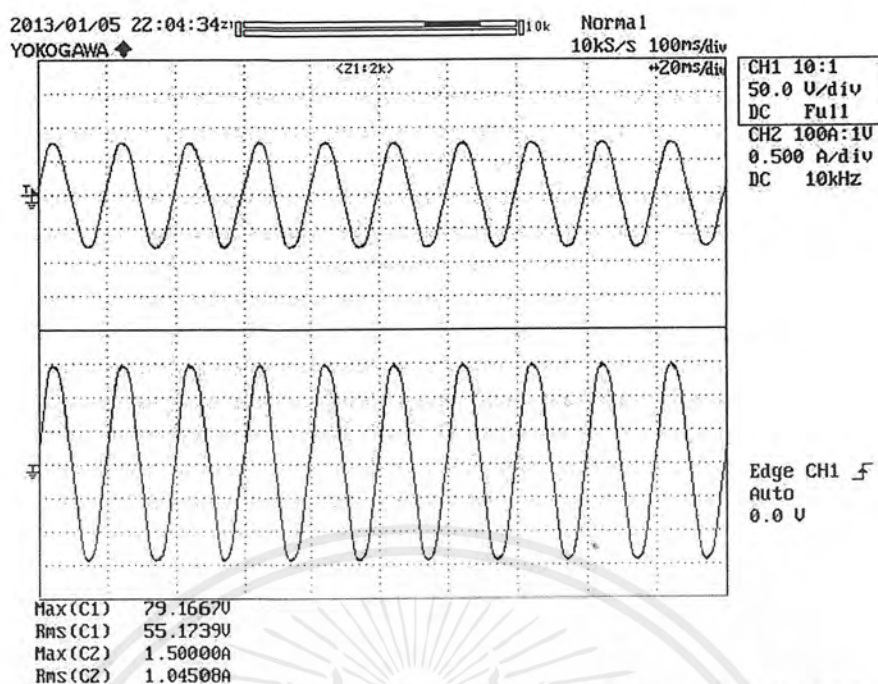


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

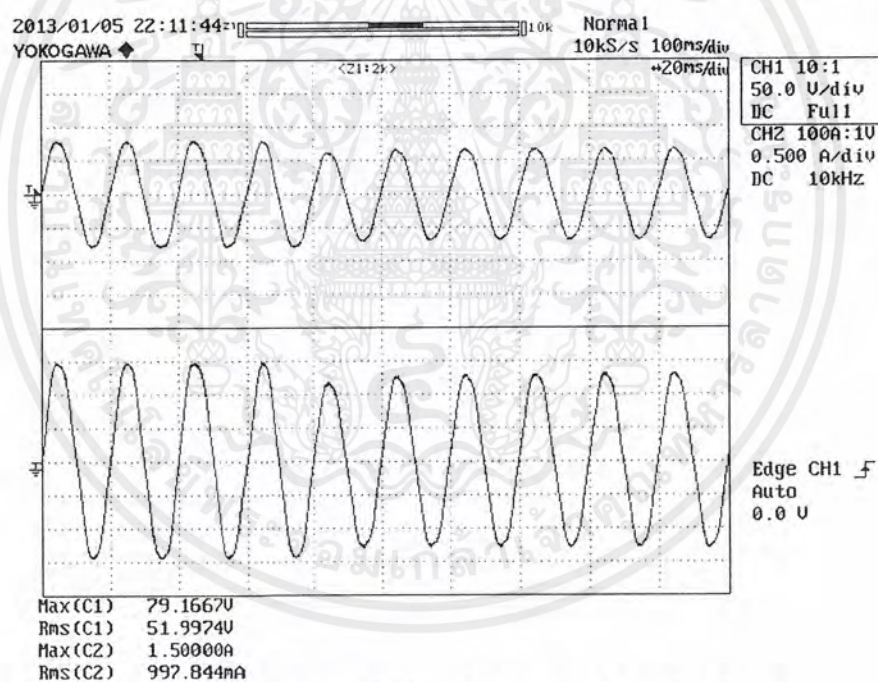


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.23 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 220-352

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

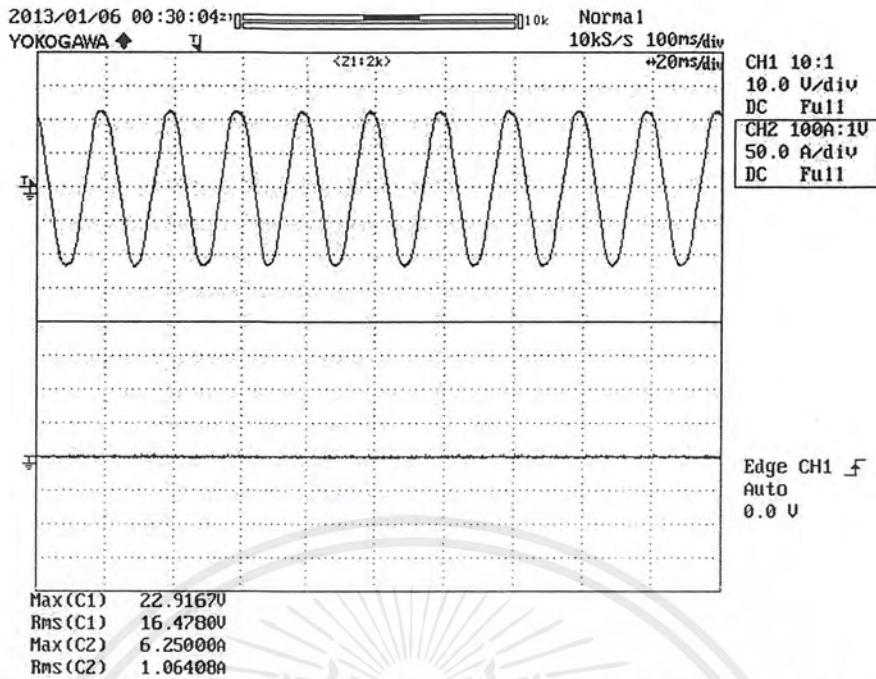


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

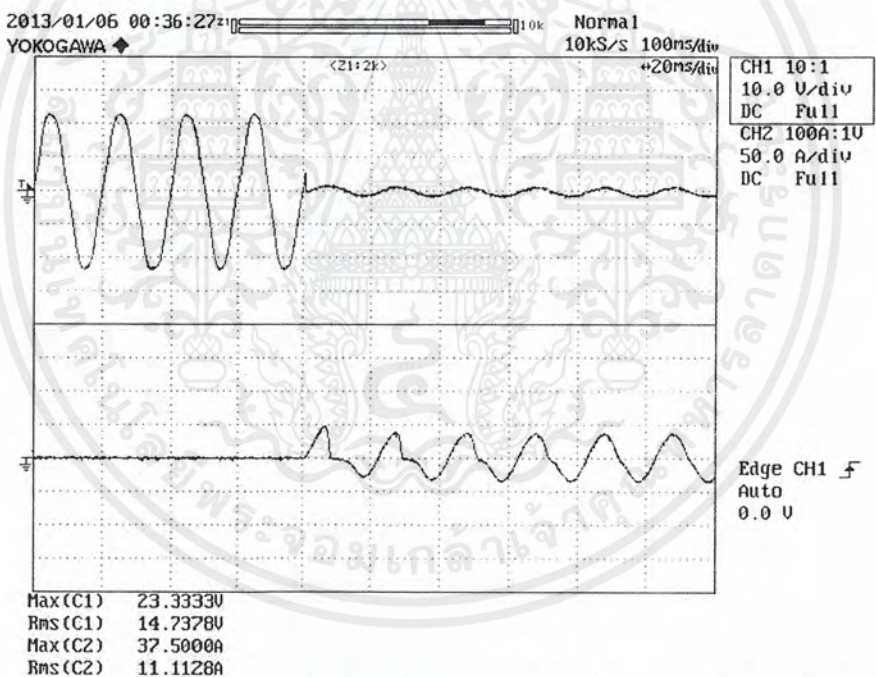


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.23 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซนต์  
ตำแหน่ง 220-352

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

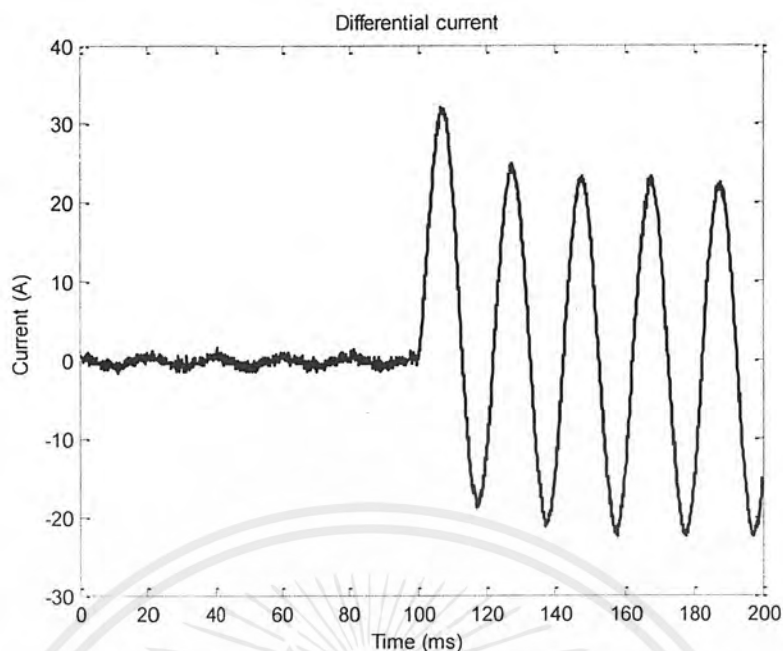


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.23 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซนต์

ตำแหน่ง 220-352

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.23 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 220-352

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.23

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.23 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.13 แอมแปร์ เป็น 24.16 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 28.00 โวลต์ เป็น 25.31 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.23 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.93 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 55.17 โวลต์ เป็น 46.67 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 220-352 ดังรูปที่ 4.23 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

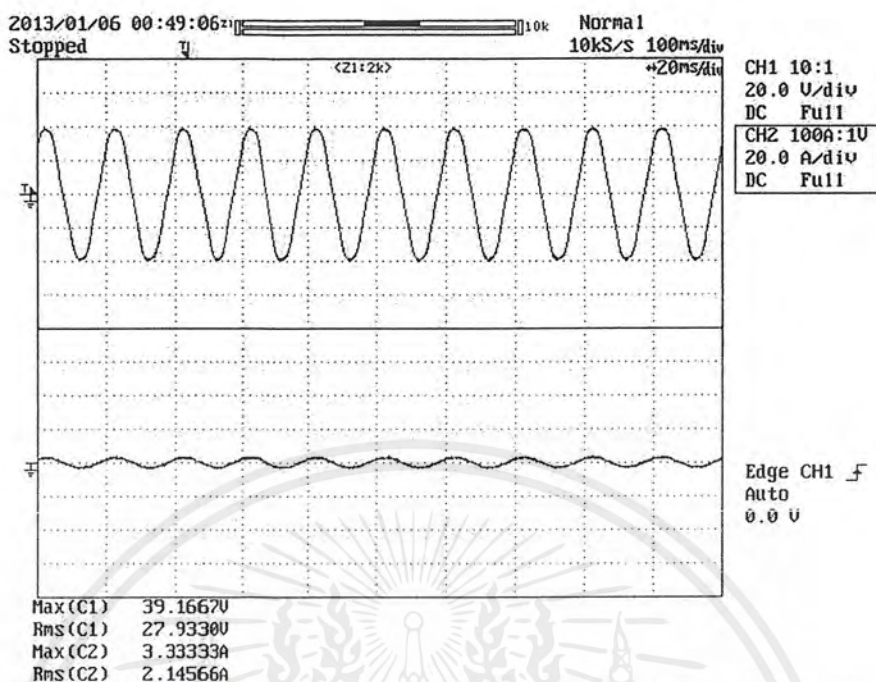
- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 26.52 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 16.47 โวลต์ เป็น 0.92 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.23 (ข)

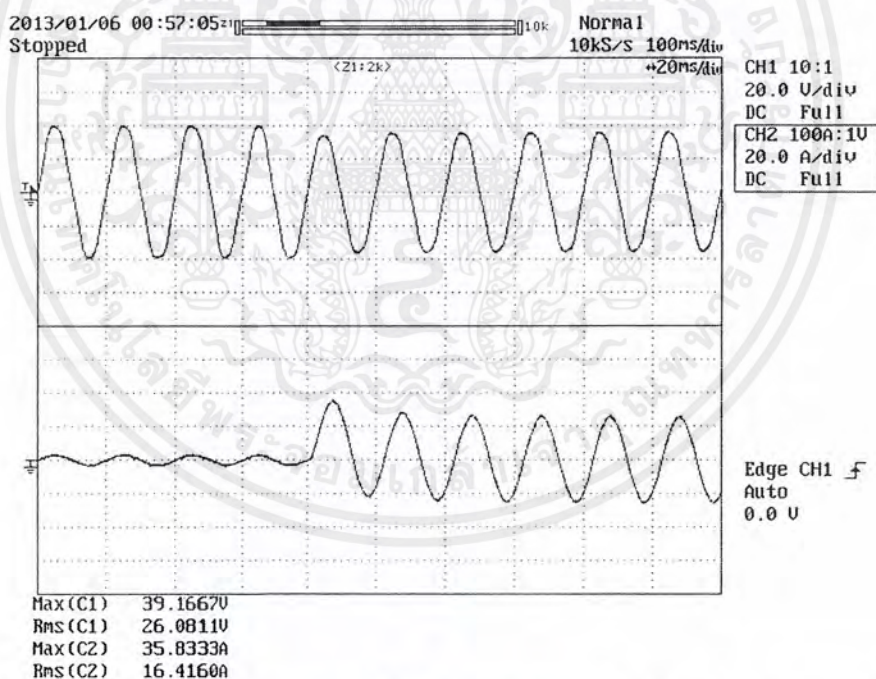
- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.04 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 22.30 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1.3.6 การลัดวงจรระหว่างแท็บขดลวด ตำแหน่ง 264-396



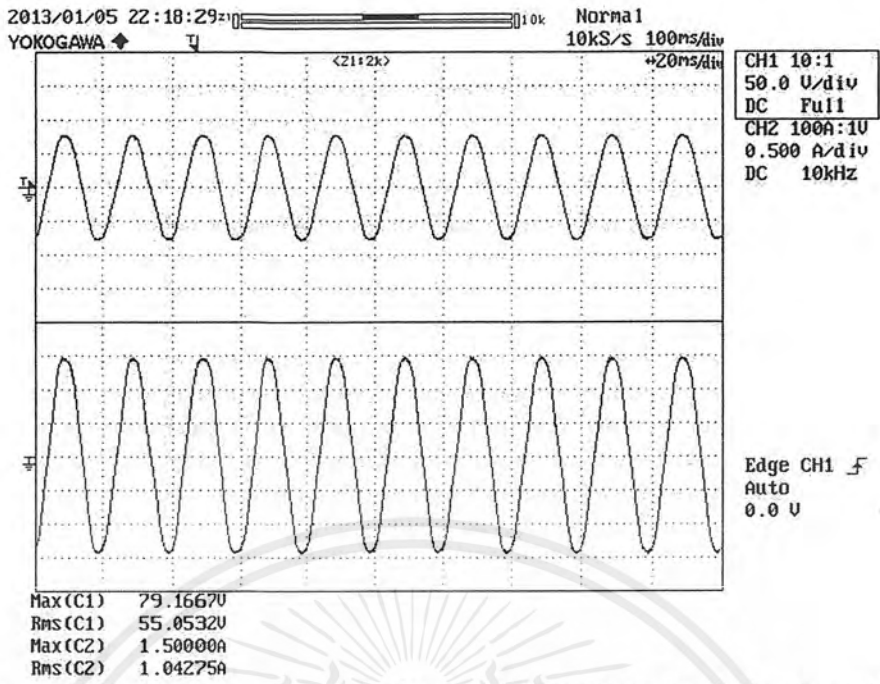
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



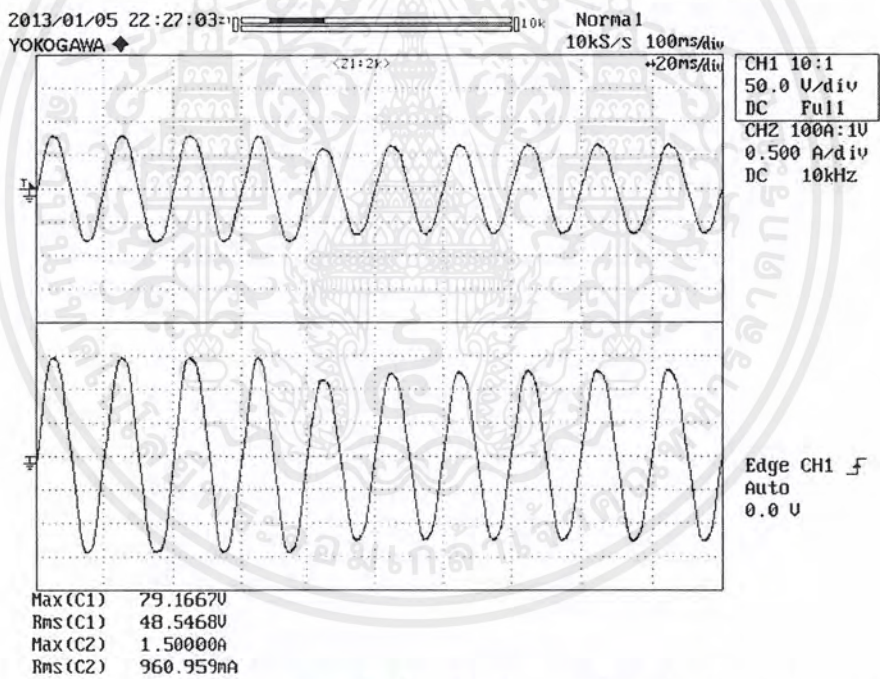
(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.24 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 264-396

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

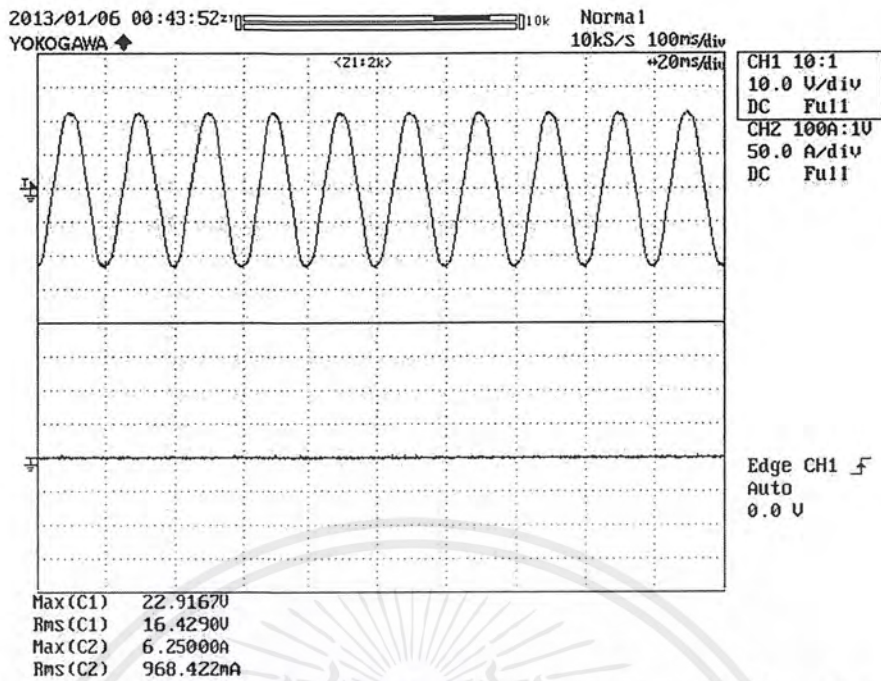


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

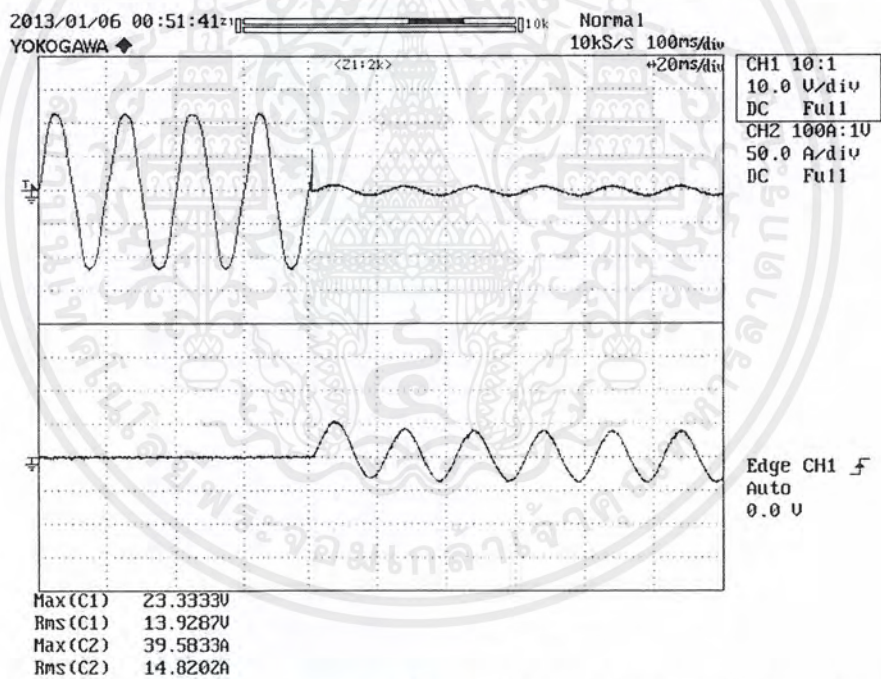


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.24 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 264-396

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

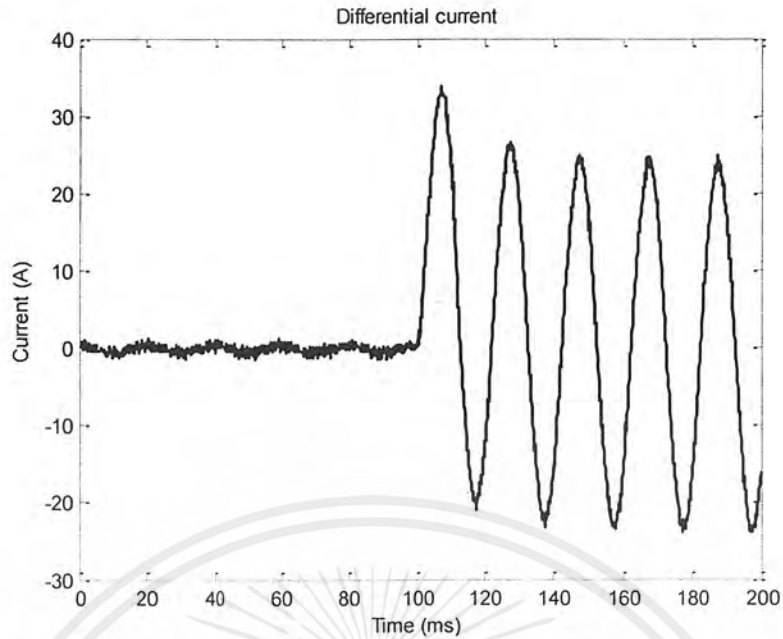


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.24 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 264-396

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.24 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 264-396

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.24

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.24 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.15 แอมแปร์ เป็น 25.34 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 27.93 โวลต์ เป็น 25.31 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.24 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 1.04 แอมแปร์ เป็น 0.91 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 55.05 โวลต์ เป็น 45.61 โวลต์

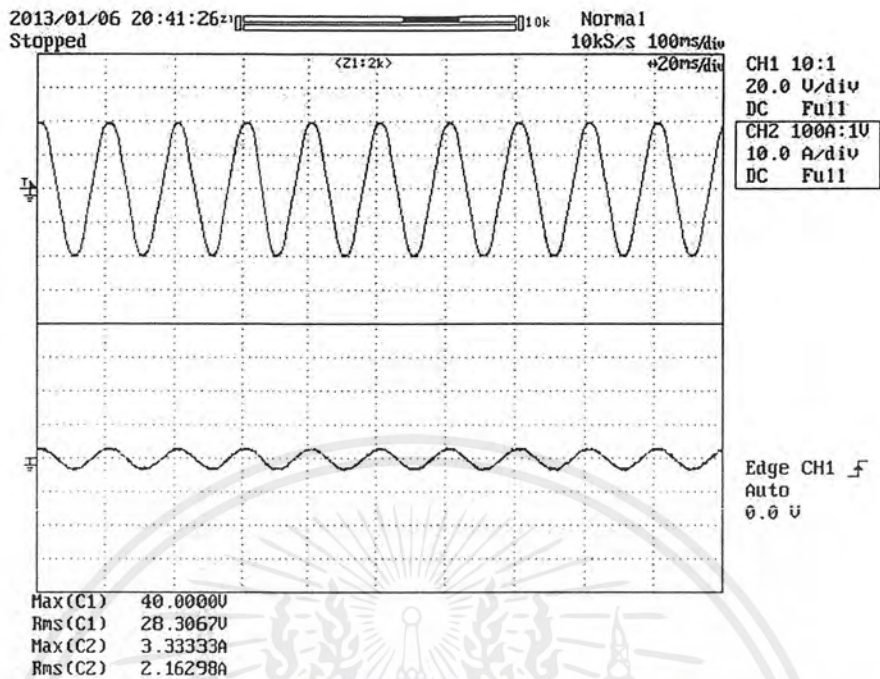
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 264-396 ดังรูปที่ 4.24 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 27.99 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 16.43 โวลต์ เป็น 0.78 โวลต์

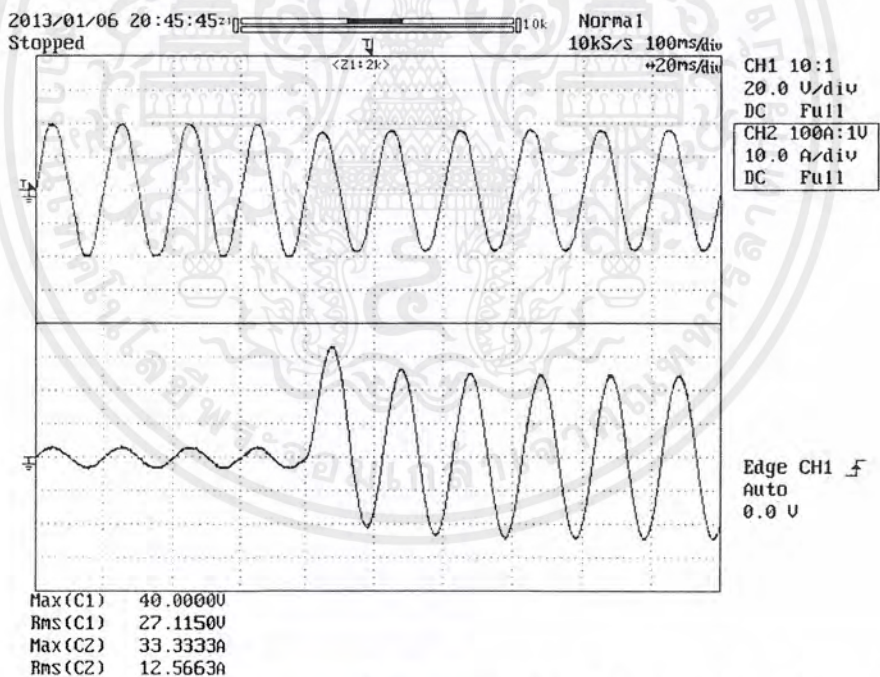
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.24 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.07 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 23.52 แอมแปร์

## 4.1.3.7 การลัดวงจรระหว่างแท็บขดลวด ตำแหน่ง 308-440

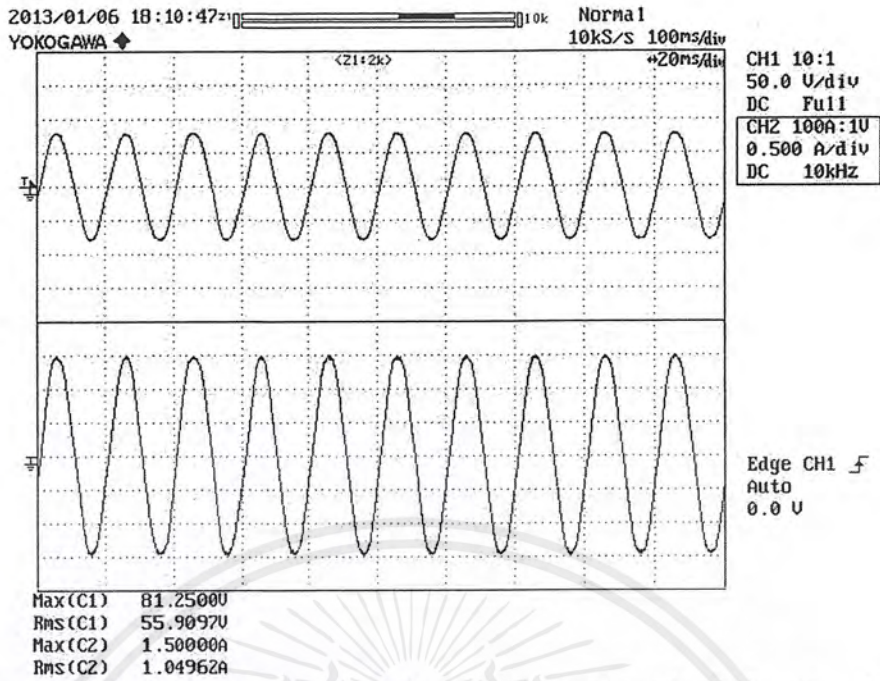


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

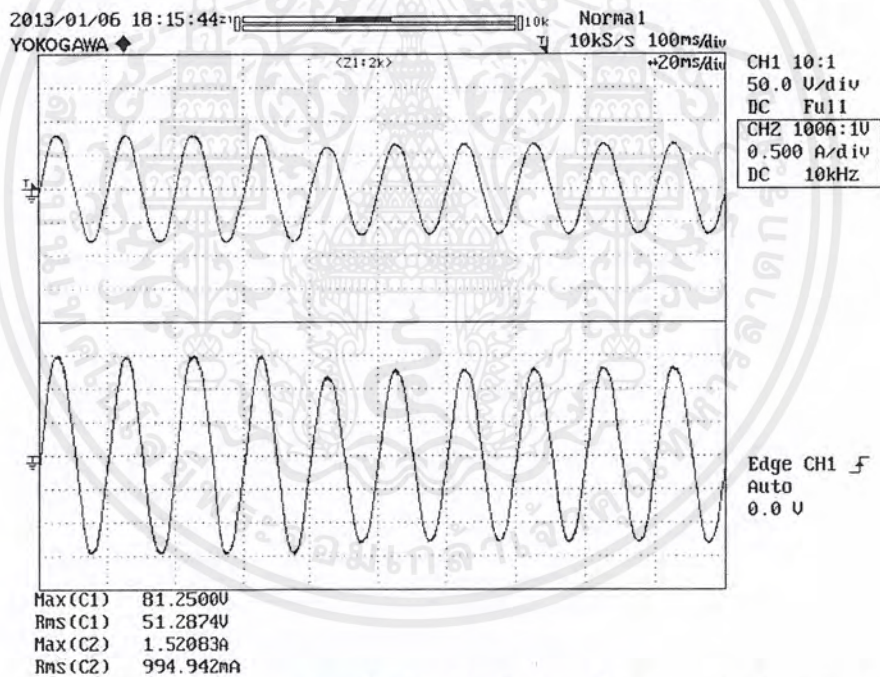


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.25 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 308-440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

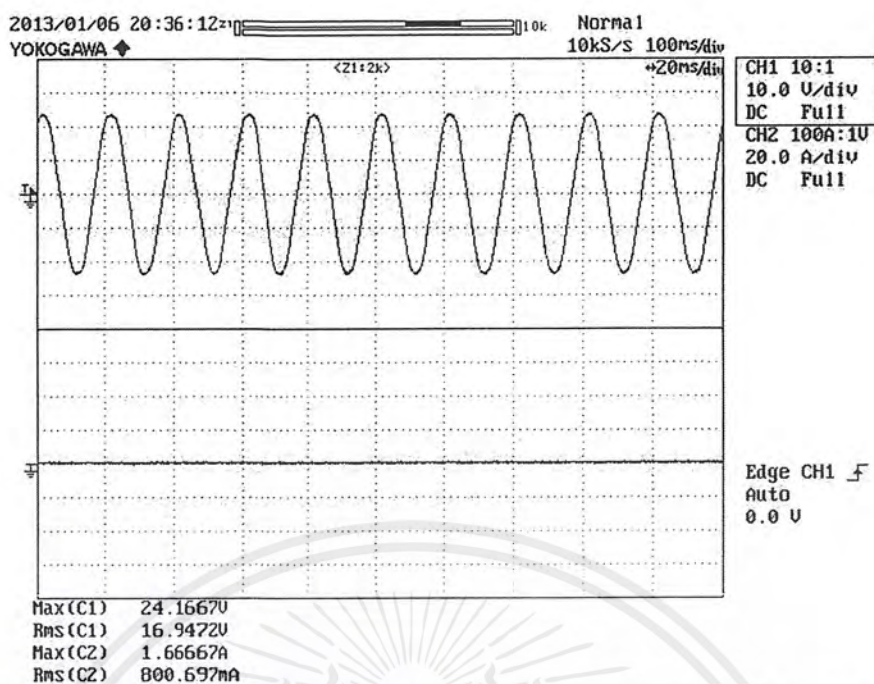


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

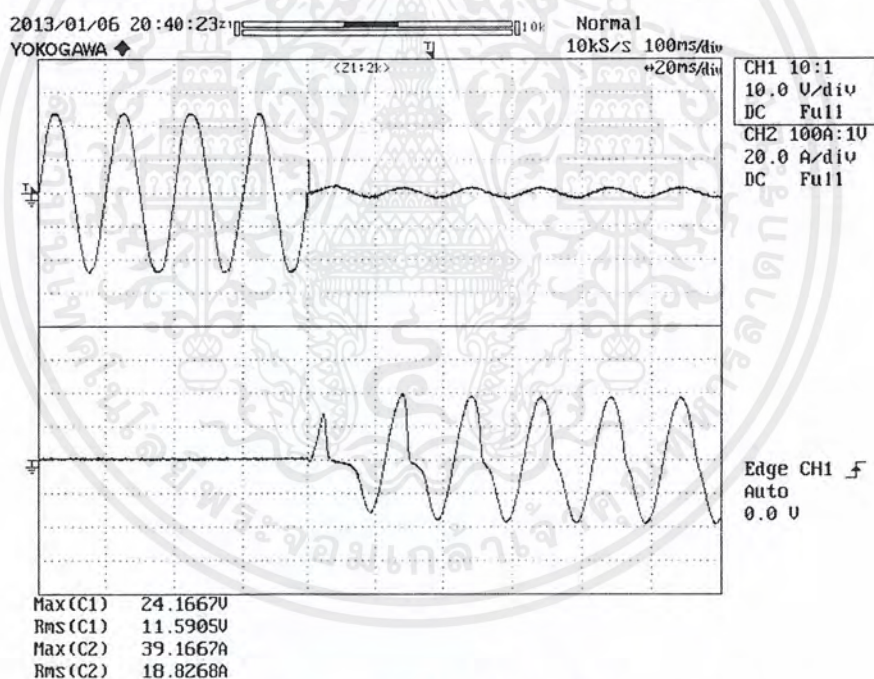


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.25 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซนต์  
ตำแหน่ง 308-440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

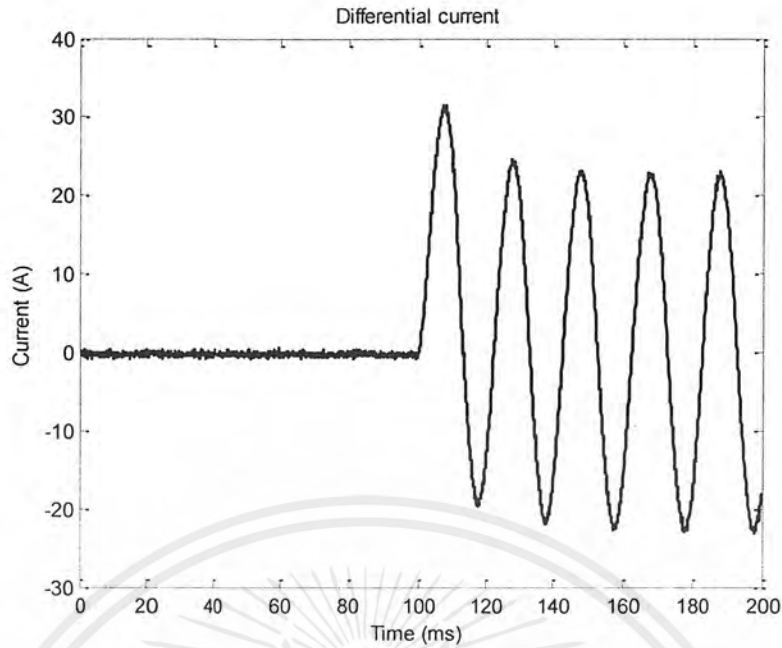


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.25 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 308-440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.25 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 308-440

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.25

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.25 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.16 แอมแปร์ เป็น 23.57 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามามีค่าลดลงจาก 28.31 โวลต์ เป็น 25.88 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโวลต์จากรูปที่ 4.25 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามามีค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.93 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามามีค่าลดลงจาก 55.91 โวลต์ เป็น 48.44 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 308-440 ดังรูปที่ 4.25 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 27.69 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามามีค่าลดลงจาก 16.95 โวลต์ เป็น 1.48 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.25 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.06 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 21.71 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V แทบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์

แท็บ ขดลวด	ระดับ แรงดัน หม้อแปลง	โหมด	มม	ปฐมภูมิ				ทุติยภูมิ				ลัดวงจร				กระแสผลต่าง	
				ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน	หลัง
				แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส				
44-176	0		0	28.19	2.17	25.60	25.34	กระแส	0.92	16.57	0	1.06	27.99	0.07	23.50		
88-220	0		0	28.16	2.15	25.46	23.57	กระแส	0.92	16.55	0	1.06	26.52	0.05	21.73		
132-264	0		0	28.18	2.16	23.05	40.07	กระแส	0.78	16.58	0	1.63	55.97	0.06	38.51		
176-308	0	156 W	0	28.17	2.14	23.05	39.48	กระแส	0.78	16.57	0	1.98	55.97	0.04	37.92		
220-352	0		0	28.00	2.14	25.31	24.16	กระแส	0.93	16.47	0	0.92	26.52	0.04	22.30		
264-396	0		0	27.93	2.15	25.31	25.34	กระแส	0.91	16.43	0	0.78	27.99	0.07	23.52		
308-440	0		0	28.31	2.16	25.88	23.57	กระแส	0.93	16.95	0	1.48	27.69	0.06	21.71		

จากการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V แทบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองก่อน และหลังการลัดวงจร พบว่า

ทางด้านปฐมภูมิ แรงดันไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร กระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งแทบขดลวด โดยที่แทบขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

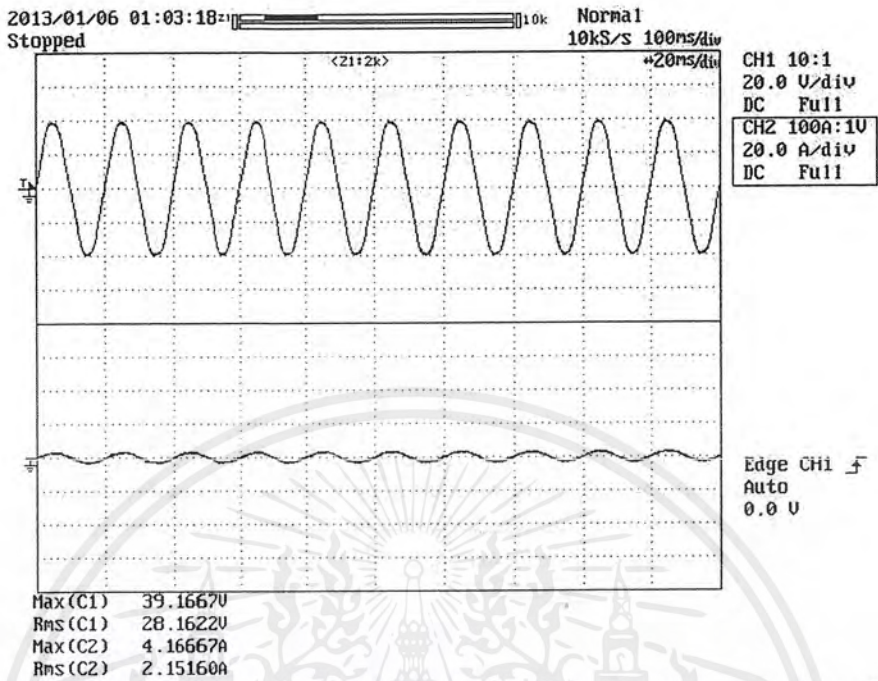
ทางด้านทุติยภูมิ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งแทบขดลวด โดยที่แทบขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

ทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจร แนวโน้มพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า คล้ายกับทางด้านปฐมภูมิ แต่ค่าแอมพลิจูดของแรงดันต่ำกว่า ค่าแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรสูงกว่า

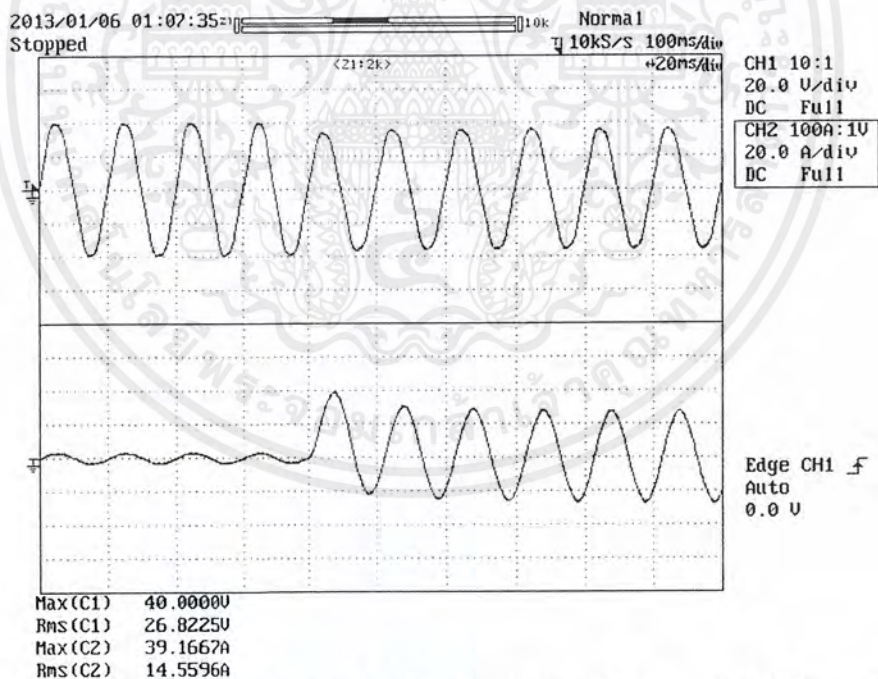
เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งแทบขดลวด โดยที่แทบขดลวดแรงดันต่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า กระแสผลต่างมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

4.1.4 กรณีแทบขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์

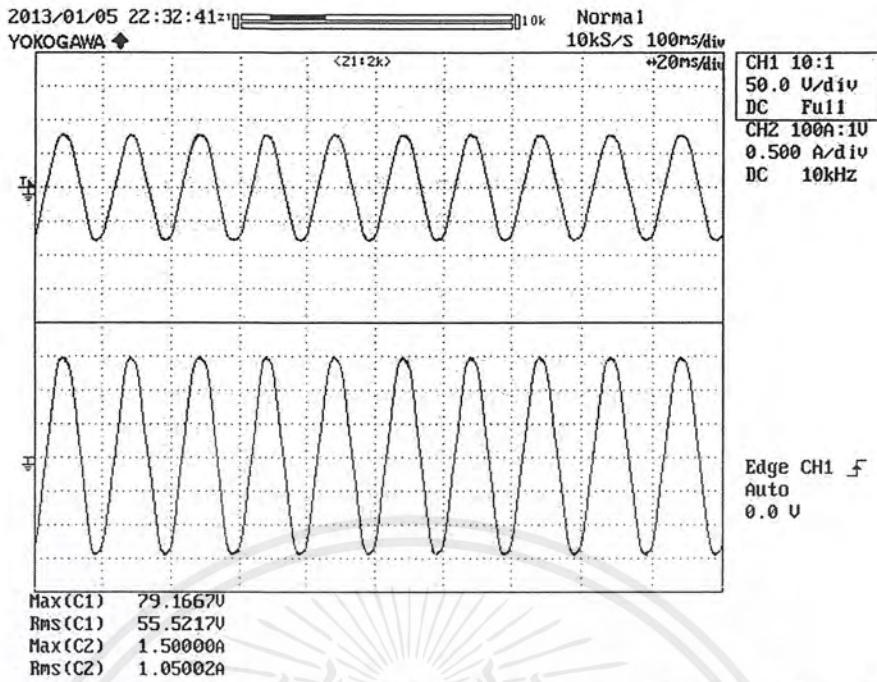
4.1.4.1 การลัดวงจรระหว่างแทบขดลวด ตำแหน่ง 44-220



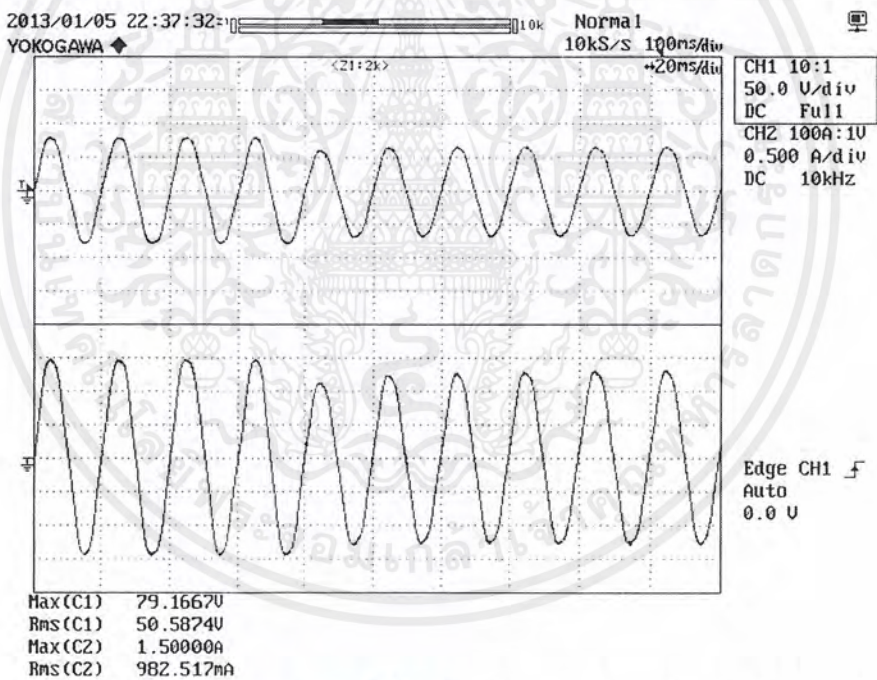
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.26 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-220



(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

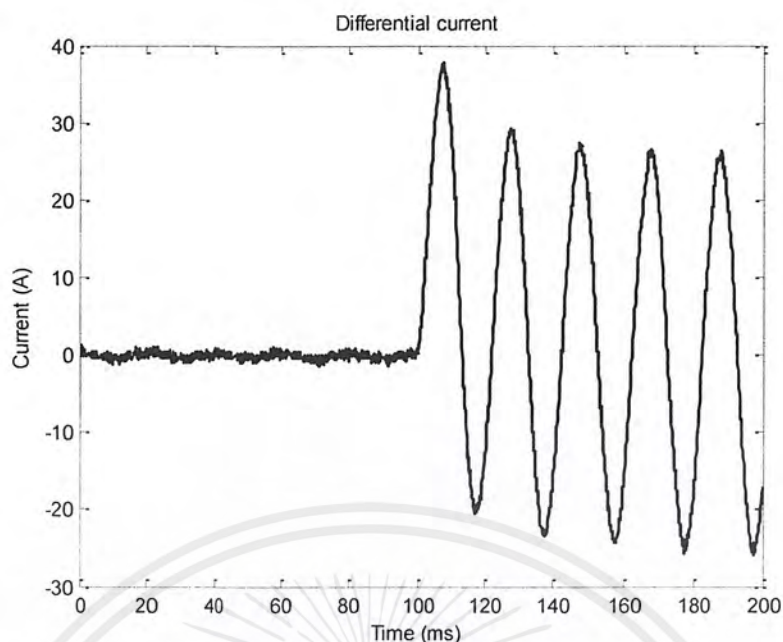


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.26 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 44-220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.26 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-220

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.26

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.26 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.15 แอมแปร์ เป็น 27.70 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามามีค่าลดลงจาก 28.16 โวลต์ เป็น 25.46 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.26 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามามีค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.91 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามามีค่าลดลงจาก 55.52 โวลต์ เป็น 45.61 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนของลัดวงจรที่ตำแหน่ง 44-220 ดังรูปที่ 4.26 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

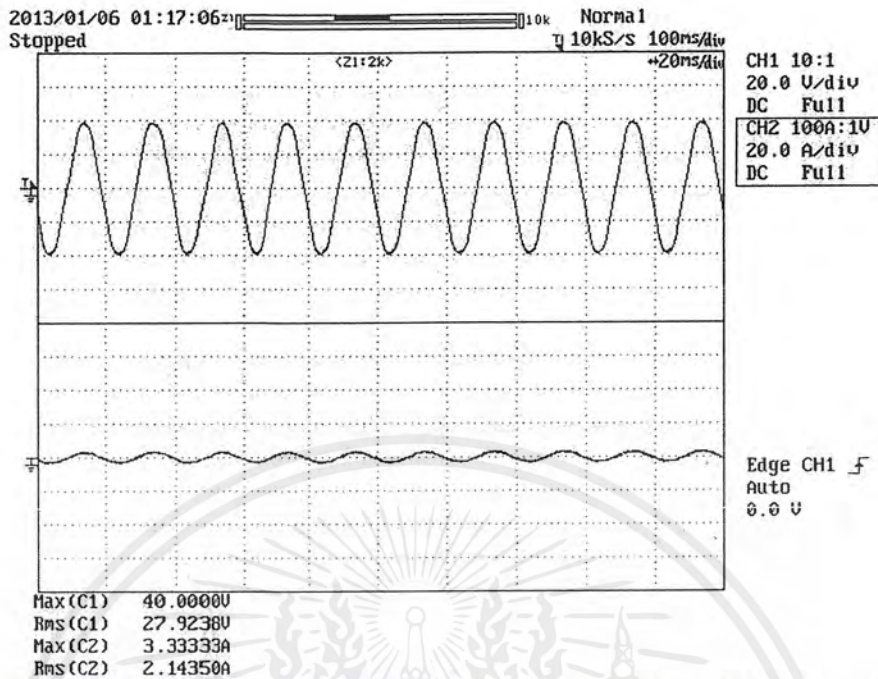
- ค่ากระแสไฟฟ้ามามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 22.10 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามามีค่าลดลงจาก 22.00 โวลต์ เป็น 0.78 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.26 (ซ)

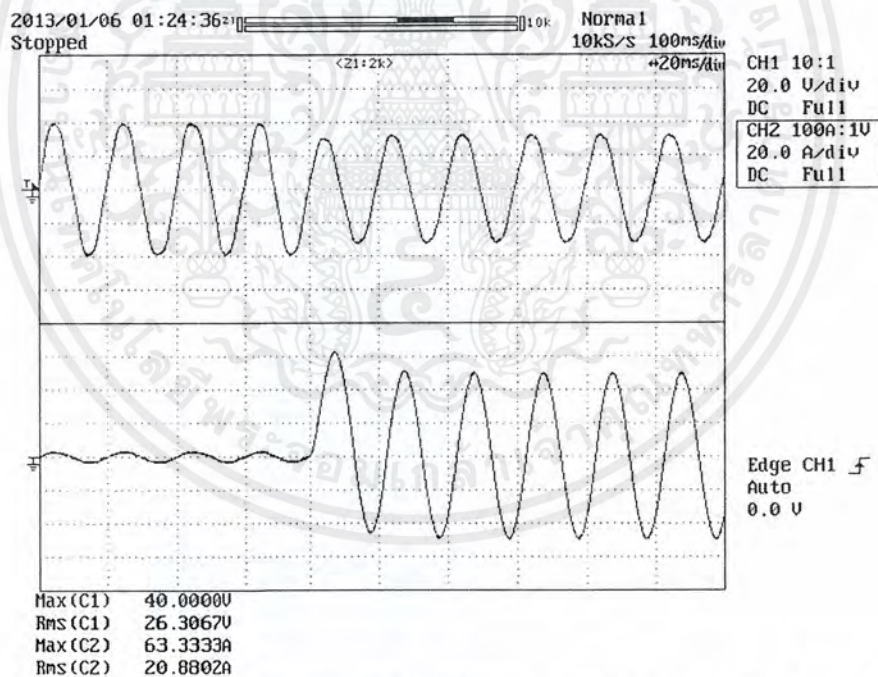
- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.05 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 25.88 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1.4.2 การลัดวงจรระหว่างแท็บขดลวด ตำแหน่ง 88-264

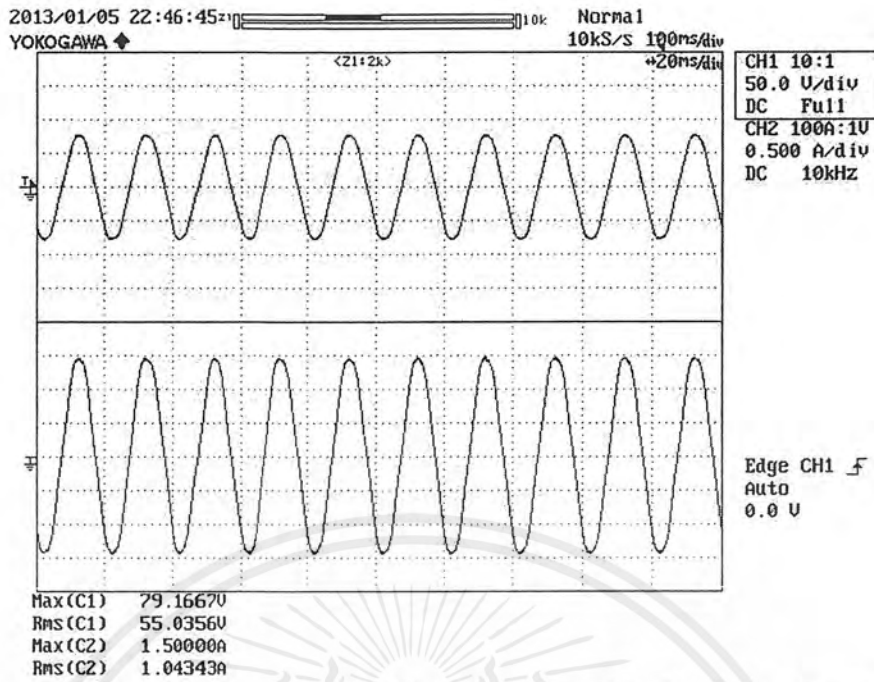


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

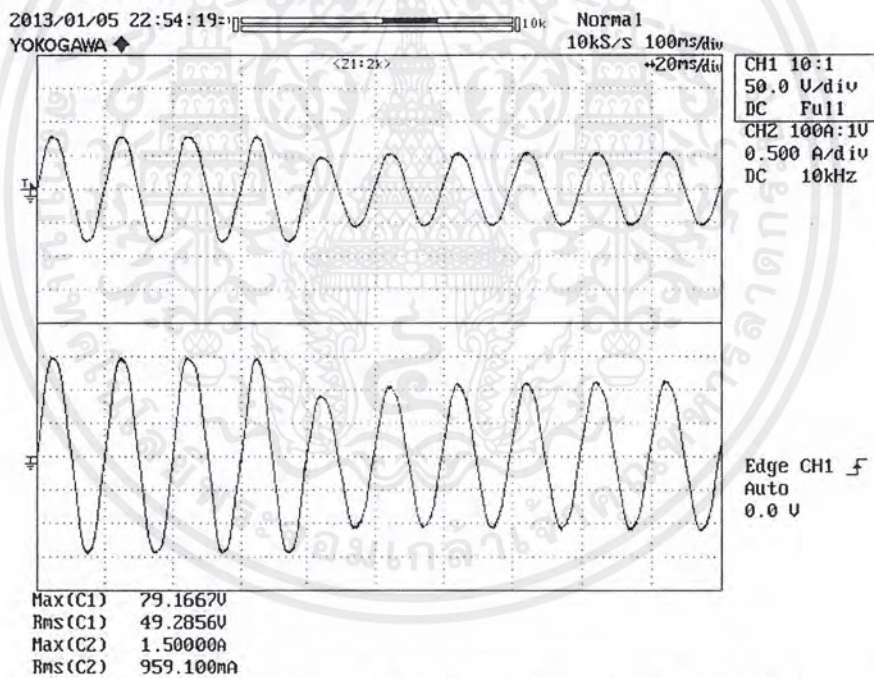


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.27 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 88-264

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



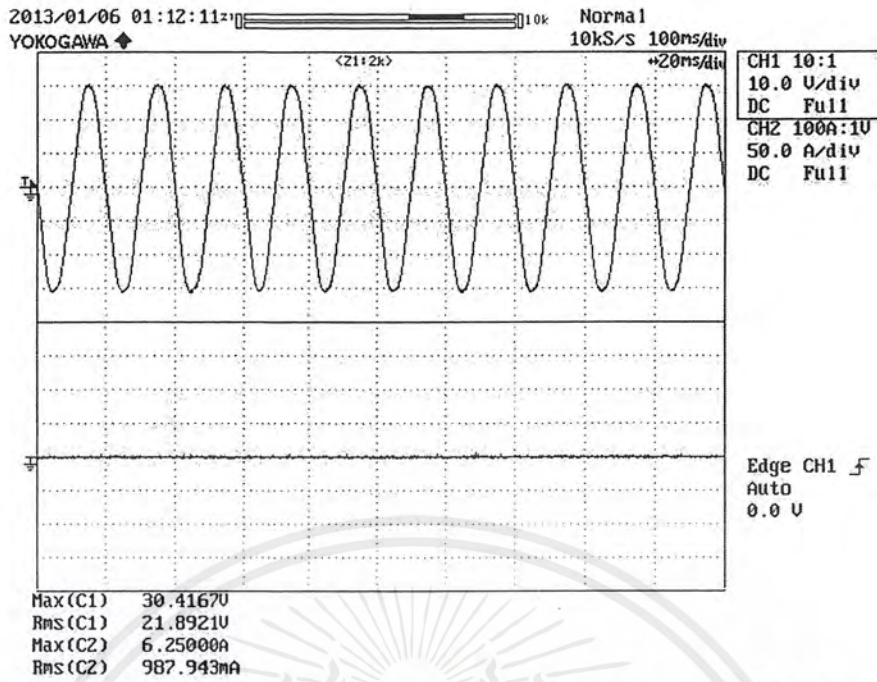
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



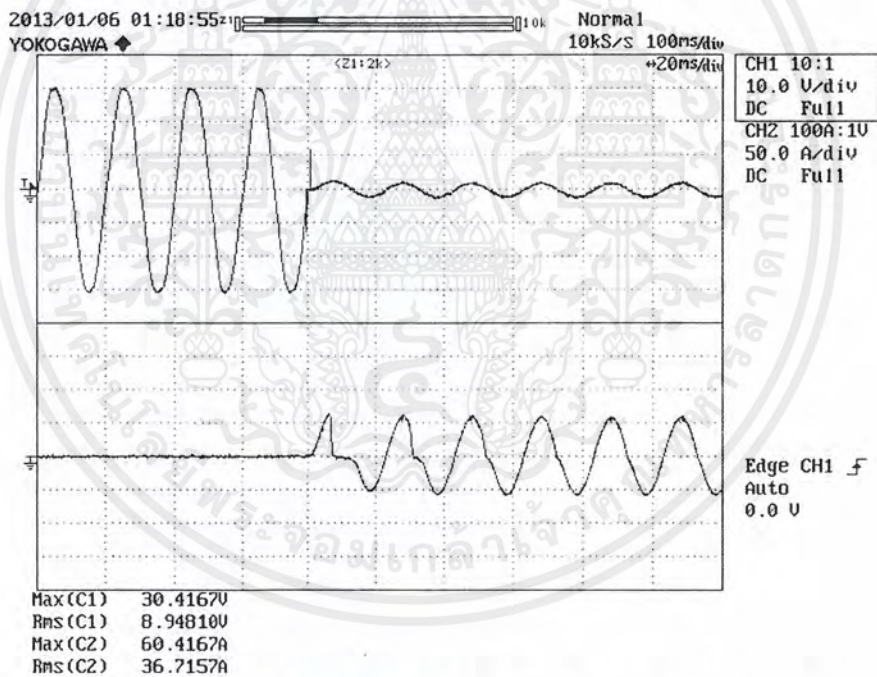
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.27 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 88-264

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

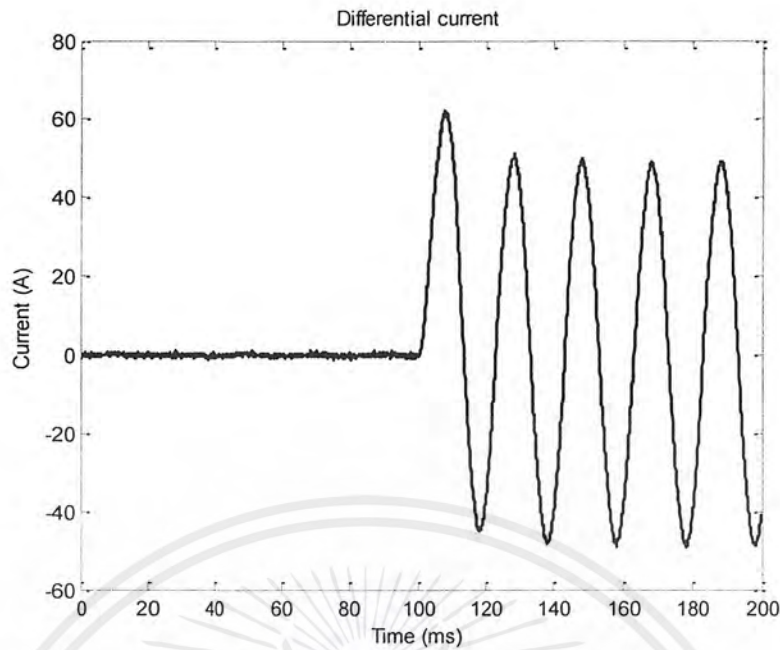


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.27 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 88-264

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.27 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 88-264

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.27

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.27 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามียค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.14 แอมแปร์ เป็น 44.78 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามียค่าลดลงจาก 27.92 โวลต์ เป็น 22.77 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.27 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามียค่าลดลงจาก 1.04 แอมแปร์ เป็น 0.79 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามียค่าลดลงจาก 55.04 โวลต์ เป็น 38.89 โวลต์

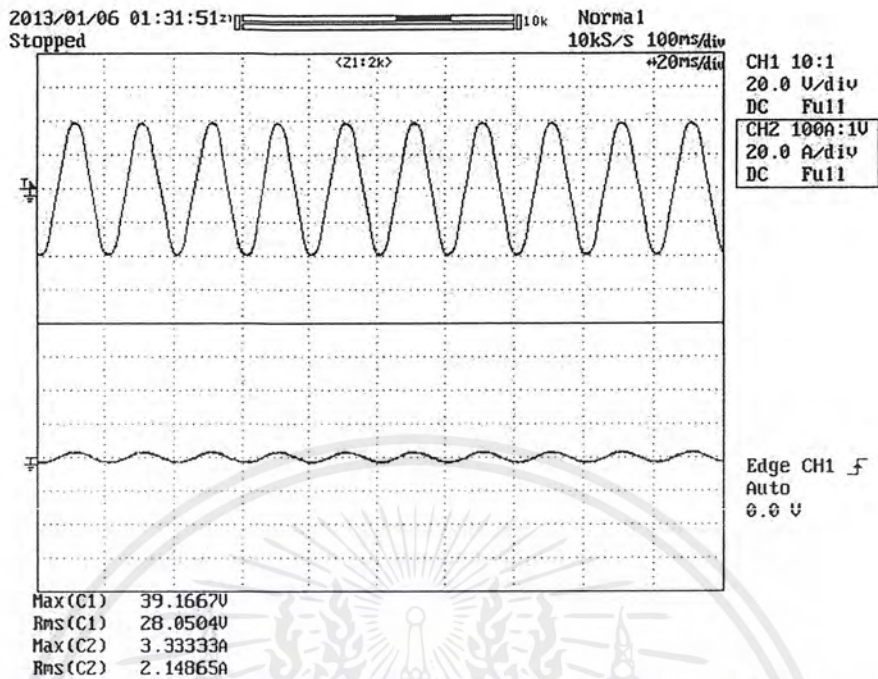
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 88-264 ดังรูปที่ 4.27 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามียค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 42.72 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามียค่าลดลงจาก 21.89 โวลต์ เป็น 1.56 โวลต์

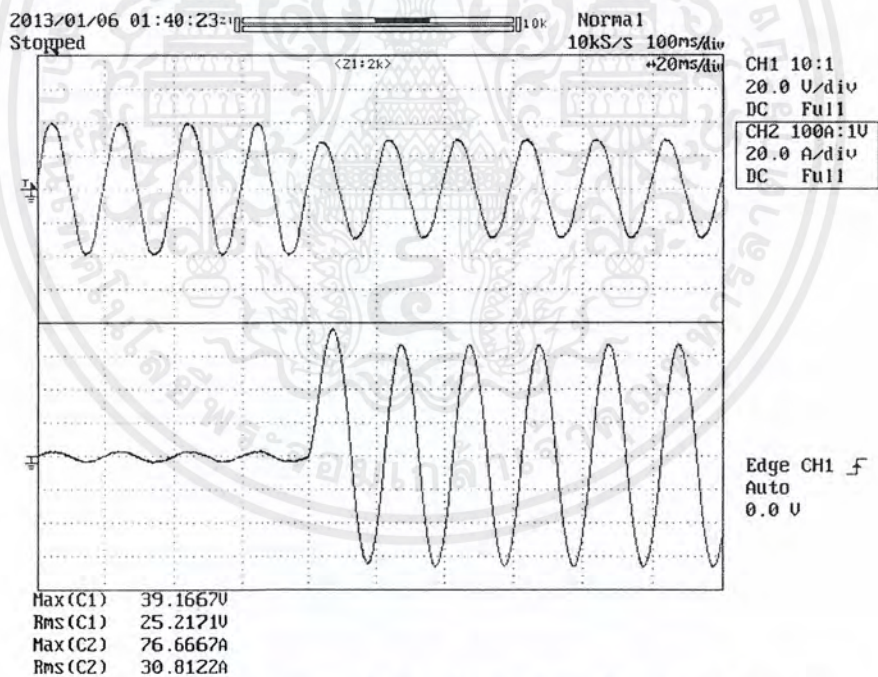
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.27 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.06 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 43.20 แอมแปร์

## 4.1.4.3 การลัดวงจรระหว่างแท็บขดลวด ตำแหน่ง 132-308

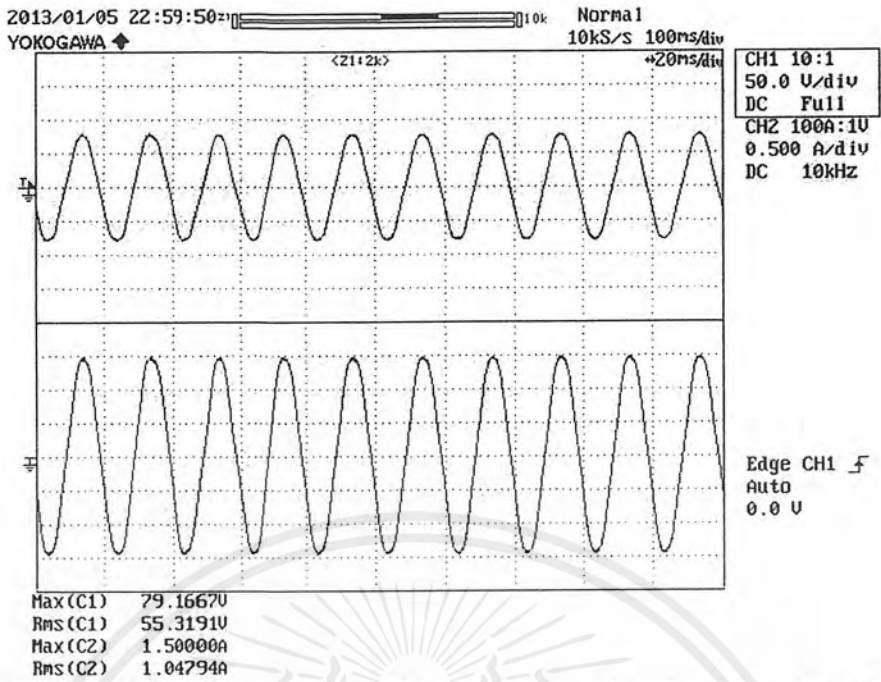


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

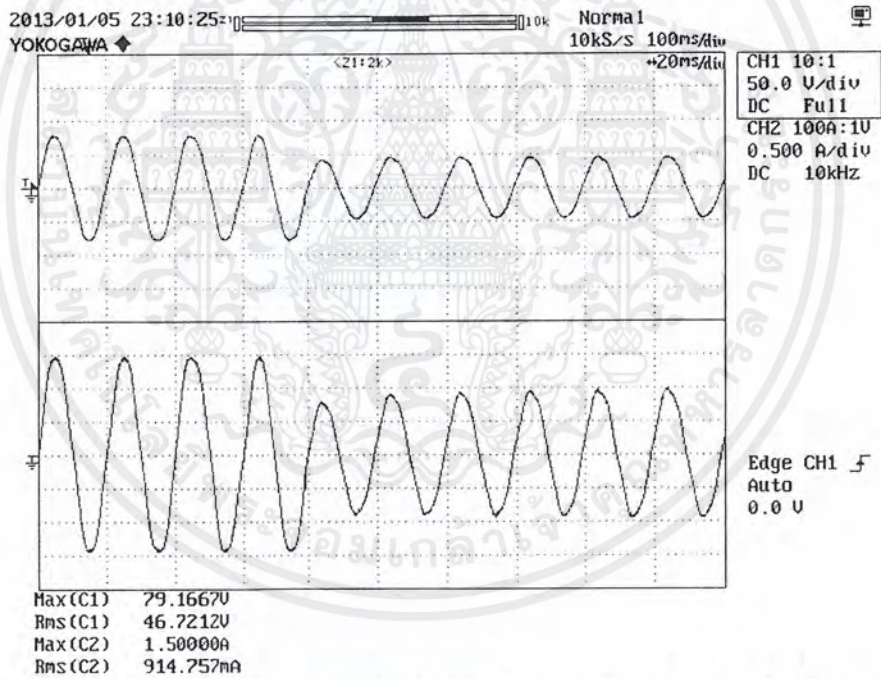


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.28 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 132-308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

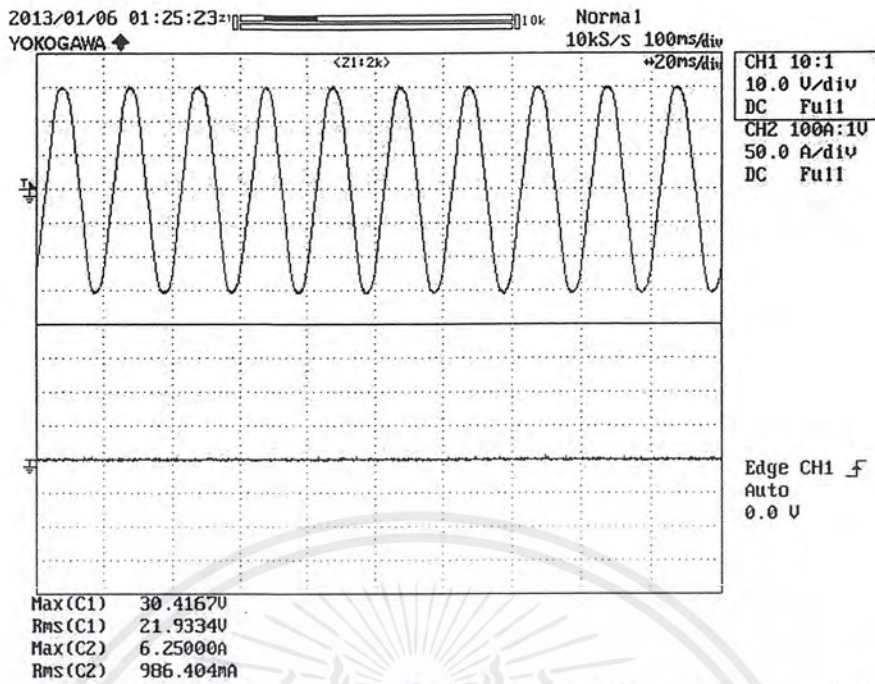


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

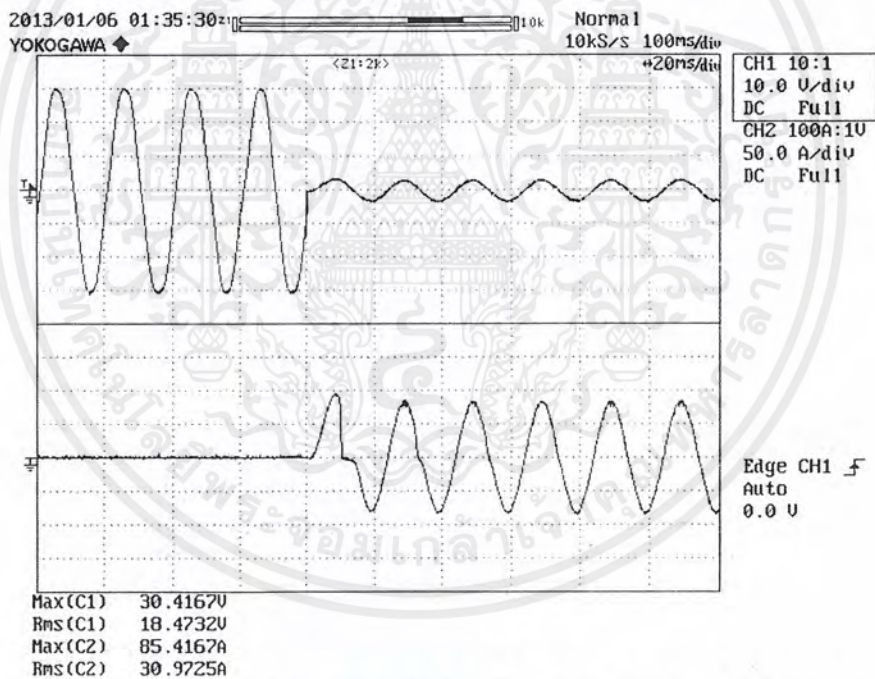


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.28 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 132-308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

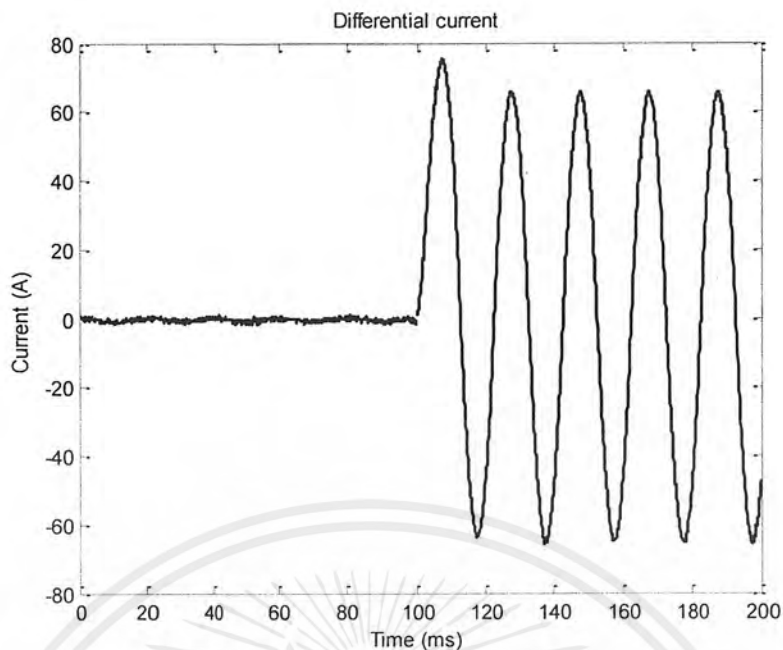


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.28 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 132-308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.28 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 132-308

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.28

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.28 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.15 แอมแปร์ เป็น 54.21 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.05 โวลต์ เป็น 20.93 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.28 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.67 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.32 โวลต์ เป็น 33.94 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 132-308 ดังรูปที่ 4.28 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

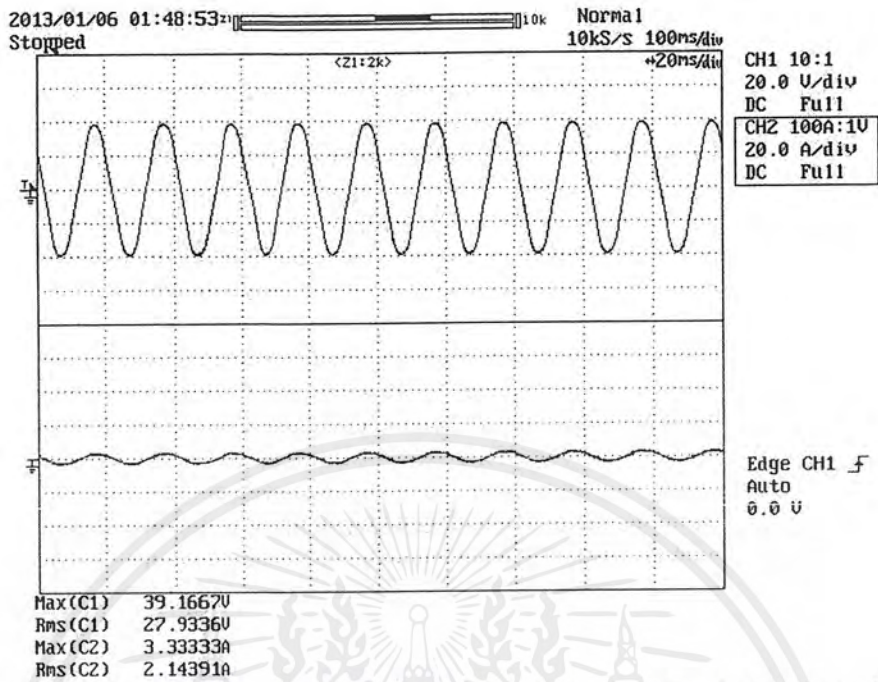
- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 60.39 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 21.93 โวลต์ เป็น 1.98 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.28 (ข)

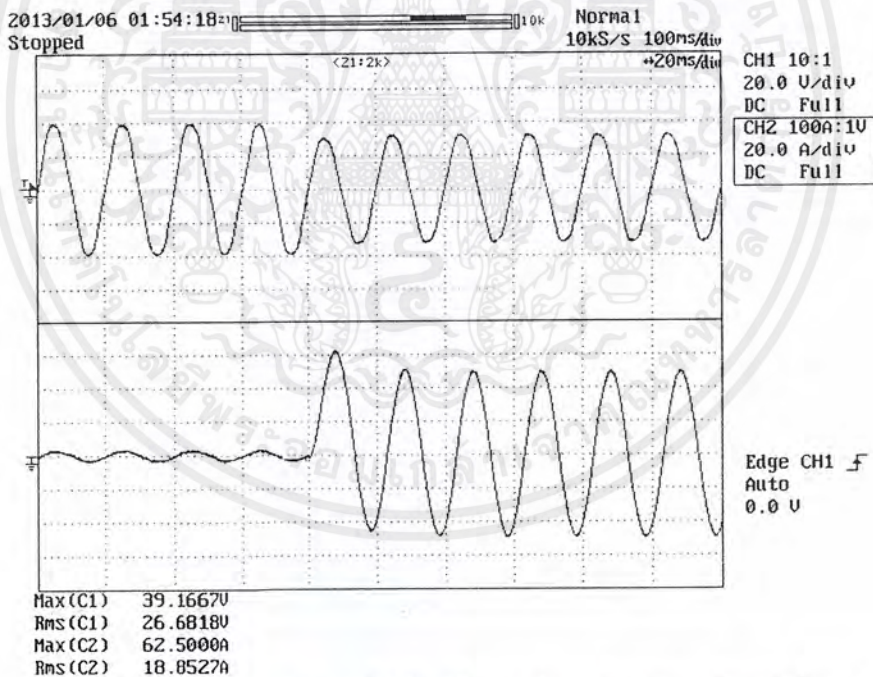
- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.05 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 52.87 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

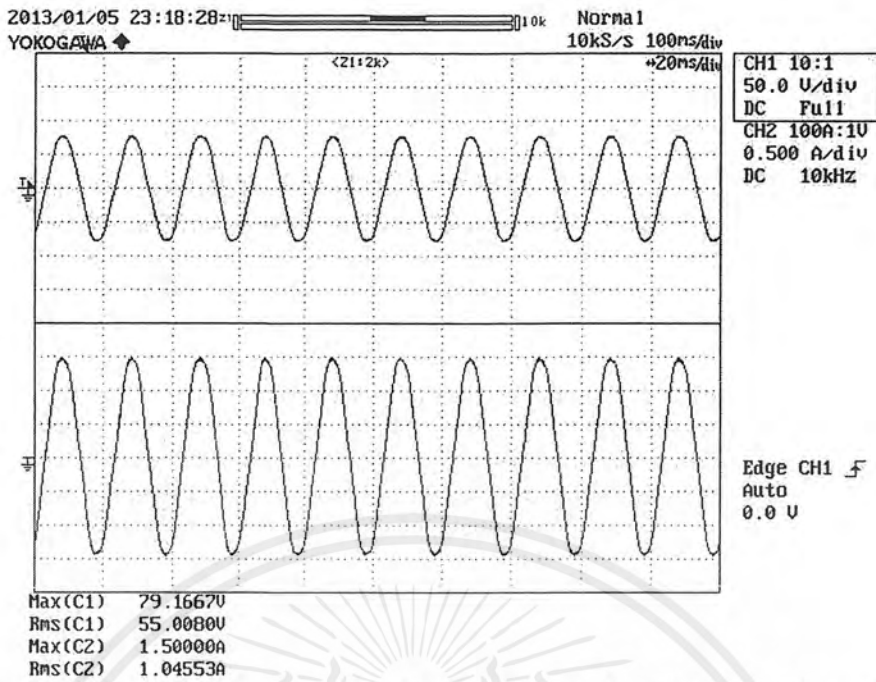
## 4.1.4.4 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 176-352



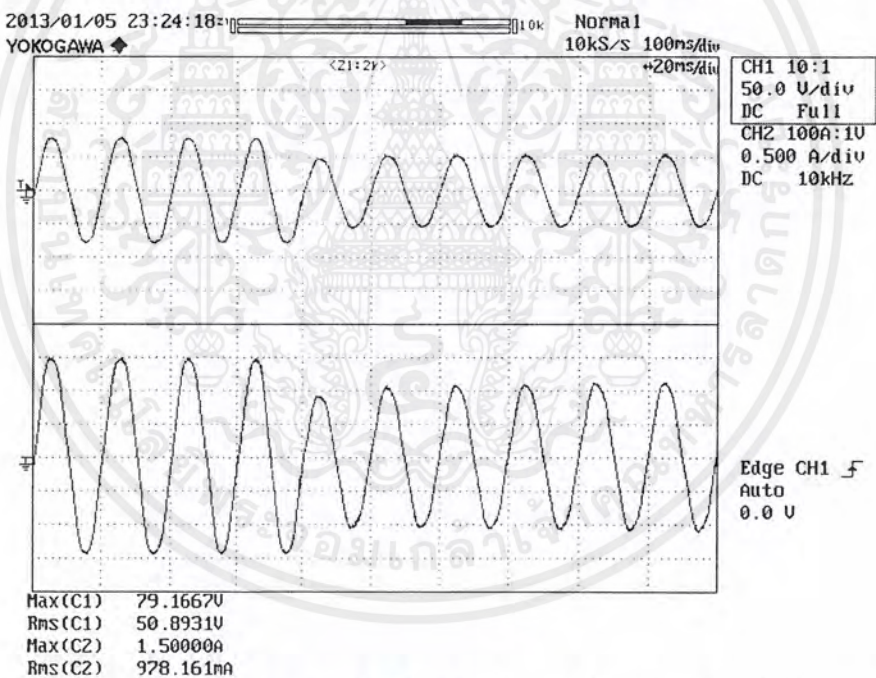
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.29 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 176-352



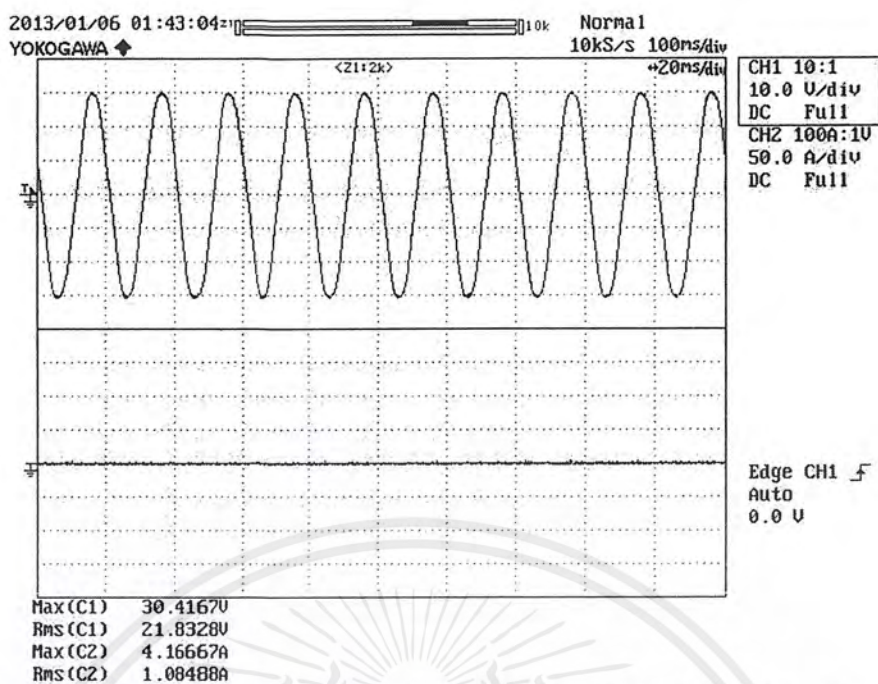
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



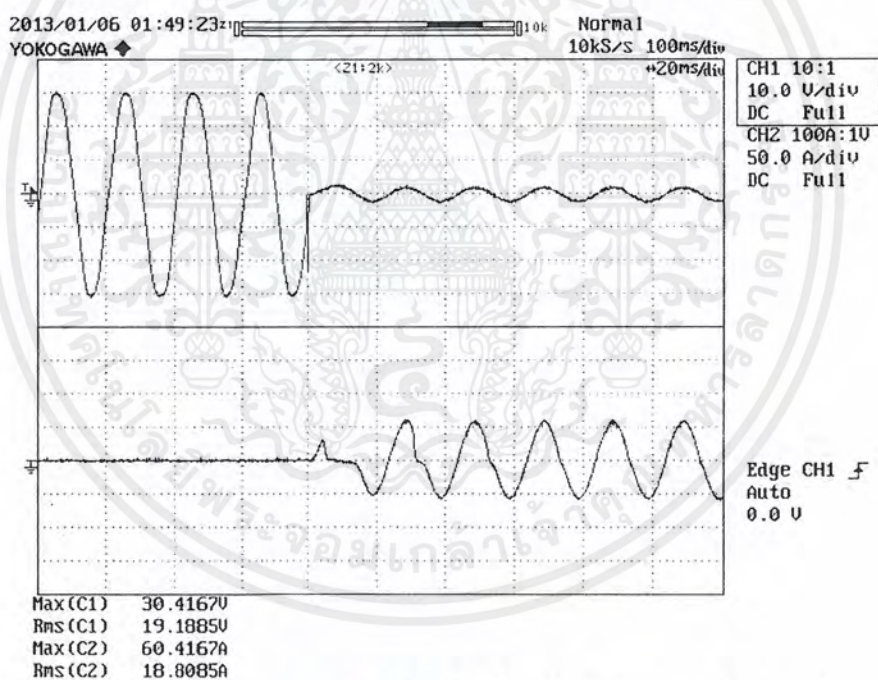
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.29 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 176-352

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

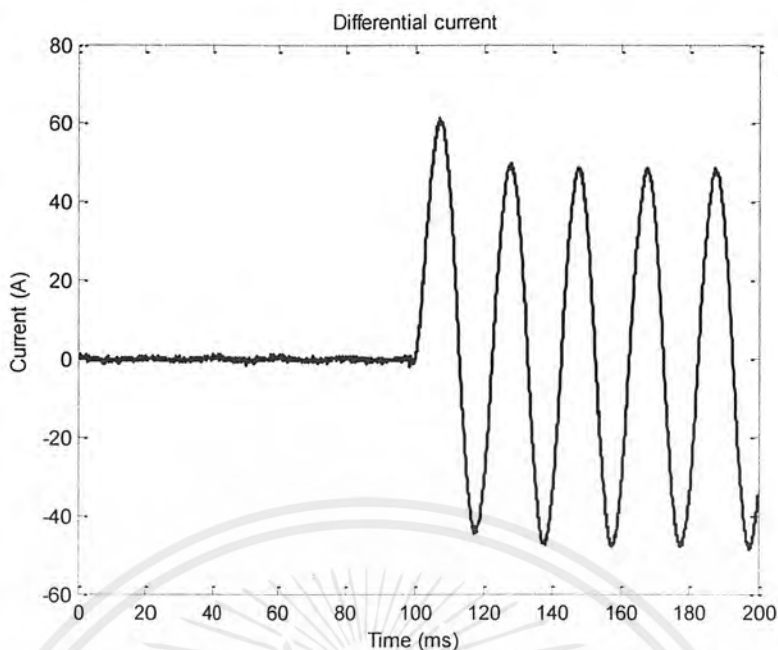


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.29 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 176-352

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.29 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 176-352

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.29

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.29 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.14 แอมแปร์ เป็น 44.19 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 27.93 โวลต์ เป็น 22.91 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.29 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.79 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 55.01 โวลต์ เป็น 37.83 โวลต์

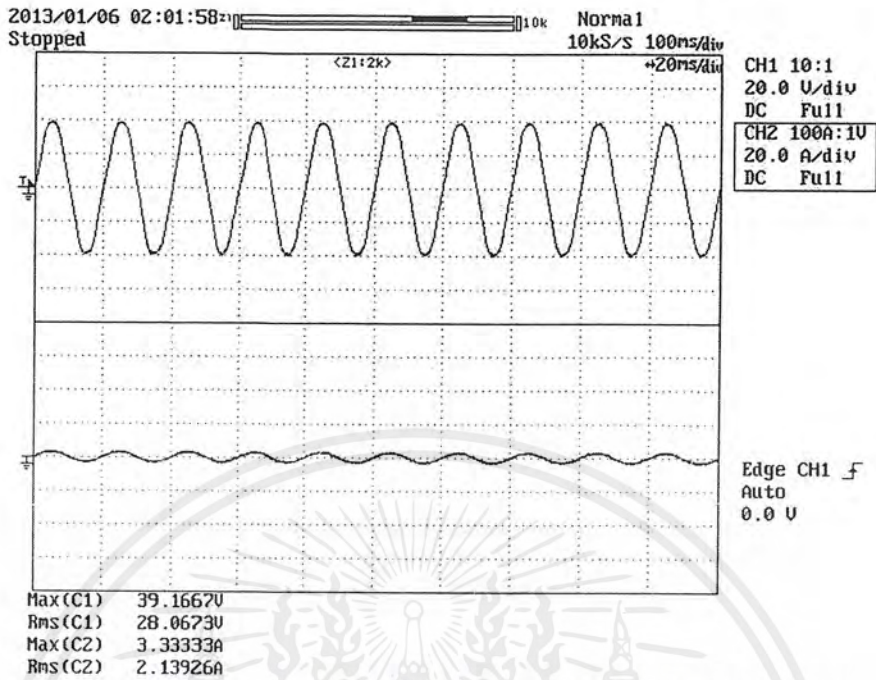
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 176-352 ดังรูปที่ 4.29 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 42.72 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 21.83 โวลต์ เป็น 1.41 โวลต์

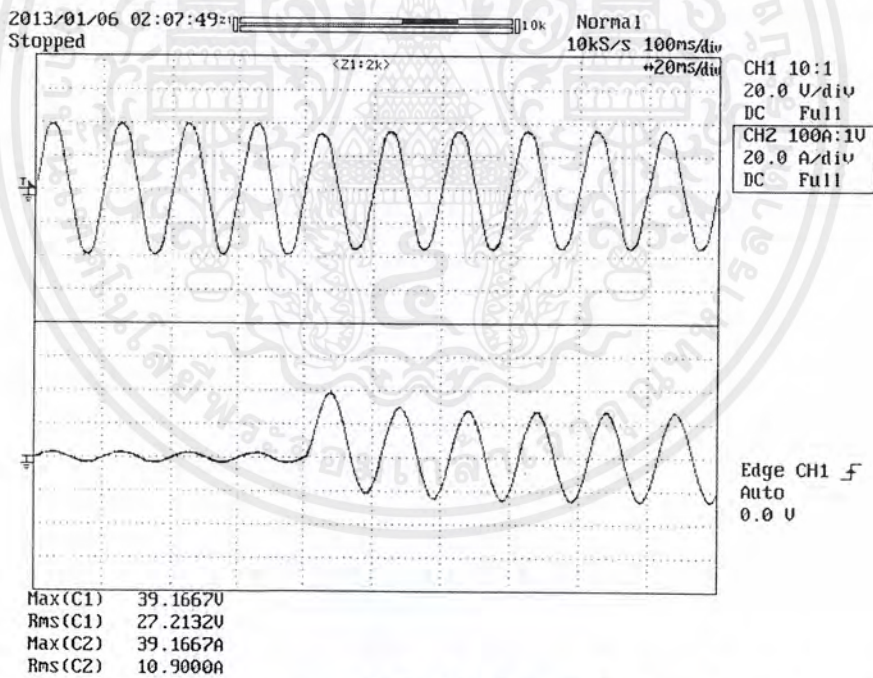
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.29 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.04 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 42.61 แอมแปร์

## 4.1.4.5 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 220-396

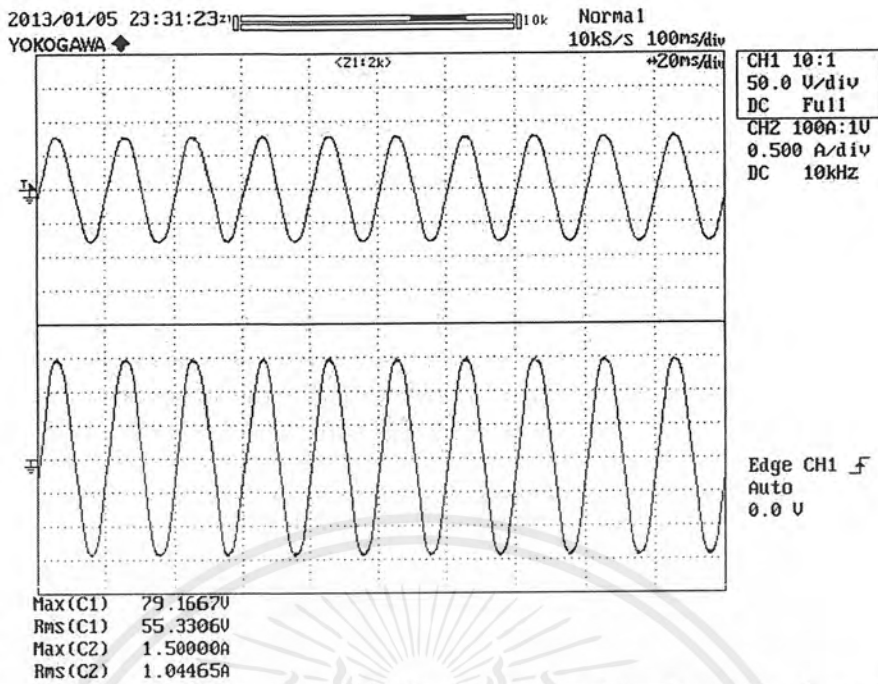


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

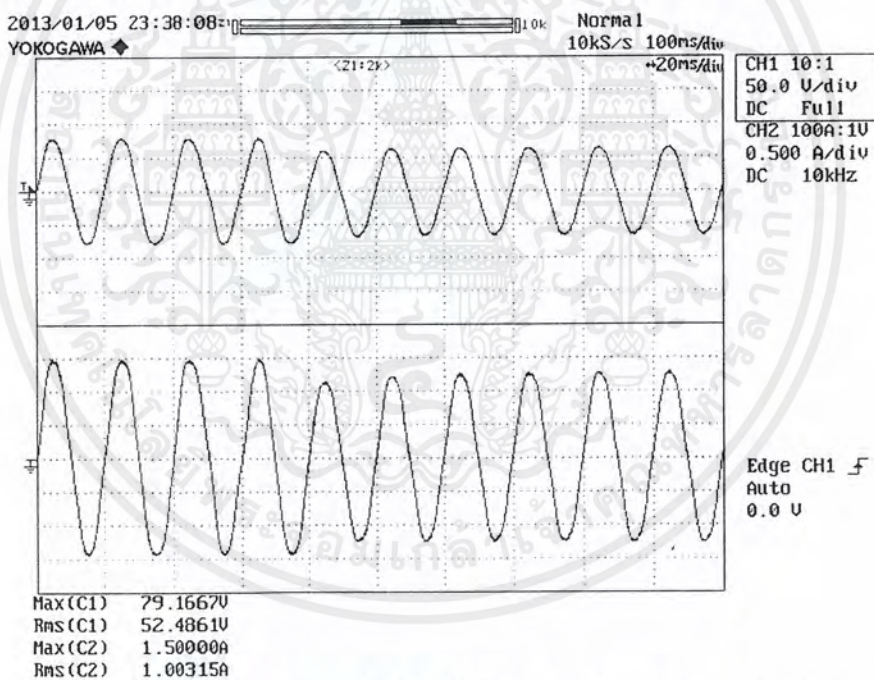


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.30 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 220-396

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



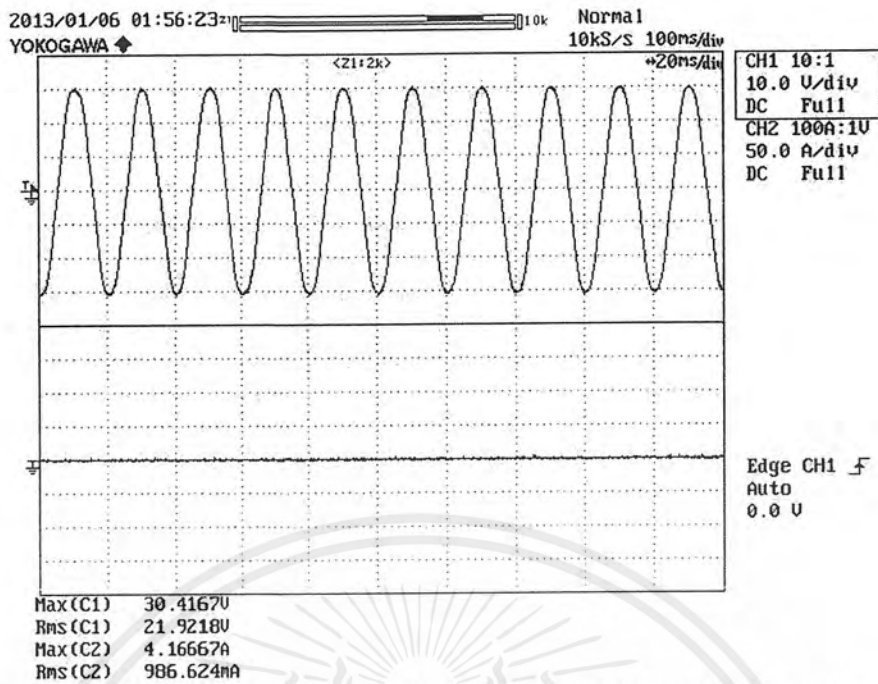
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



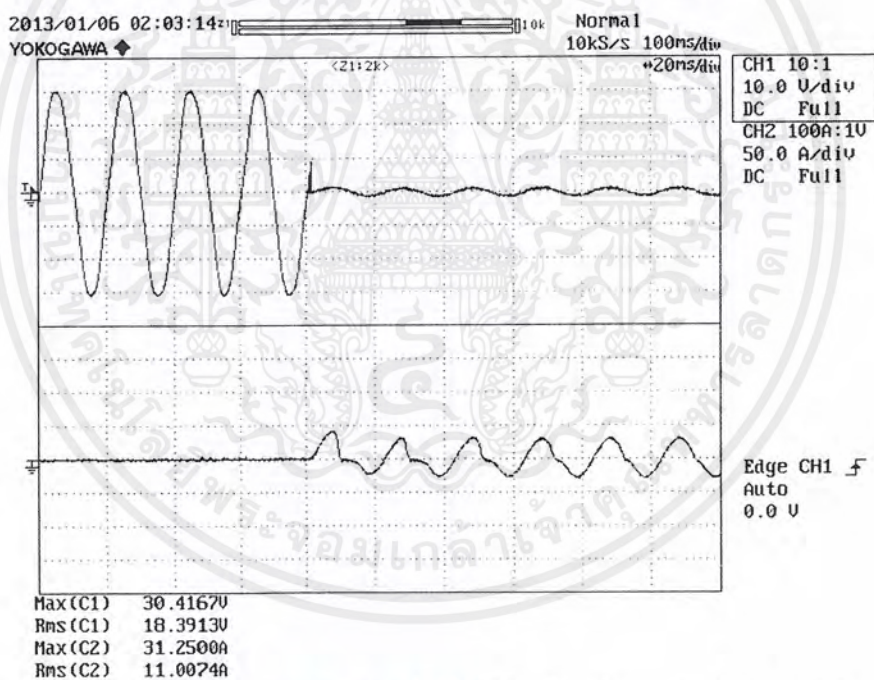
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.30 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 220-396

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

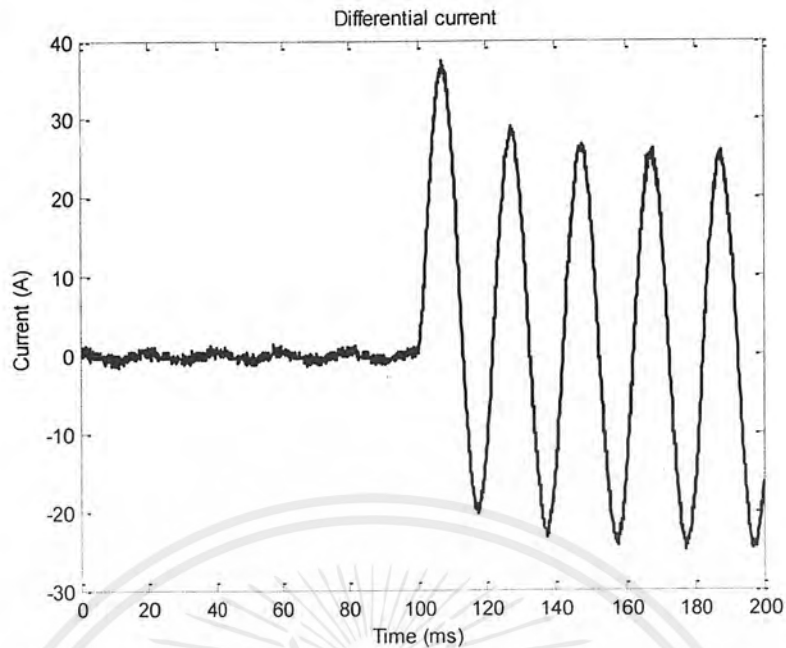


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.30 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 220-396

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.30 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 220-396

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.30

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.30 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.14 แอมแปร์ เป็น 27.70 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 28.07 โวลต์ เป็น 25.46 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.30 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 1.04 แอมแปร์ เป็น 0.91 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 55.33 โวลต์ เป็น 45.25 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 220-396 ดังรูปที่ 4.30 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

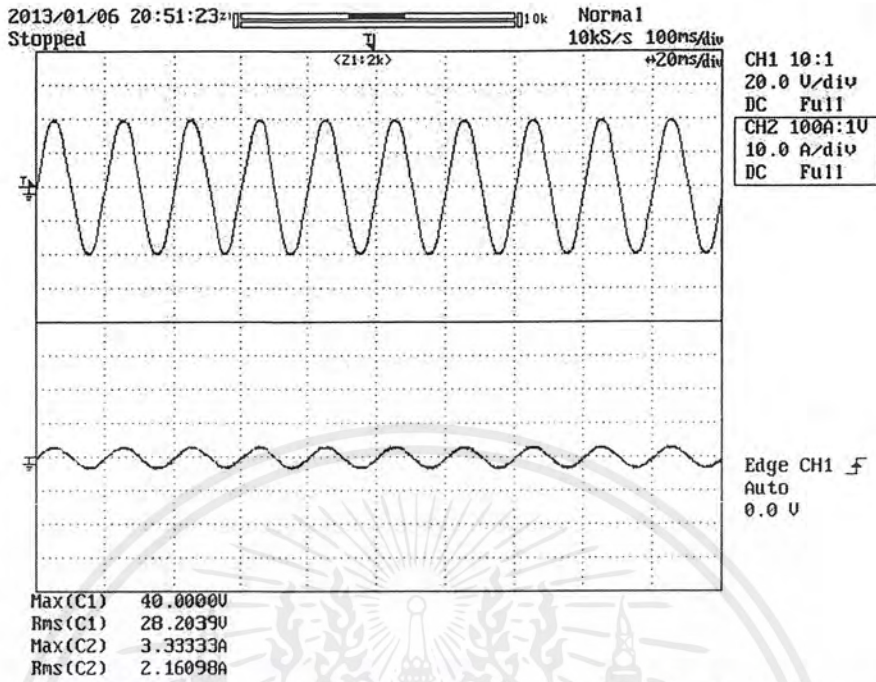
- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 22.10 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 21.92 โวลต์ เป็น 0.78 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.30 (ข)

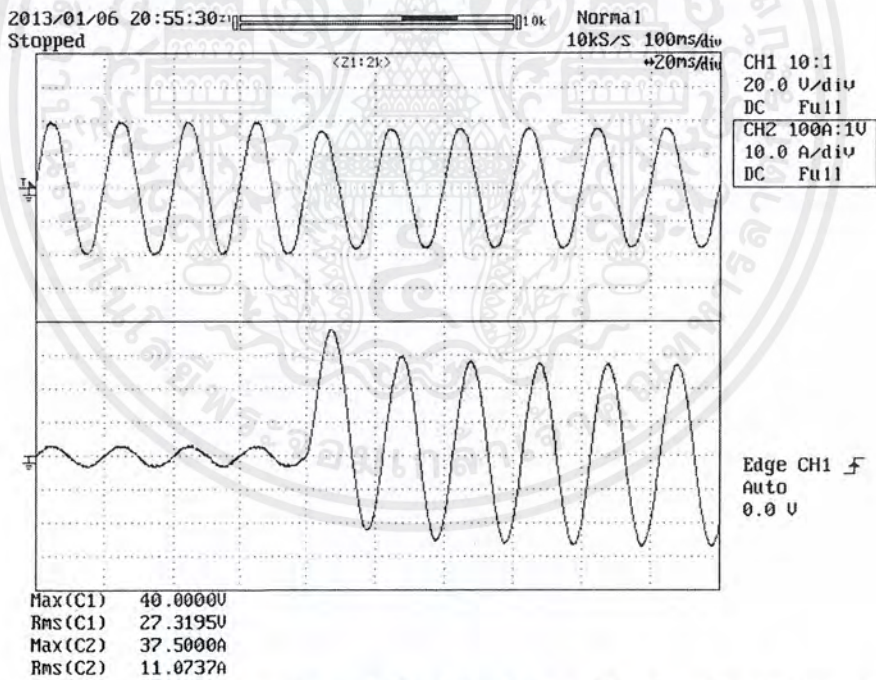
- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.06 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 25.88 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.6 การลัดวงจรระหว่างแทปขดลวด ตำแหน่ง 264-440

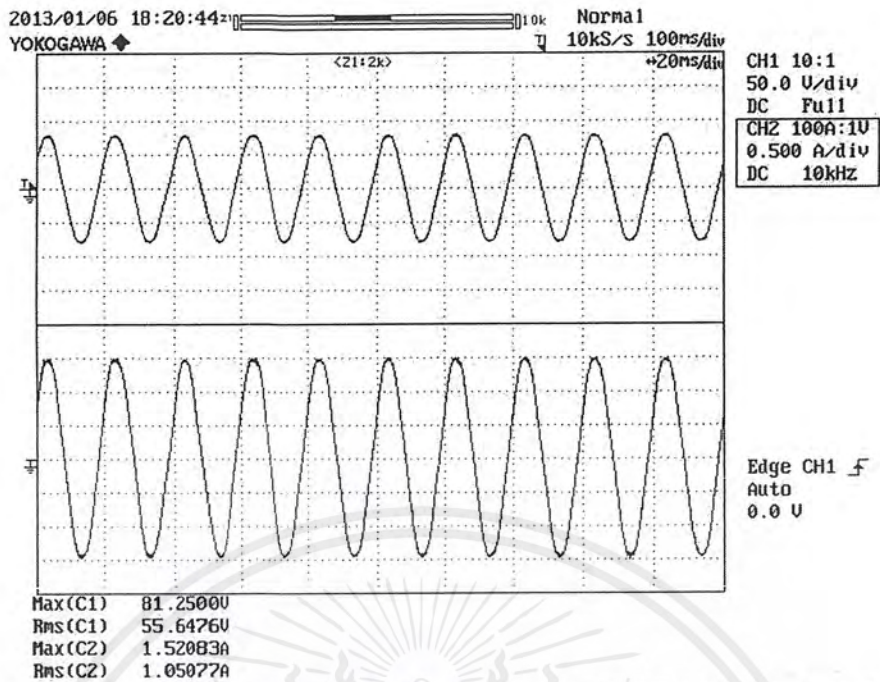


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

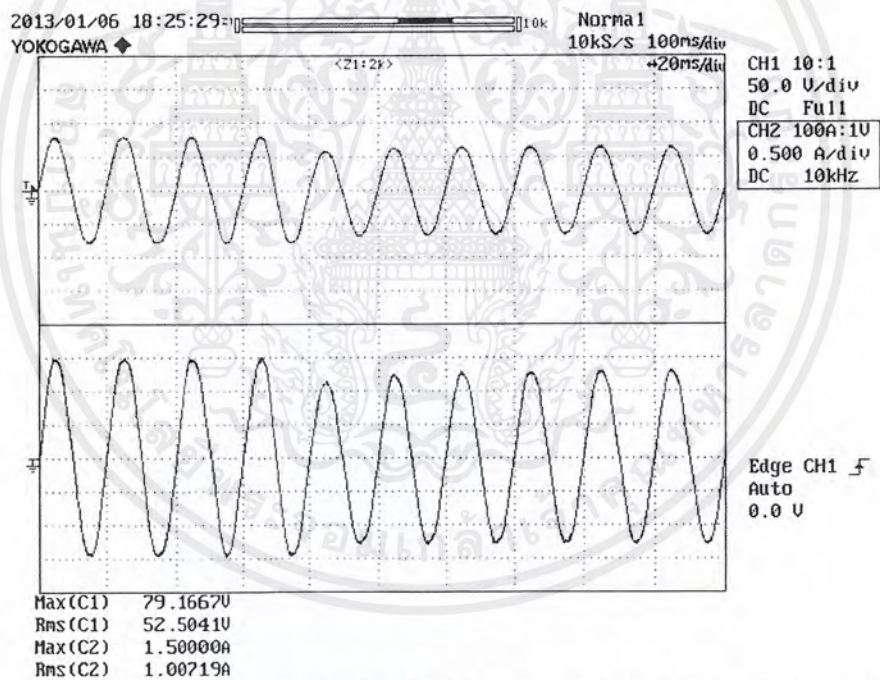


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.31 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซนต์ ตำแหน่ง 264-440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

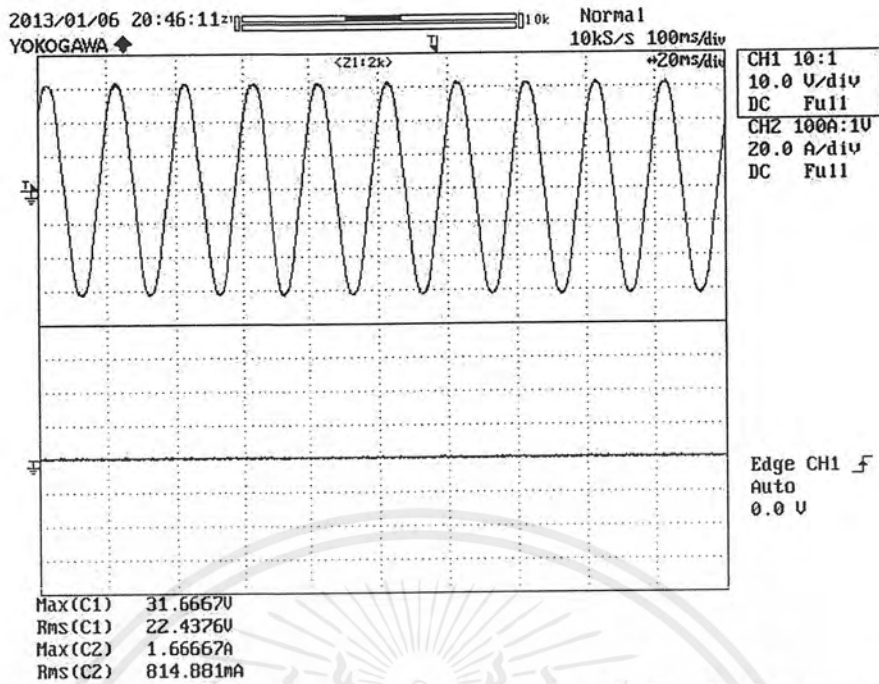


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

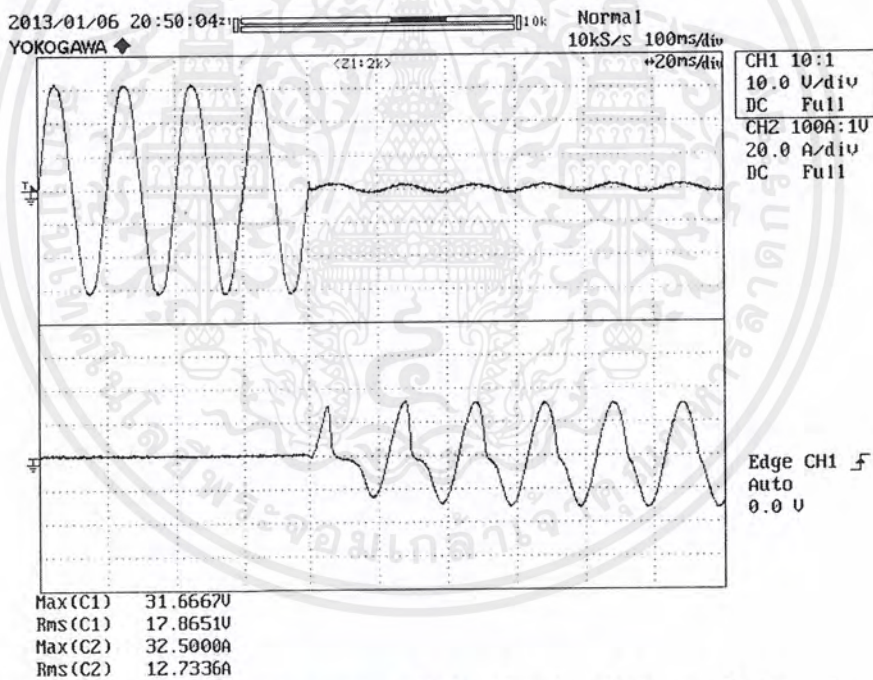


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.31 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 264-440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

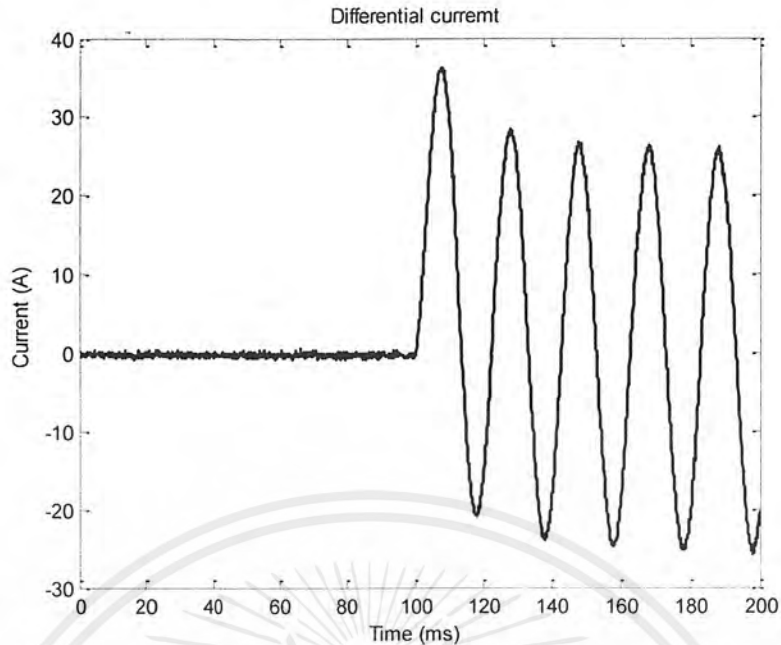


(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.31 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 264-440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.31 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 264-440

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.31

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.31 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.16 แอมแปร์ เป็น 26.51 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.20 โวลต์ เป็น 25.17 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.31 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.92 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.65 โวลต์ เป็น 45.96 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 264-440 ดังรูปที่ 4.31 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 22.98 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 22.44 โวลต์ เป็น 1.34 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.31 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.06 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 24.67 แอมแปร์

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V แทบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 40 เปอร์เซ็นต์

ประเภทขดลวด	ระดับแรงดันหม้อแปลง	โหลด	มม	ปฐมภูมิ				ทุติยภูมิ				ลัดวงจร				กระแสผลต่าง		
				ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน	หลัง	
				แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส					
44-220	0			28.16	2.15	25.46	27.70	55.52	1.05	45.61	0.91	22.00	0	0.78	22.10	0.05	25.88	
88-264	0			27.92	2.14	22.77	44.78	55.04	1.04	38.89	0.79	21.89	0	1.56	42.72	0.06	43.20	
132-308	0	156 W		28.05	2.15	20.93	54.21	55.32	1.05	33.94	0.67	21.93	0	1.98	60.39	0.05	52.87	
176-352	0			27.93	2.14	22.91	44.19	55.01	1.05	37.83	0.79	21.83	0	1.41	42.72	0.04	42.61	
220-396	0				28.07	2.14	25.46	27.70	55.33	1.04	45.25	0.91	21.92	0	0.78	22.10	0.06	25.88
264-440	0				28.20	2.16	25.17	26.51	55.65	1.05	45.96	0.92	22.44	0	1.34	22.98	0.06	24.67

จากการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V แทบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองก่อน และหลังการลัดวงจร พบว่า

ทางด้านปฐมภูมิ แรงดันไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร กระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งแทบขดลวด โดยที่แทบขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

ทางด้านทุติยภูมิ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งแทบขดลวด โดยที่แทบขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

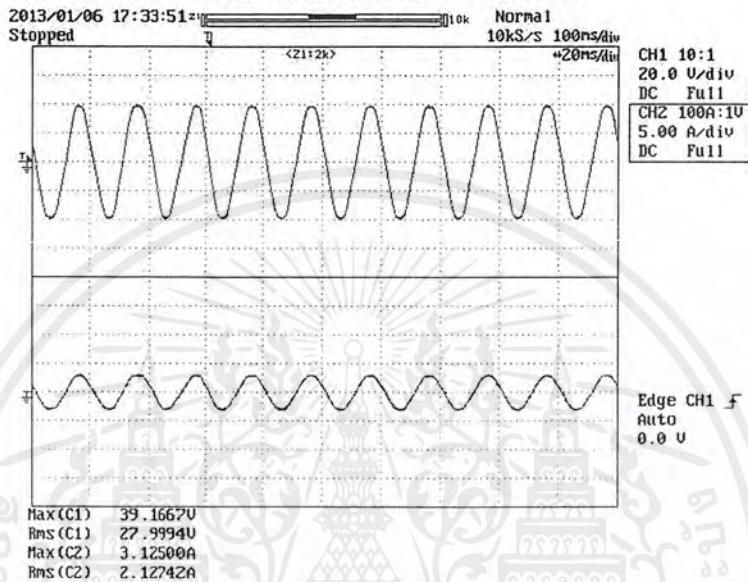
ทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจร แนวโน้มพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า คล้ายกับทางด้านปฐมภูมิ แต่ค่าแอมพลิจูดของแรงดันต่ำกว่า ค่าแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรสูงกว่า

เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งแทบขดลวด โดยที่แทบขดลวดแรงดันต่างกัน 40 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า กระแสผลต่างมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

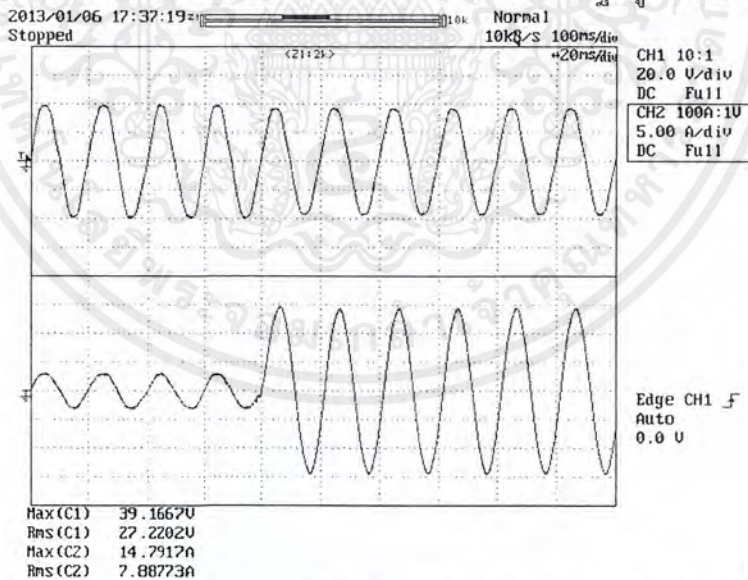
## 4.2 การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน

การทำการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ได้ทำการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดแต่ละแท่งกับดิน ซึ่งจะทำการเพิ่มระยะห่างของขดลวดแต่ละแท่งกับดินครั้งละ 10 เพอร์เซ็นต์ (44 โวลต์) โดยมีมุมเริ่มต้นที่ 0 องศา จ่ายโหลดที่ 156 วัตต์ แรงดันไฟฟ้า 27.5/55 โวลต์ เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างขดลวดกับดินจะมีผลต่อกระแสลัดวงจรอย่างไร ซึ่งผลจากการทดลองเป็นดังนี้

### 4.2.1 การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 44 - ดิน

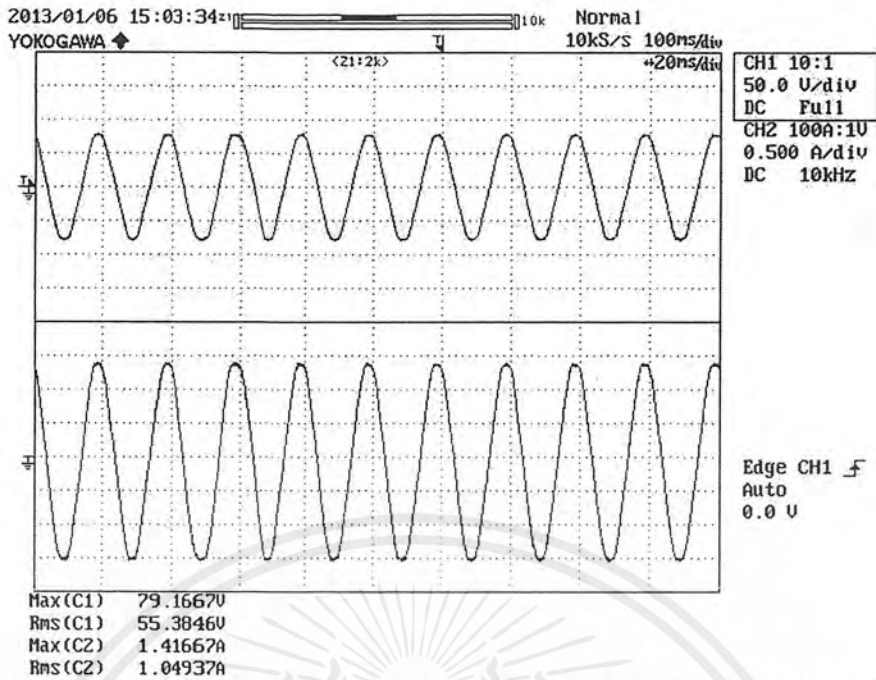


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

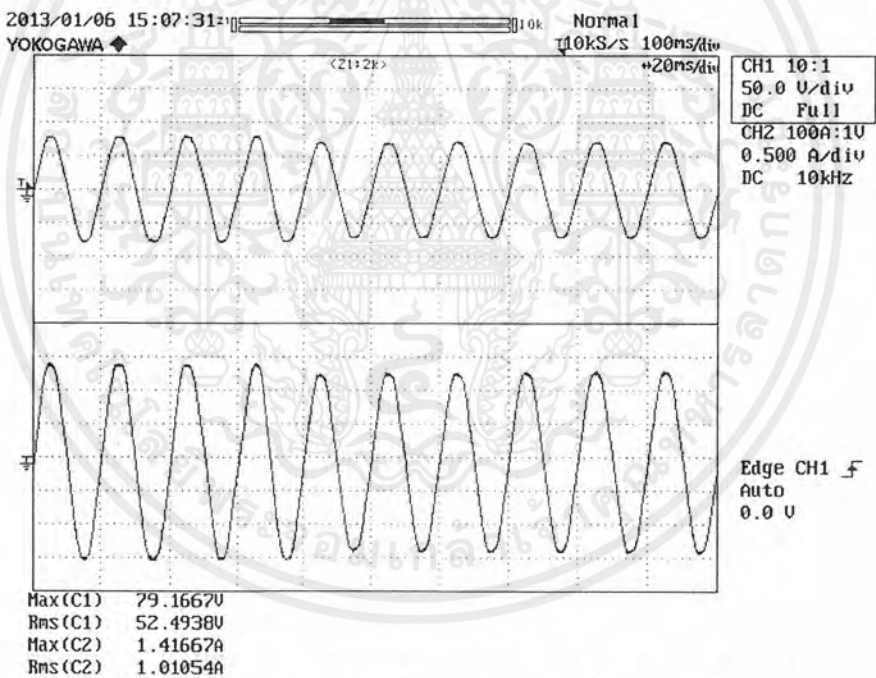


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.32 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 44 - ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

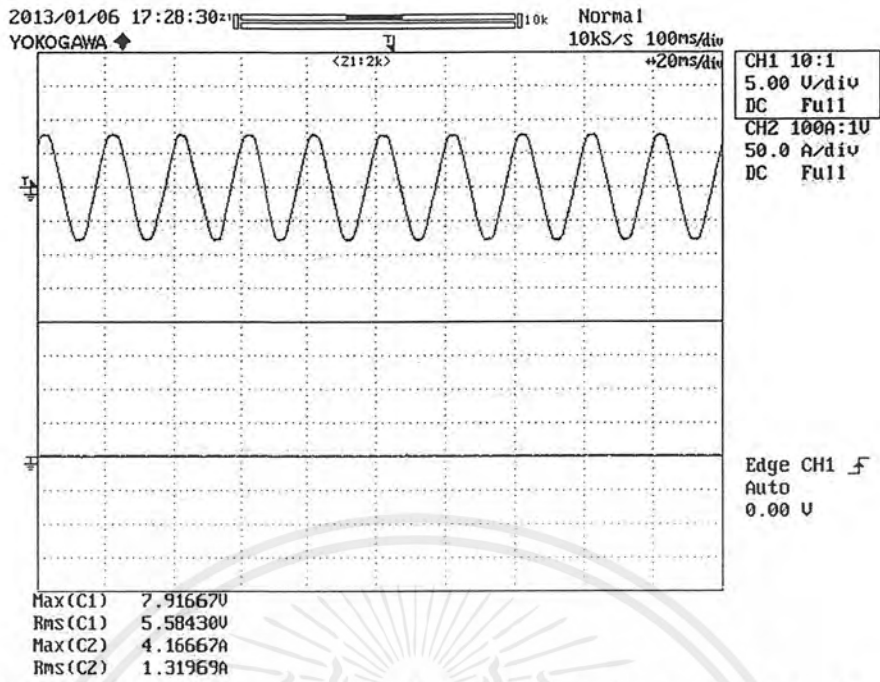


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

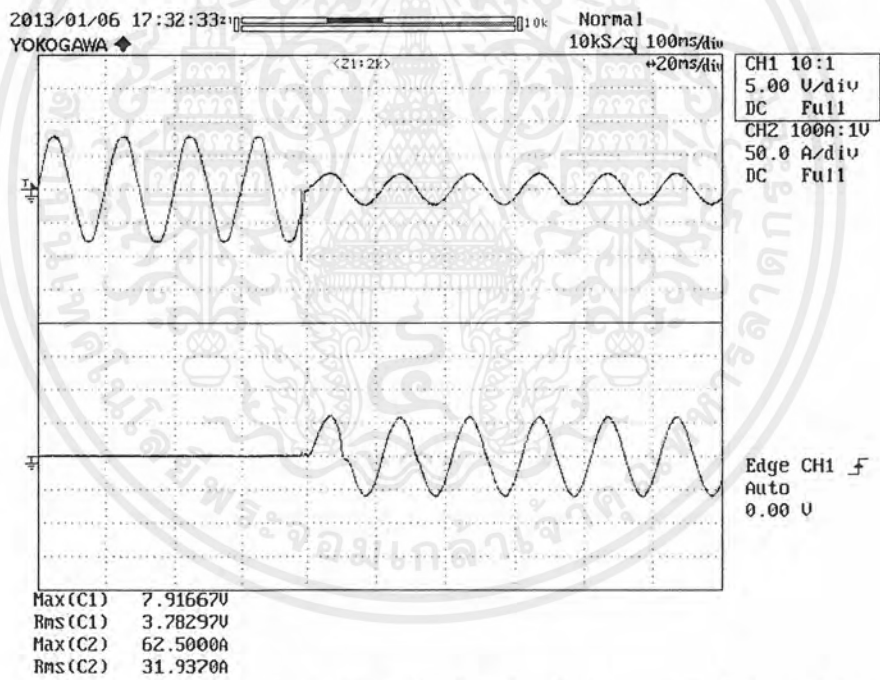


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.32 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 44 - ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

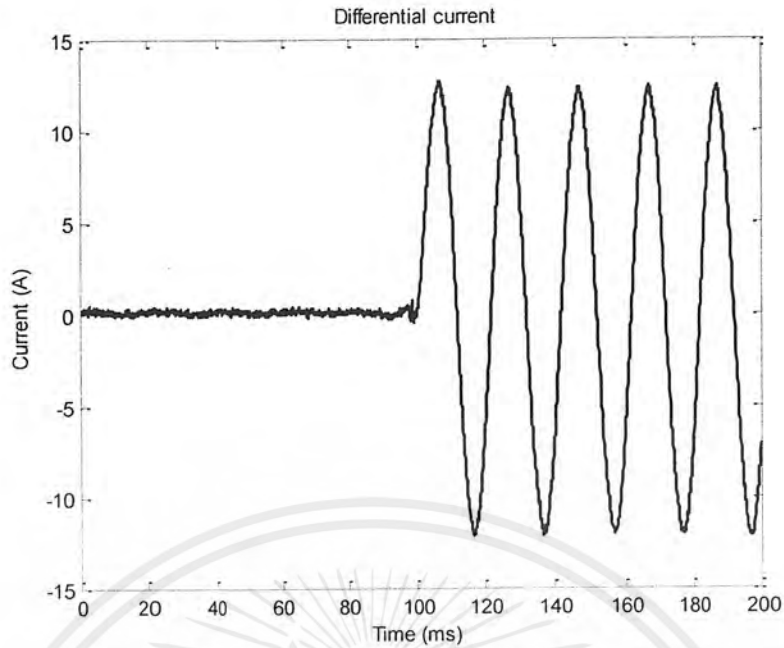


(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.32 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 44 - ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.32 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 44 – ดิน

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.32

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.32 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.13 แอมแปร์ เป็น 10.46 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.00 โวลต์ เป็น 25.74 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.32 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.89 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.34 โวลต์ เป็น 49.14 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 44-ดิน ดังรูปที่ 4.32 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

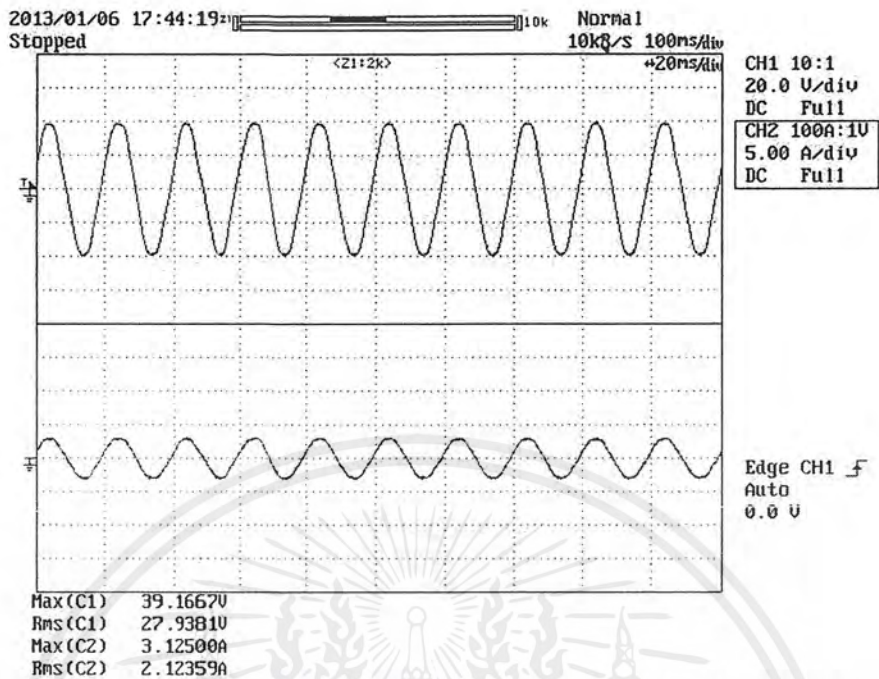
- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 44.90 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 5.58 โวลต์ เป็น 1.63 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.32 (ข)

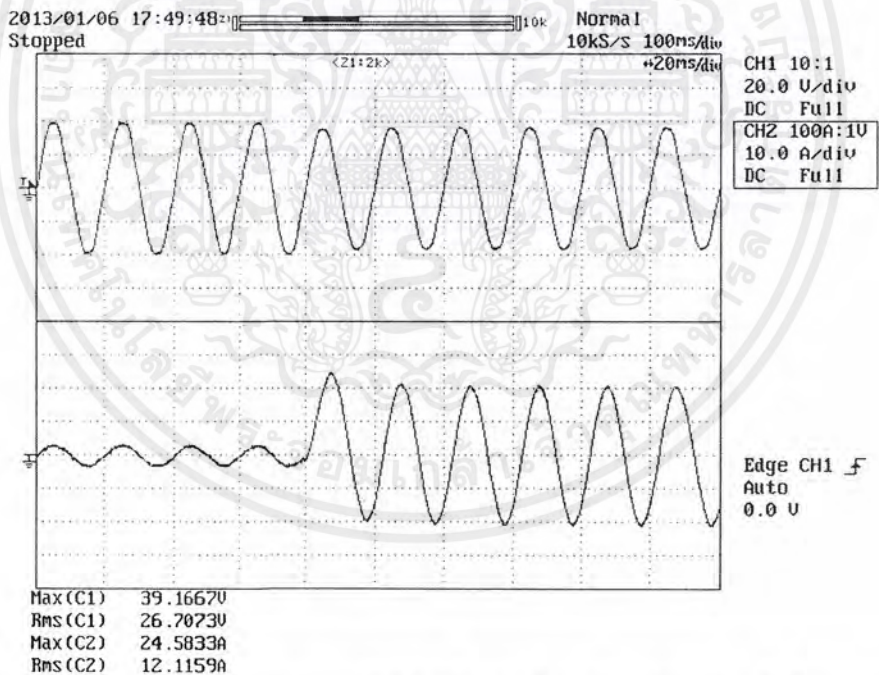
- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.03 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 8.68 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.2 การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 88 – ดิน

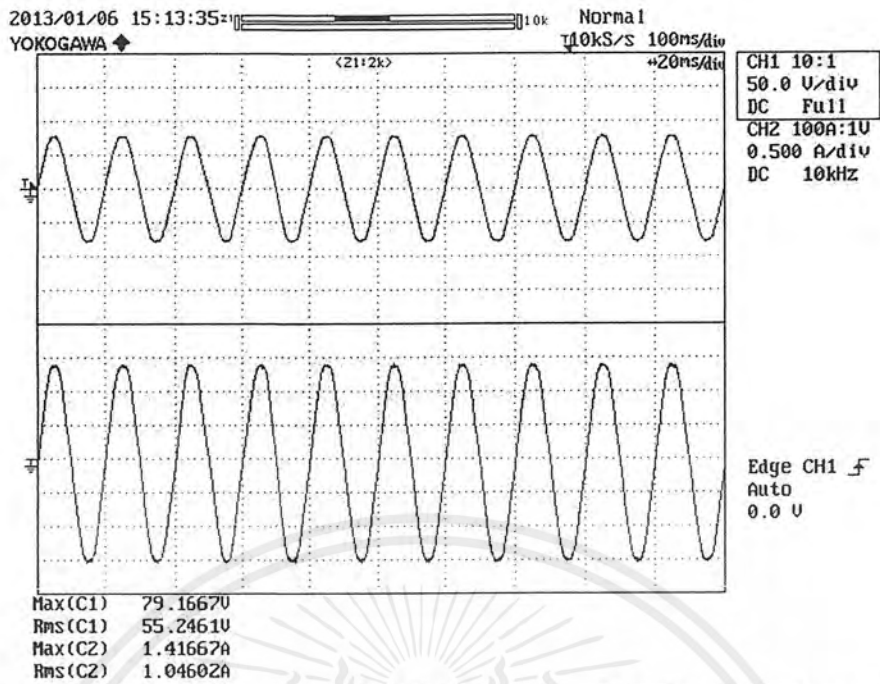


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

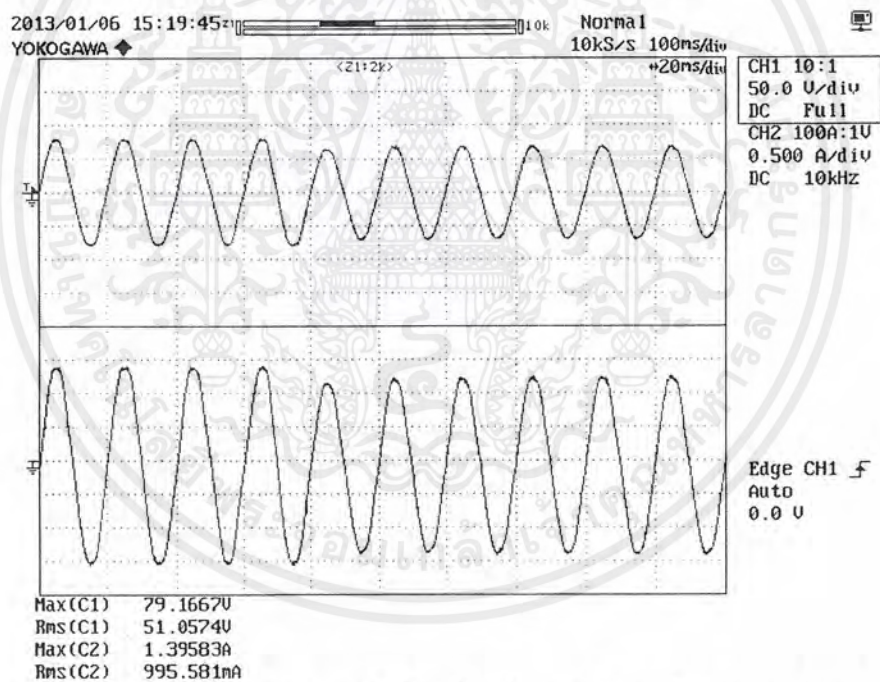


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.33 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 88 – ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

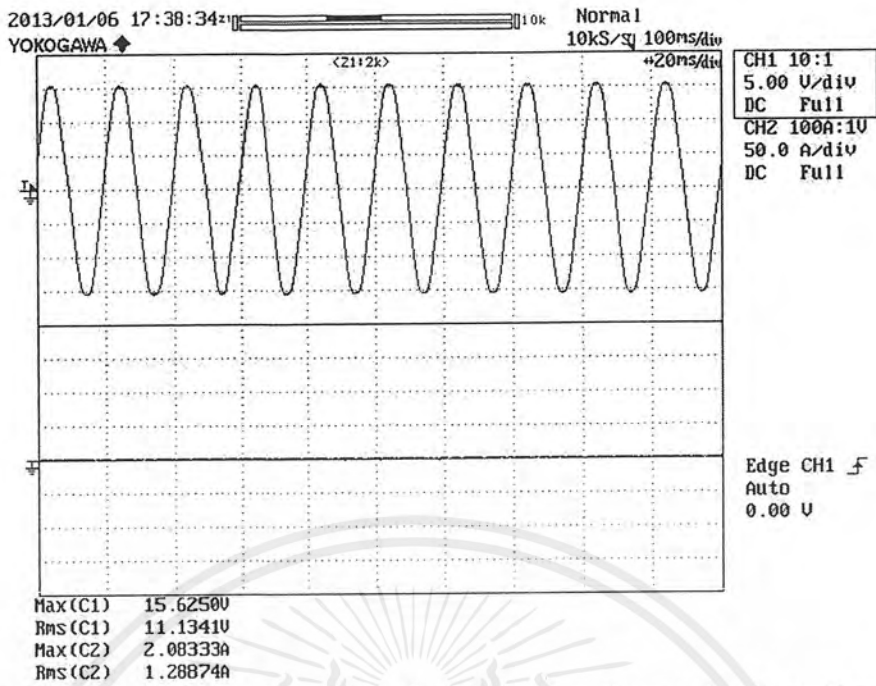


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

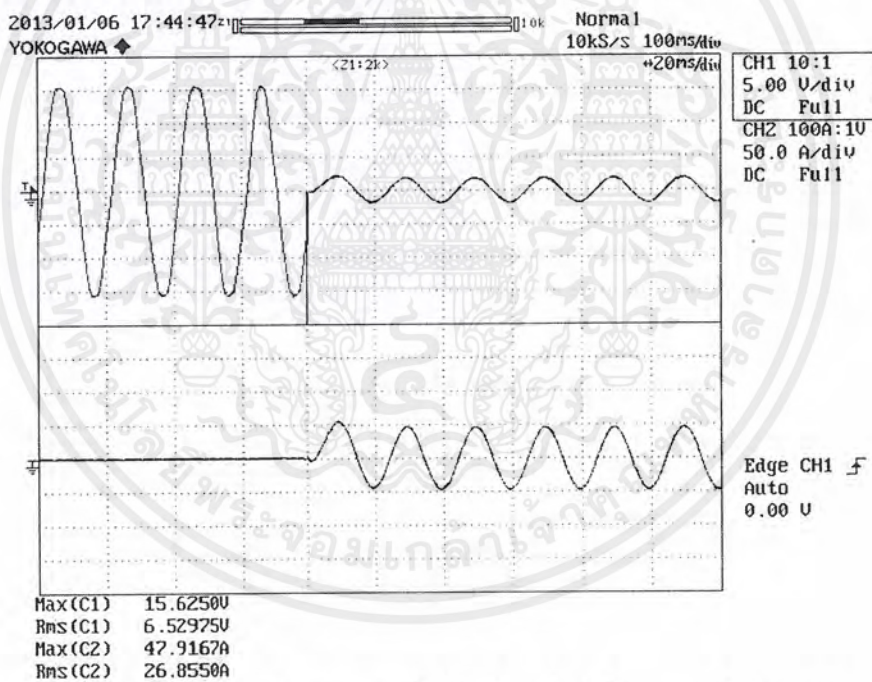


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.33 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 88 - ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

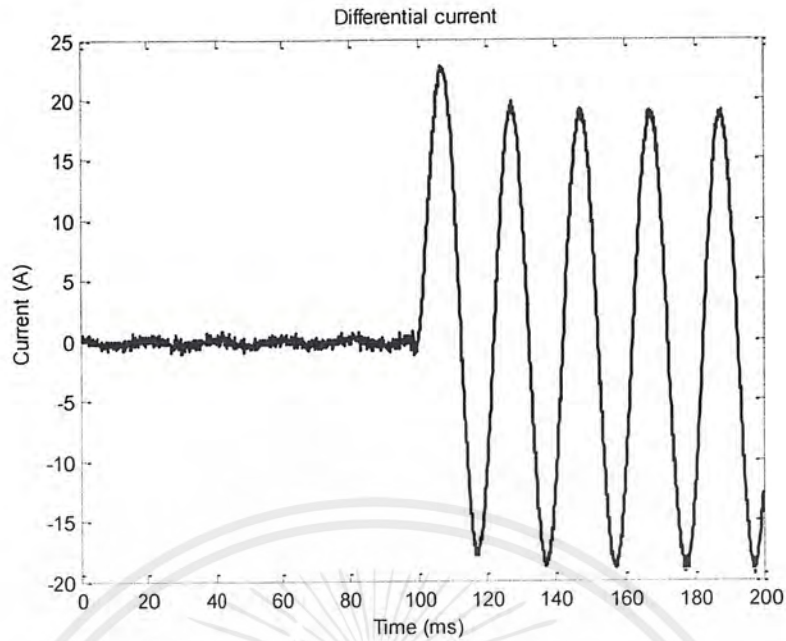


(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.33 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 88 - ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.33 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 88 – ดิน

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.33

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.33 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.12 แอมแปร์ เป็น 14.57 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 27.94 โวลต์ เป็น 25.17 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.33 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.88 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.25 โวลต์ เป็น 49.14 โวลต์

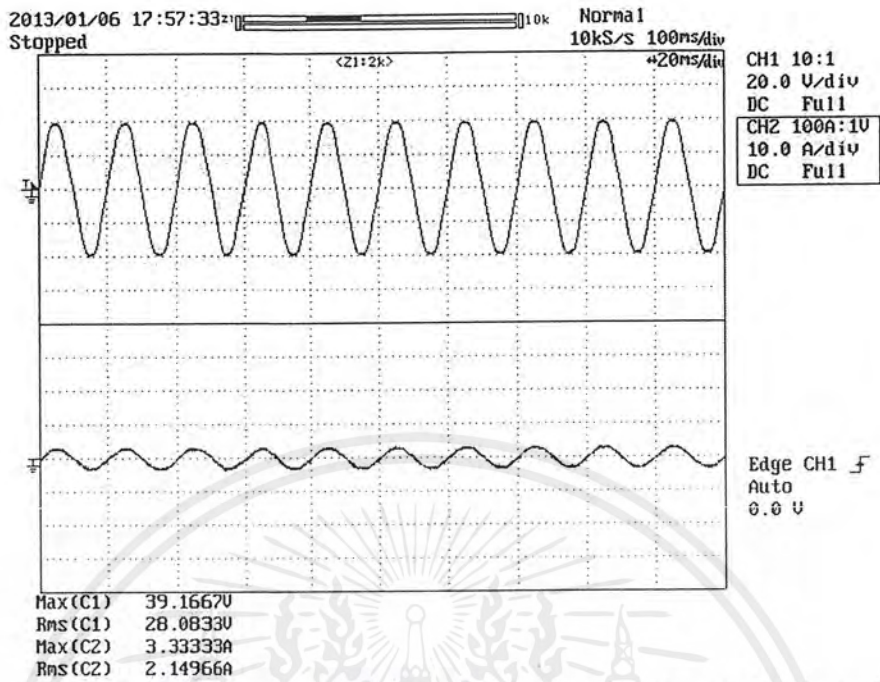
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนของลัดวงจรที่ตำแหน่ง 88-ดิน ดังรูปที่ 4.33 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 33.88 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 11.13 โวลต์ เป็น 1.34 โวลต์

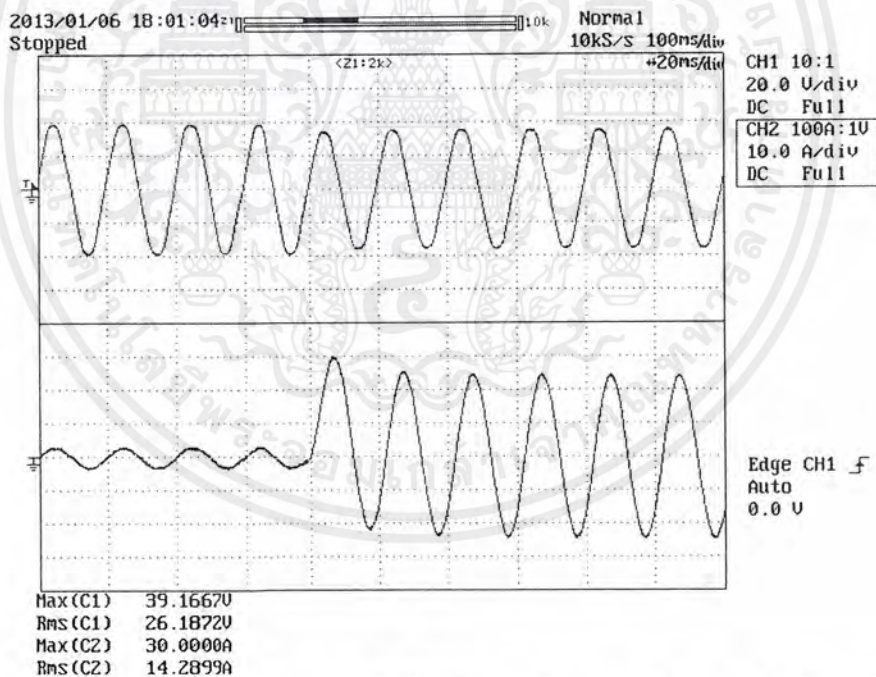
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.33 (ซ)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.02 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 17.38 แอมแปร์

#### 4.2.3 การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 132 – ดิน



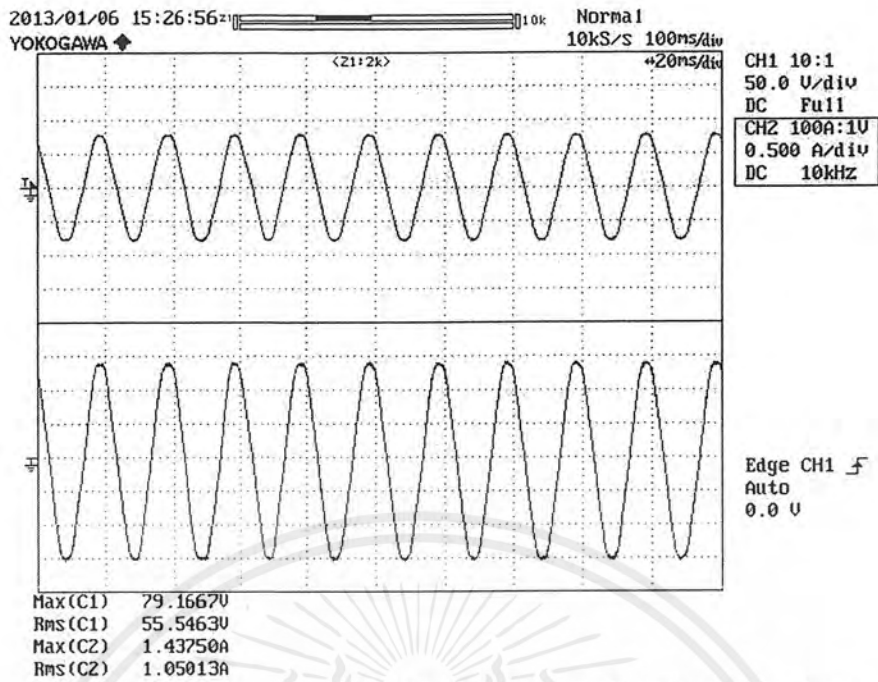
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



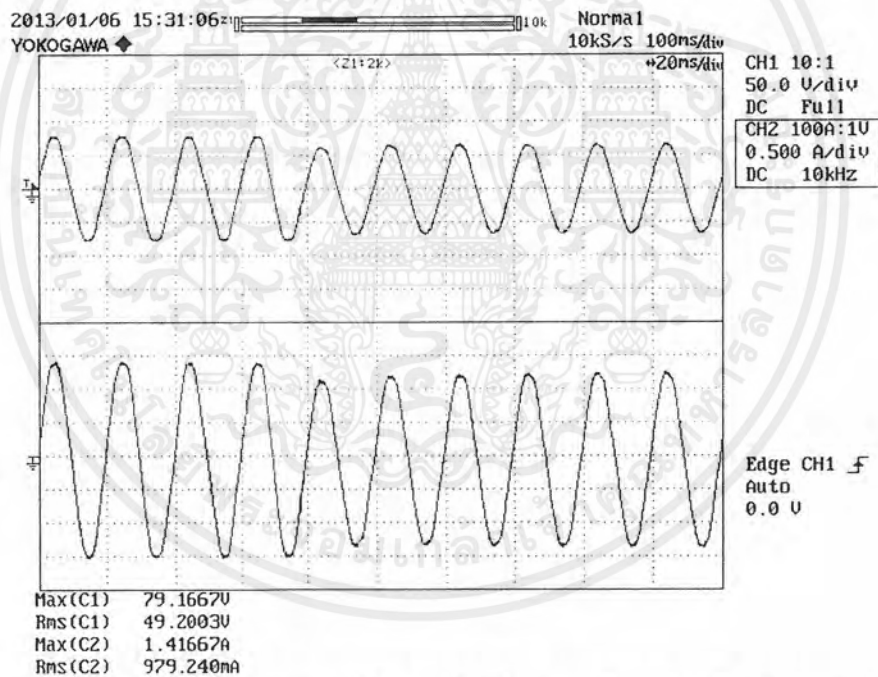
(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.34 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 132 – ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

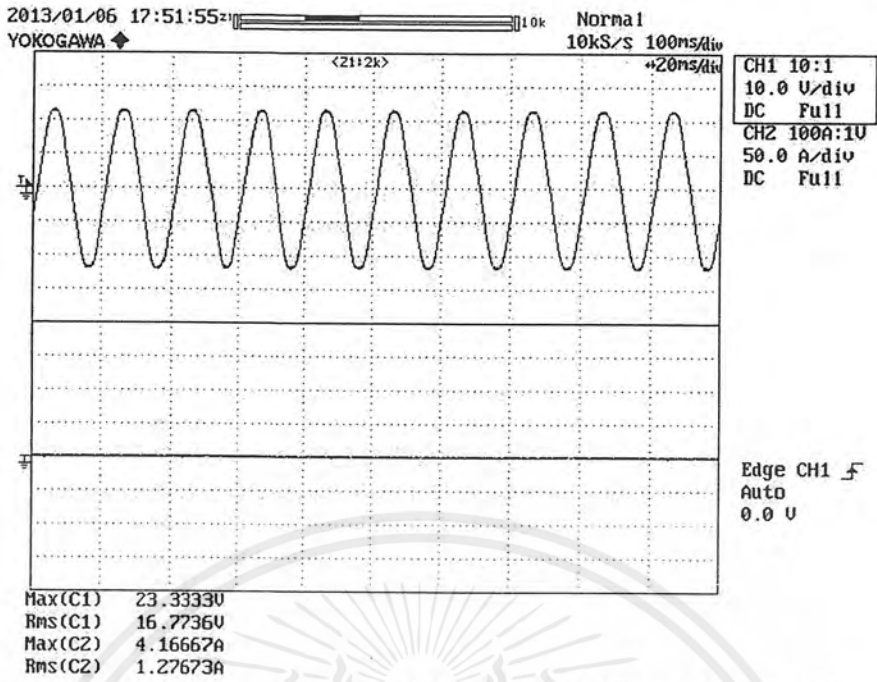


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

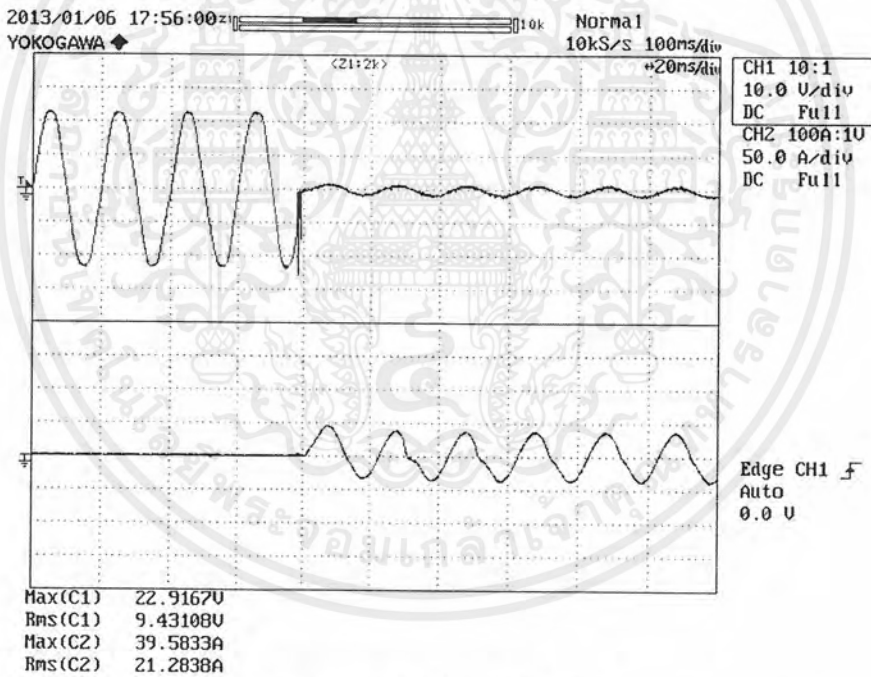


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.34 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 132 - ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

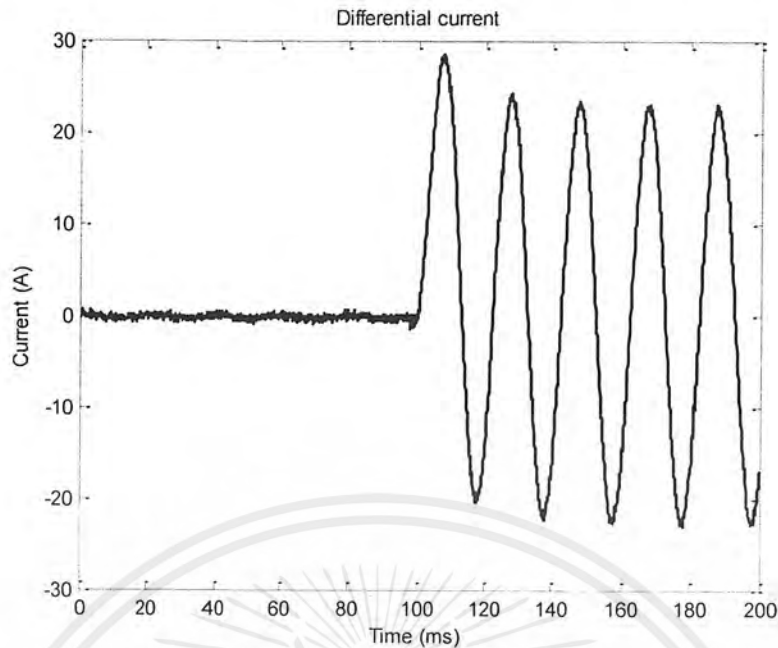


(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.34 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 132 – ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.34 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 132 - ดิน

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.34

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.34 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.15 แอมแปร์ เป็น 21.21 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 28.08 โวลต์ เป็น 25.03 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.34 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.86 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 55.55 โวลต์ เป็น 45.61 โวลต์

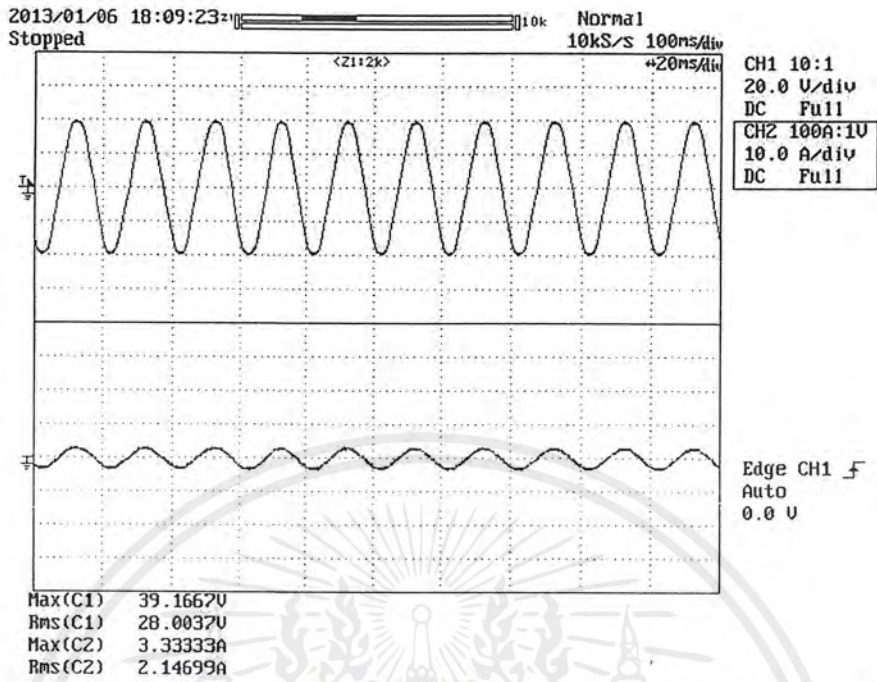
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 132 - ดิน ดังรูปที่ 4.34 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 27.99 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าลดลงจาก 16.77 โวลต์ เป็น 1.06 โวลต์

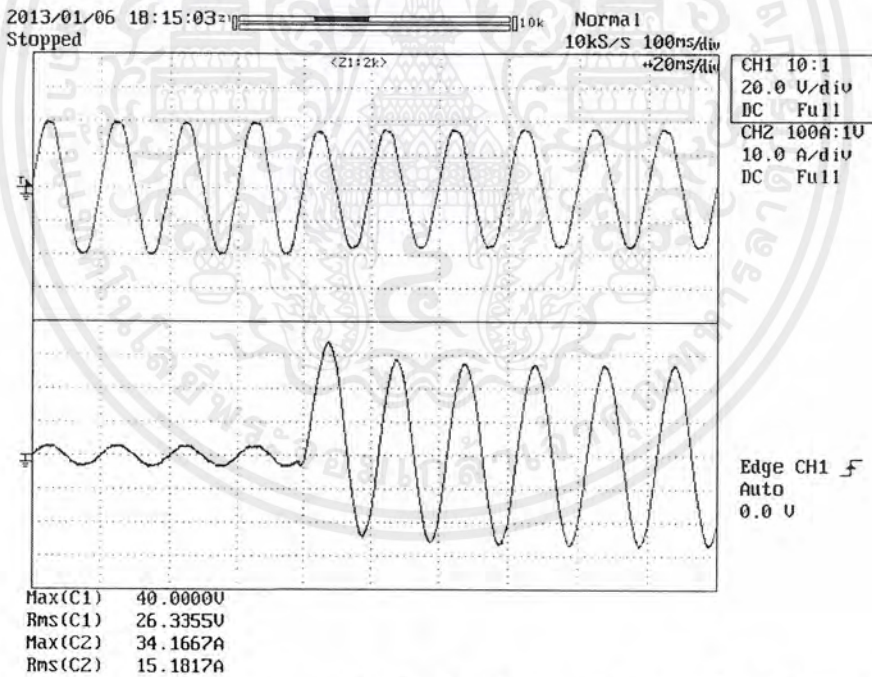
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.34 (ซ)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.05 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 19.49 แอมแปร์

4.2.4 การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 176 – ดิน

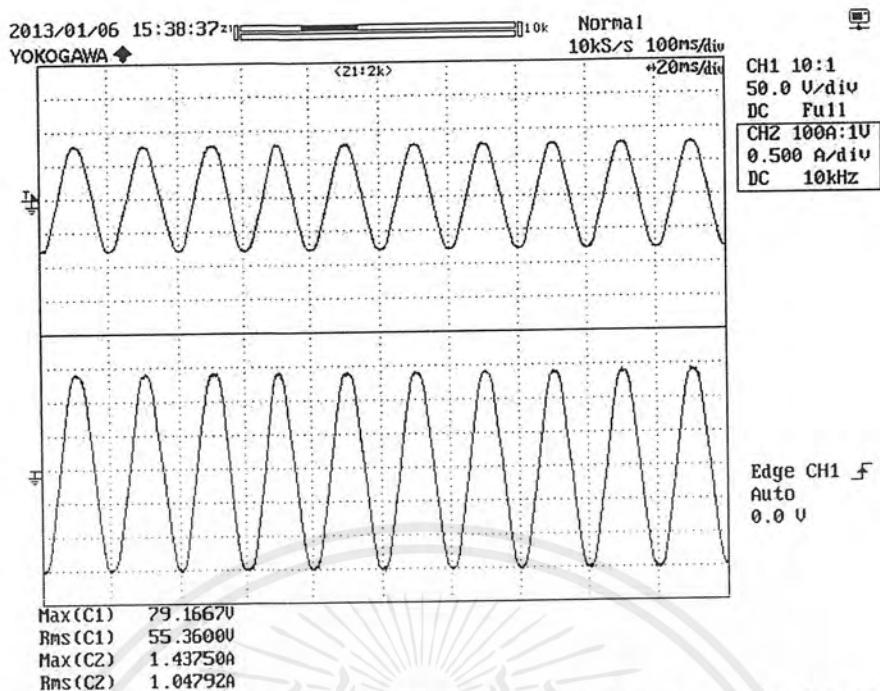


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

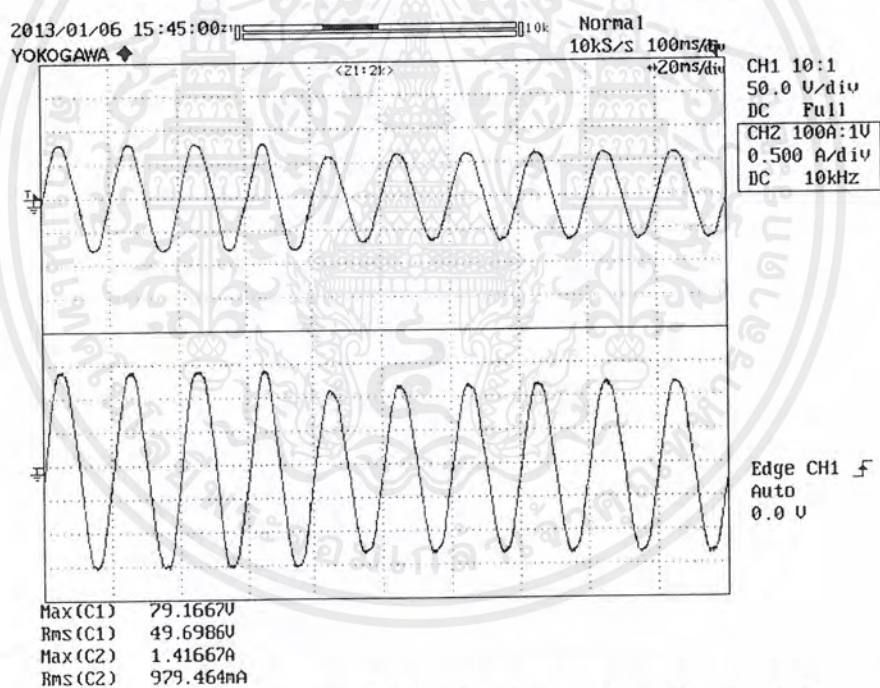


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.35 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 176 – ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

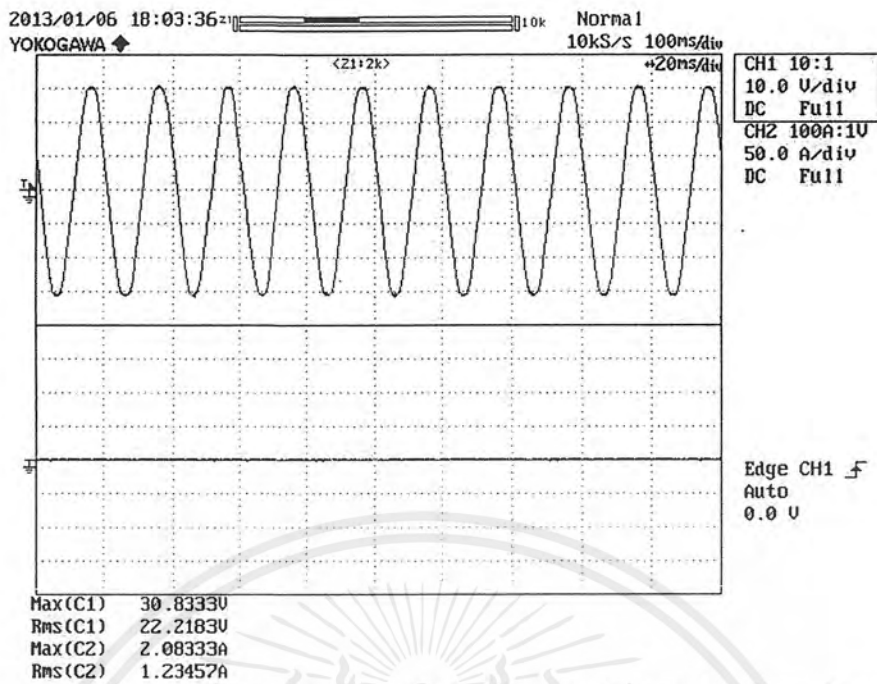


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

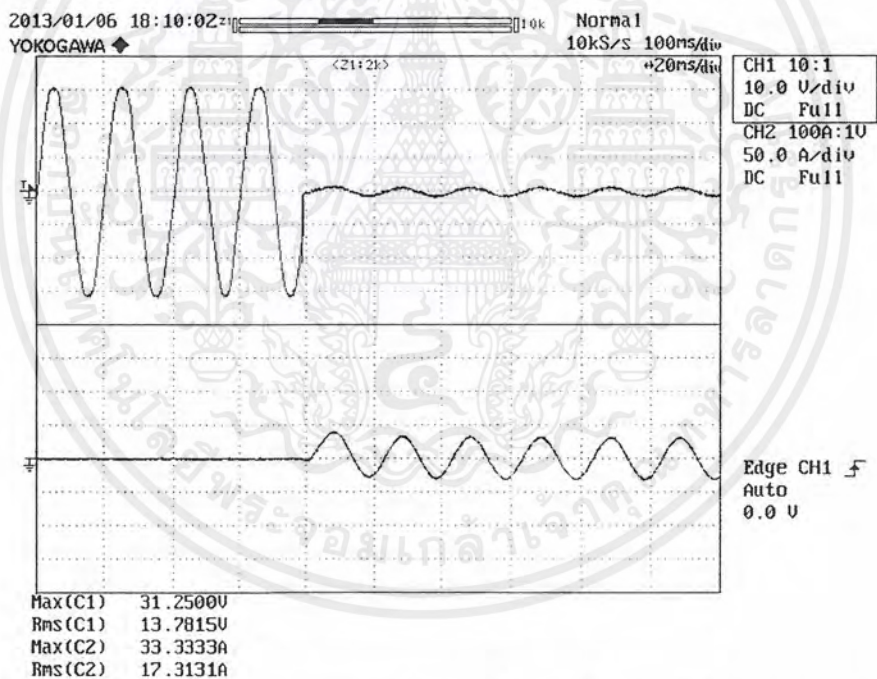


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.35 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 176 - ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

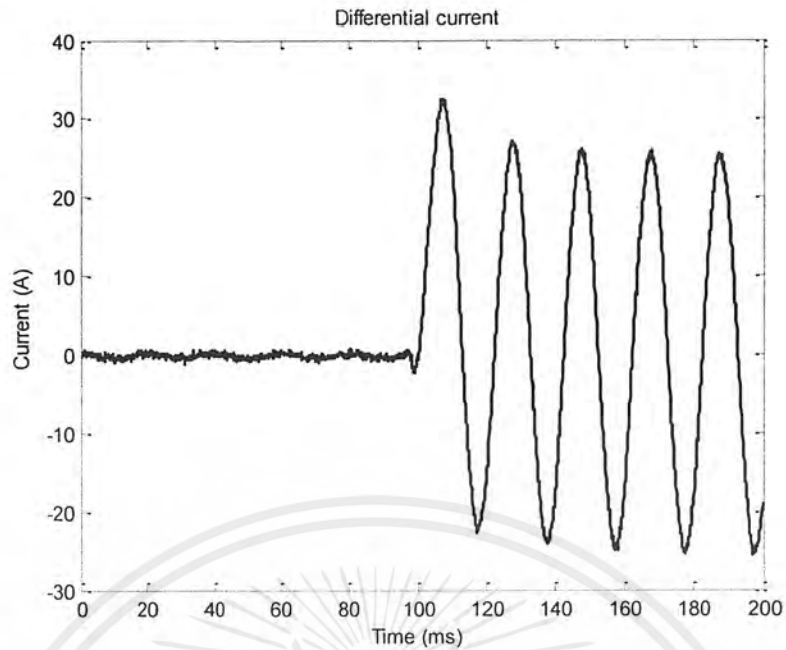


(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ล้ดวจจร ก่อนทำการล้ดวจจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ล้ดวจจร หลังทำการล้ดวจจร  
รูปที่ 4.35 (ต่อ) ผลการทดลองการล้ดวจจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 176 - ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.35 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 176 – ดิน

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.35

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.35 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.15 แอมแปร์ เป็น 24.16 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 28.00 โวลต์ เป็น 24.47 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.35 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 1.05 แอมแปร์ เป็น 0.84 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 55.36 โวลต์ เป็น 43.49 โวลต์

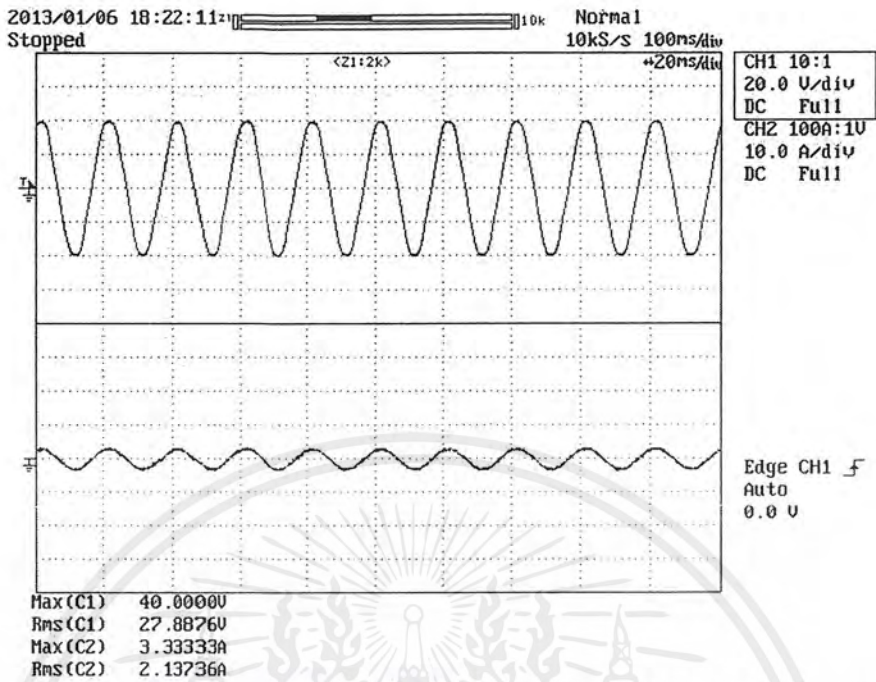
เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนของลัดวงจรที่ตำแหน่ง 176 – ดิน ดังรูปที่ 4.35 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 23.57 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 22.22 โวลต์ เป็น 0.99 โวลต์

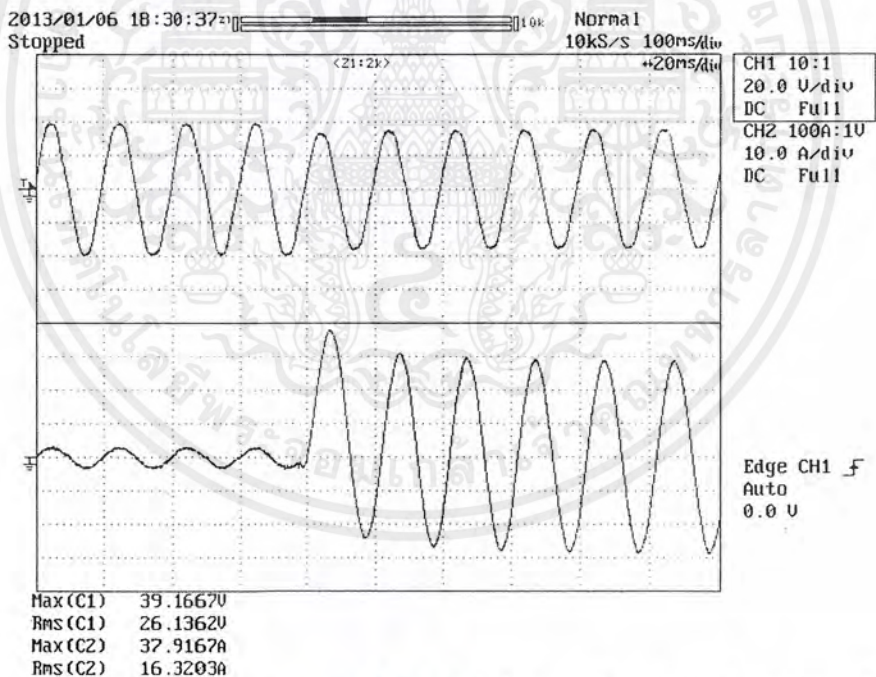
เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.35 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.05 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 22.48 แอมแปร์

## 4.2.5 การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 220 - ดิน



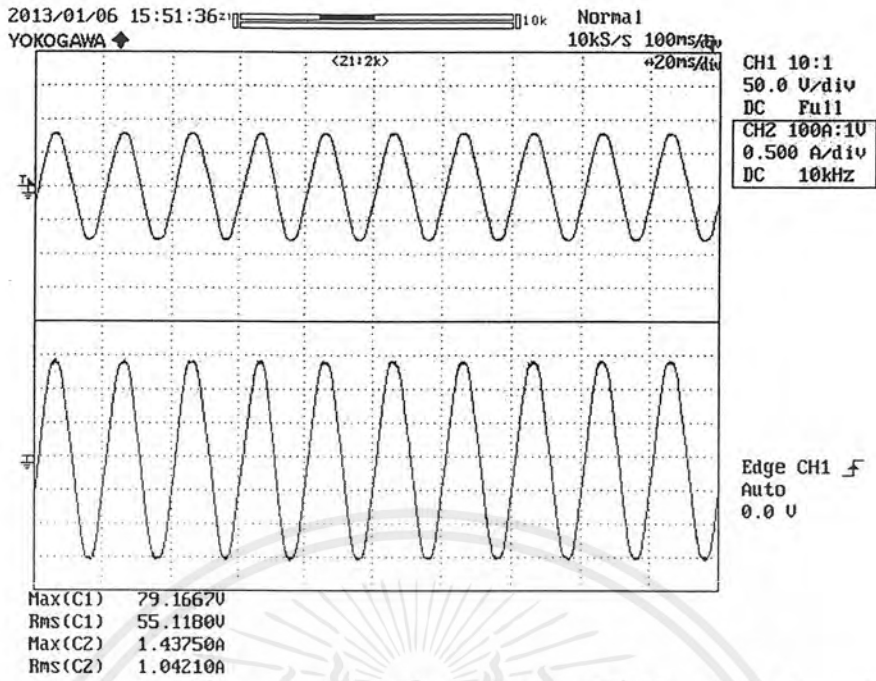
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



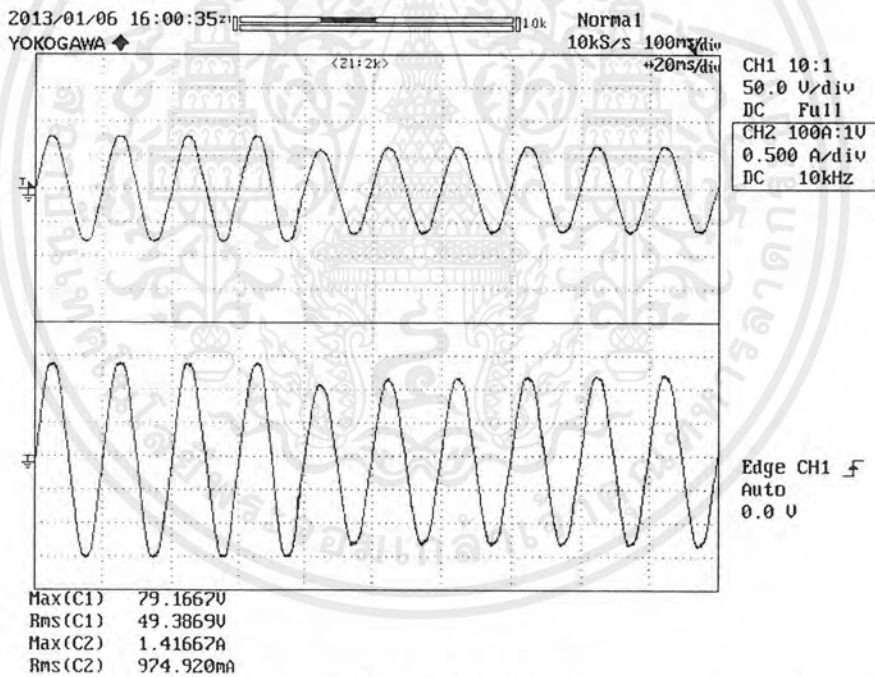
(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ 4.36 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 220 - ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

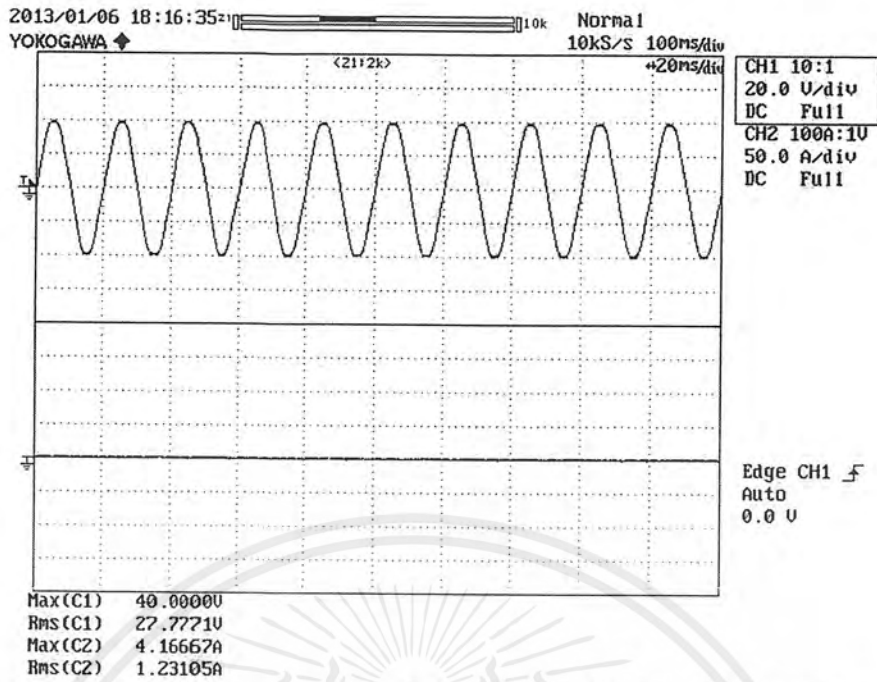


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

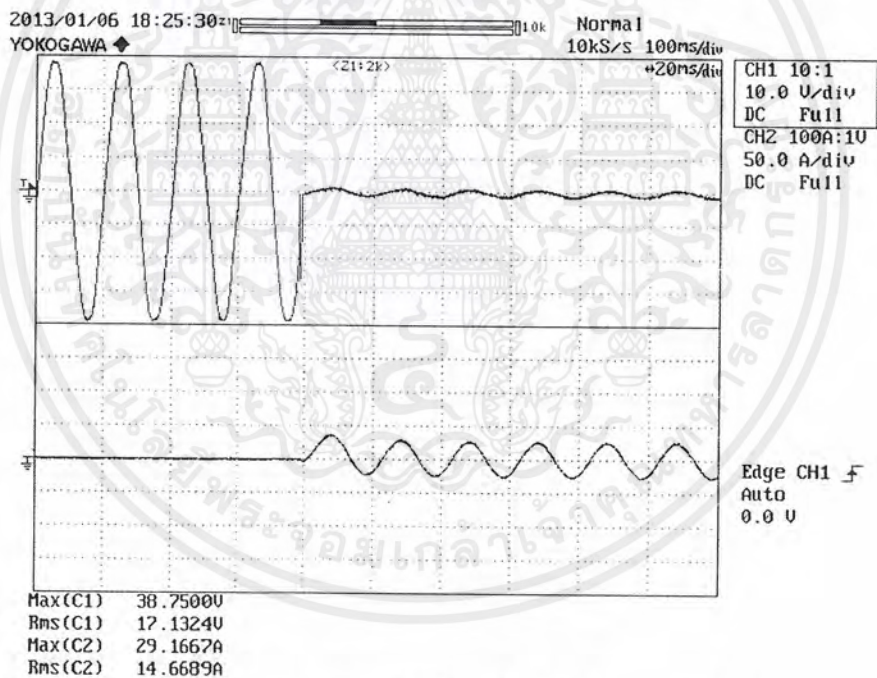


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.36 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 220 - ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

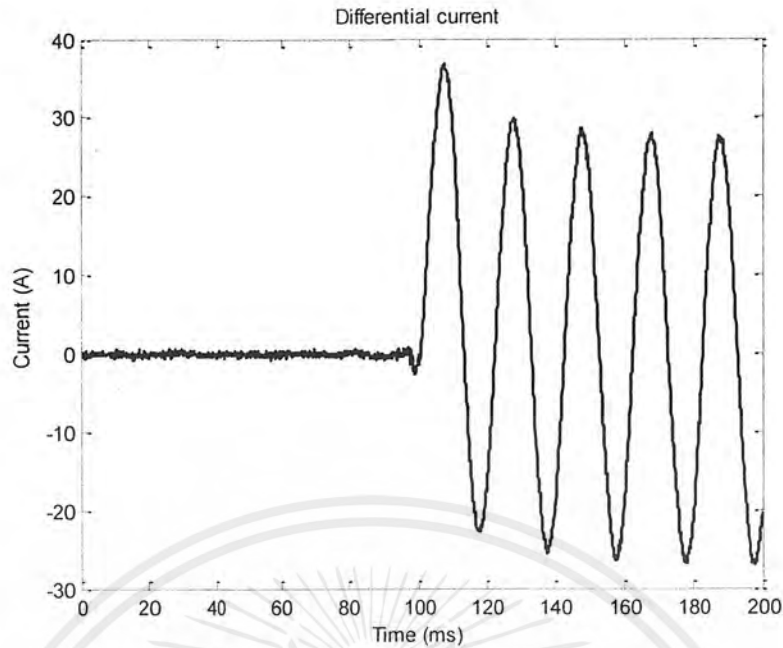


(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.36 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 220 - ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.36 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 220 - ดิน

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.36

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.36 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามียุทธเพิ่มขิ้นจาก 2.14 แอมแปร์ เป็น 26.81 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามียุทธลดลงจาก 27.89 โวลต์ เป็น 26.59 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.36 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามียุทธลดลงจาก 1.04 แอมแปร์ เป็น 0.83 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามียุทธลดลงจาก 55.12 โวลต์ เป็น 43.49 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 220 - ดิน ดังรูปที่ 4.36 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

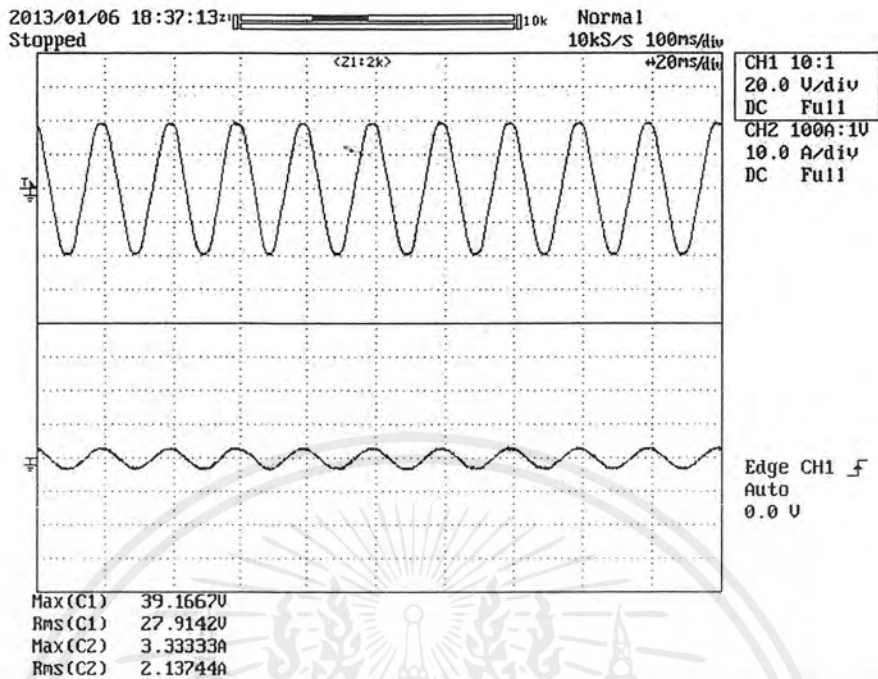
- ค่ากระแสไฟฟ้ามียุทธเพิ่มขิ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 20.63 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามียุทธลดลงจาก 27.78 โวลต์ เป็น 0.99 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.36 (ข)

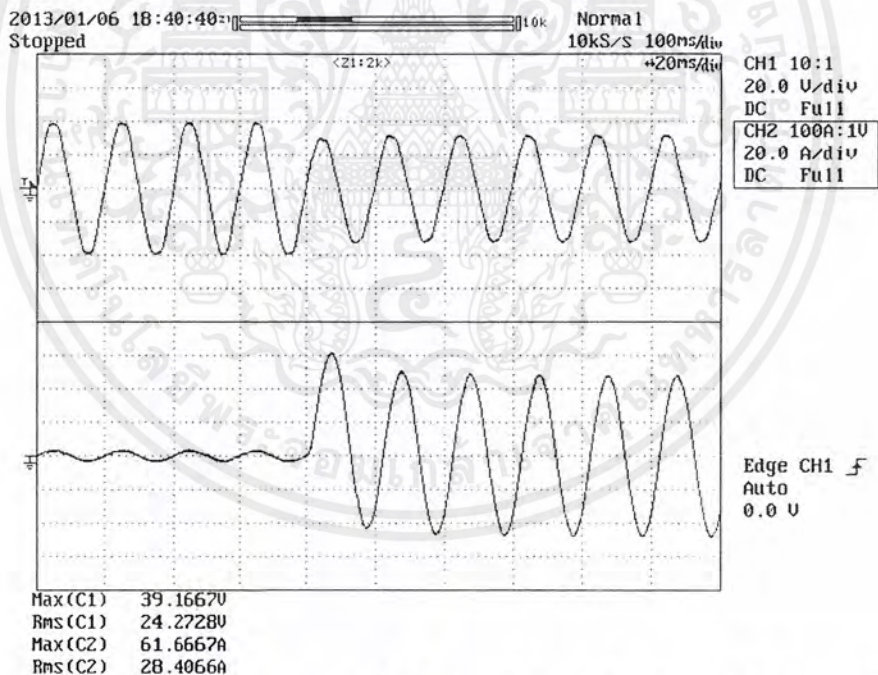
- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมียุทธ 0.06 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมียุทธ 25.15 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.6 การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 264 – ดิน

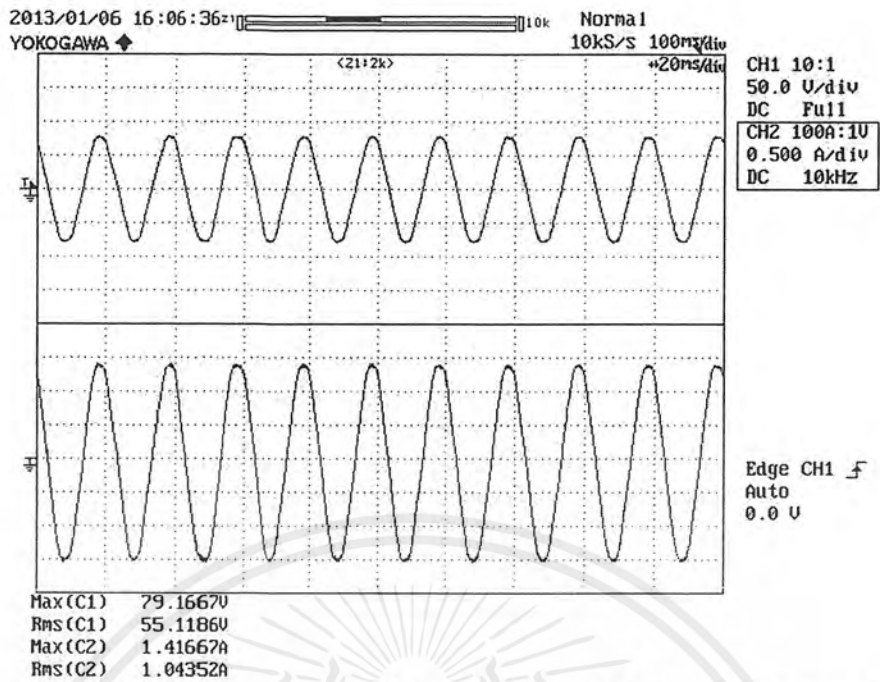


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

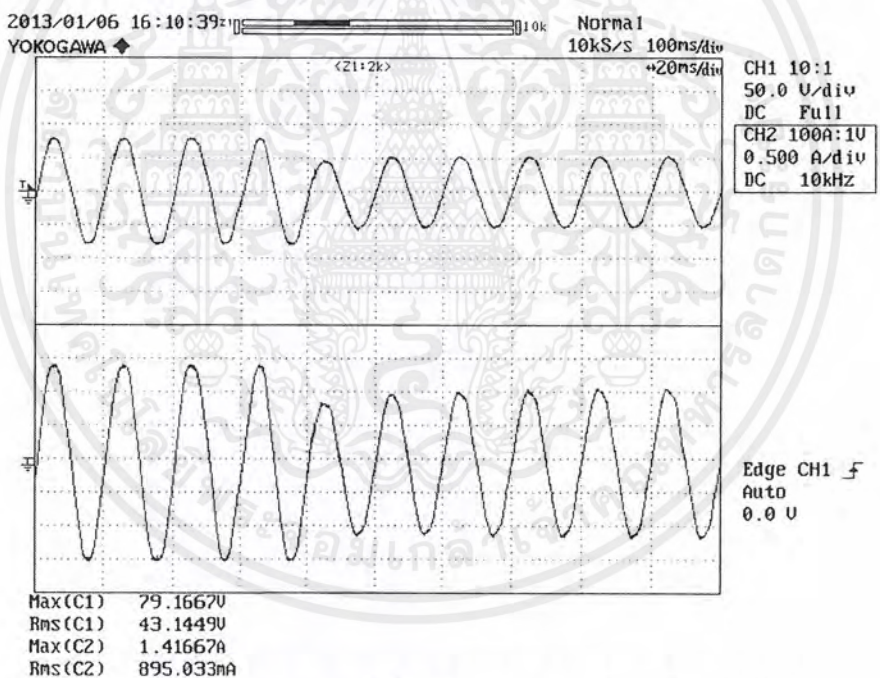


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ 4.37 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 264 – ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

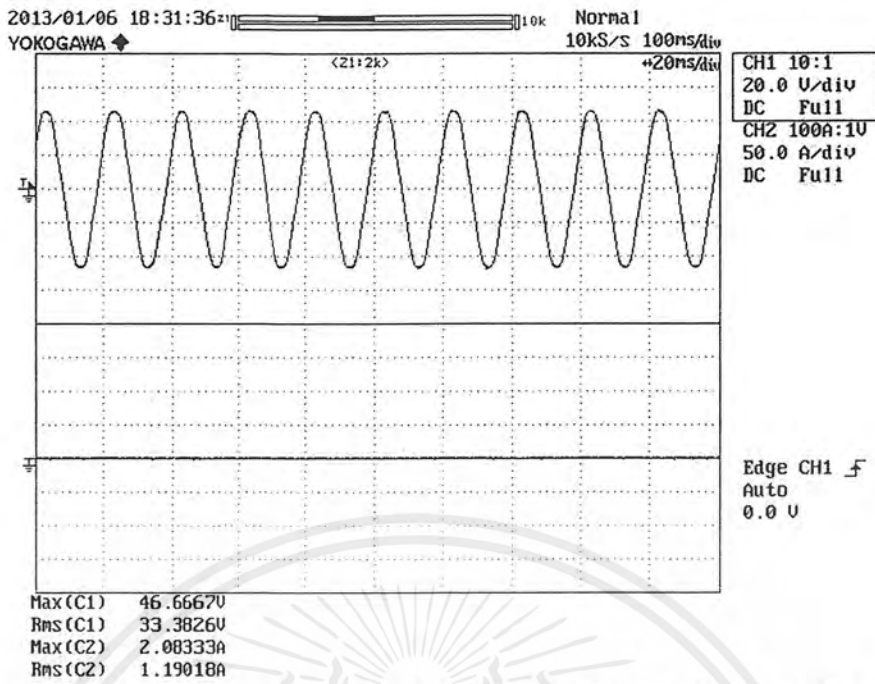


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

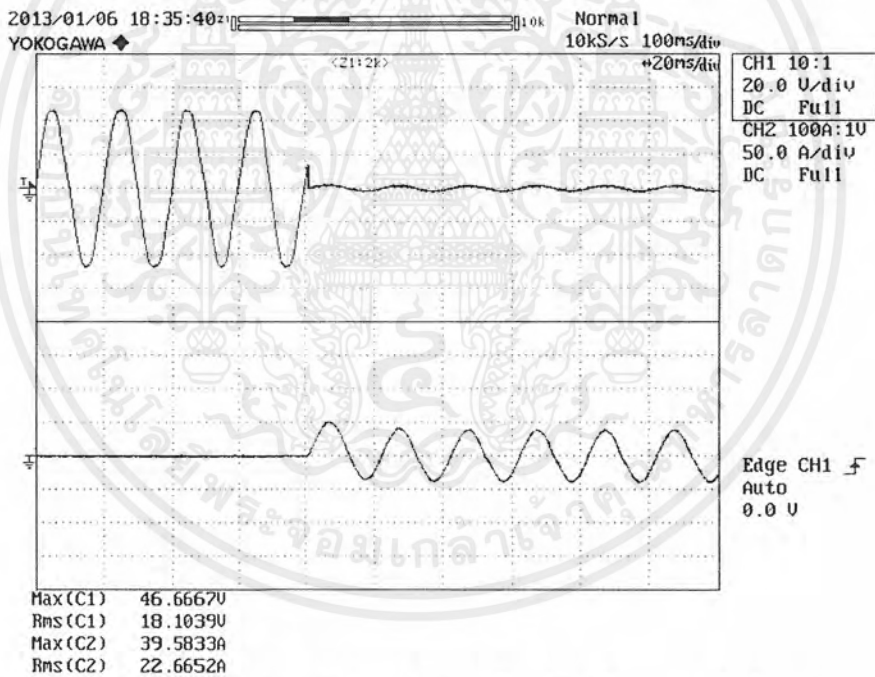


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.37 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 264 - ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

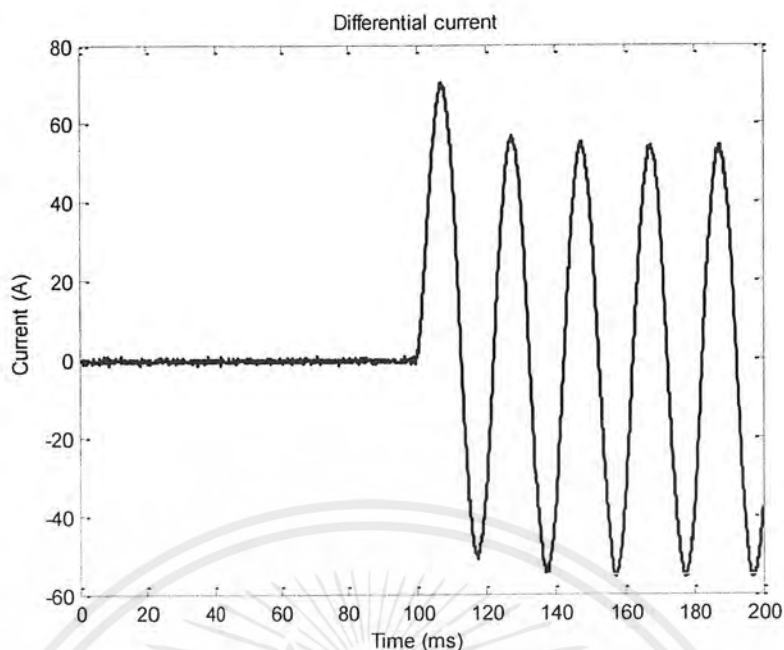


(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร รูปที่ 4.37 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 264 - ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ 4.37 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ตำแหน่ง 264 – ดิน

จากการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่า ขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.37

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.37 (ก) และ (ข) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.14 แอมแปร์ เป็น 43.61 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 27.91 โวลต์ เป็น 22.20 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจากรูปที่ 4.37 (ค) และ (ง) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 1.04 แอมแปร์ เป็น 0.74 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 55.12 โวลต์ เป็น 36.42 โวลต์

เมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรที่ตำแหน่ง 246 – ดิน ดังรูปที่ 4.37 (จ) และ (ฉ) เมื่อทำการลัดวงจร

- ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 43.61 แอมแปร์
- ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 33.38 โวลต์ เป็น 1.27 โวลต์

เมื่อพิจารณากระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร ดังรูปที่ 4.37 (ข)

- ค่ากระแสผลต่างก่อนการทดลองมีค่า 0.06 แอมแปร์
- ค่ากระแสผลต่างหลังการทดลองมีค่า 42.13 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดินที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V

ประเภท ขดลวด	ระดับ แรงดัน หม้อแปลง	โหลด มุม	ปฐมภูมิ				ทุติยภูมิ				ลัดวงจร				กระแสผลต่าง	
			ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน	หลัง
			แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส
44-ดิน	0	28.00	2.13	25.74	10.46	55.34	1.05	49.14	0.89	5.58	0	1.63	44.90	0.03	8.68	
88-ดิน	0	27.94	2.12	25.17	14.57	55.25	1.05	49.14	0.88	11.13	0	1.34	33.88	0.02	17.38	
132-ดิน	0	28.08	2.15	25.03	21.21	55.55	1.05	45.61	0.86	16.77	0	1.06	27.99	0.05	19.49	
176-ดิน	0	28.00	2.15	24.47	24.16	55.36	1.05	43.49	0.84	22.22	0	0.99	23.57	0.05	22.48	
220-ดิน	0	27.89	2.14	26.59	26.81	55.12	1.04	43.49	0.83	27.78	0	0.99	20.63	0.06	25.15	
264-ดิน	0	27.91	2.14	22.20	43.61	55.12	1.04	36.42	0.74	33.38	0	1.27	43.61	0.06	42.13	

จากการทดลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดินที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองก่อน และหลังการลัดวงจร พบว่า

ทางด้านปฐมภูมิ แรงดันไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร กระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งแทขดลวด จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าก่อนการลัดวงจรจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ส่วนหลังการลัดวงจร แรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่กระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ทางด้านทุติยภูมิ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้หลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งแทขดลวด จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

ทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจร แนวโน้มพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าก่อนการลัดวงจรจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่ค่าแอมพลิจูดของแรงดันต่ำกว่า ค่าแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้หลังการลัดวงจรสูงกว่า

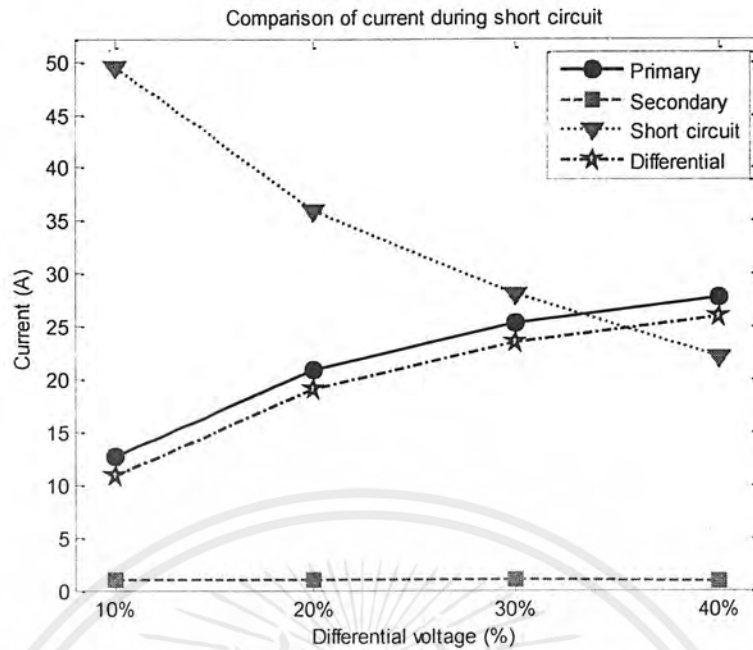
เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งแทขดลวด จะเห็นว่า กระแสผลต่างก่อนการลัดวงจรมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่กระแสผลต่างหลังการลัดวงจรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

## บทที่ 5

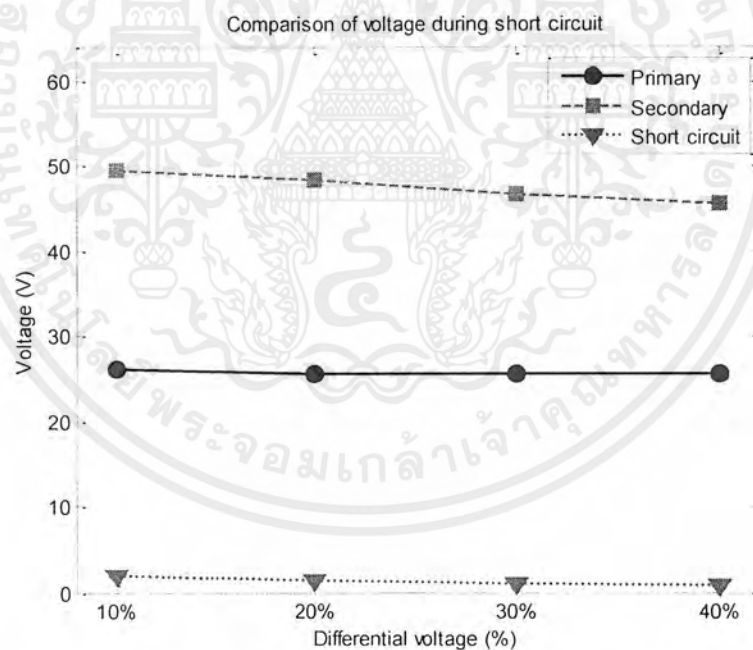
### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาและจัดทำชุดการทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส (PRACTICE EXPERIMENT OF WINDING FAULT WITHIN 1 PHASE TRANSFORMER) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการเกิดความผิดปกติภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ามีราคาสูง อีกทั้งหากเกิดความเสียหายขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า จะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้า นำมาสู่ความสูญเสียทางด้านธุรกิจต่าง ๆ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม โทรคมนาคม การขนส่ง เป็นจำนวนเงินมหาศาล เพราะฉะนั้นนอกจากจะออกแบบระบบไฟฟ้าให้ดีมีเสถียรภาพแล้ว ยังต้องหาทางป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นด้วย การทดลองนี้จึงทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดการลัดวงจร ตลอดจนแนวโน้มความรุนแรงของกระแสลัดวงจร เพื่อนำไปสู่การออกแบบการป้องกันระบบไฟฟ้าต่อไป

จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เห็นความสำคัญของการเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า โครงการนี้จึงได้ทำการทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส พิกัดขนาด 15 kVA พิกัดแรงดันไฟฟ้า 220/440 โวลต์ ที่ทำการแหบขดลวดด้านไฟฟ้าแรงดันสูงทุก ๆ 10 % หรือทุก ๆ 44 โวลต์ ขึ้นโดยใช้ชุดการทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ที่ได้ทำการออกแบบสำหรับการทำการลัดวงจร เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์การทดลอง และผู้ทำการทดลอง ได้ผลการทดลองดังแสดงในบทที่ 4 จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อทำการทดลองโดยแหบขดลวดที่แรงดันต่างกันเพิ่มขึ้น จาก 10 เปอร์เซ็นต์ เป็น 20, 30, 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปด้านล่าง

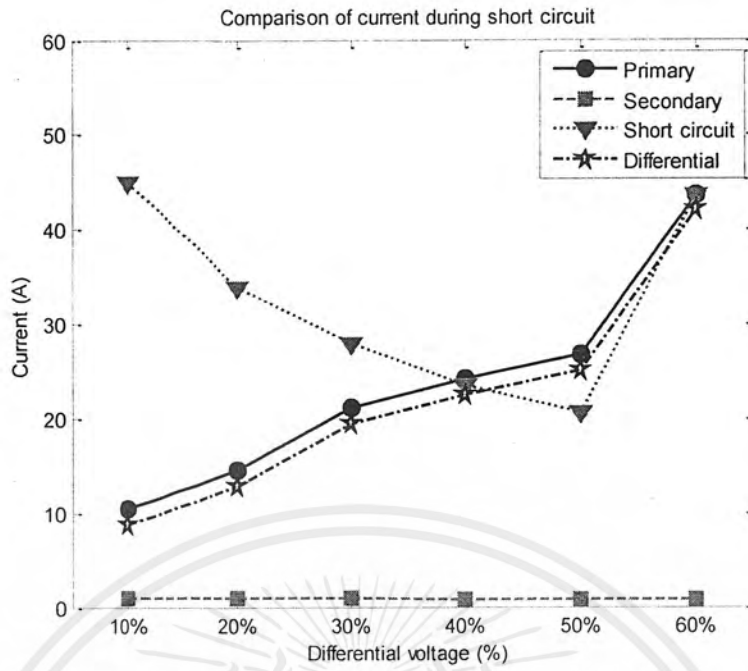


รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V  
 แอปขดลวดที่แรงดันต่างกัน 10 %, 20 %, 30% และ 40%

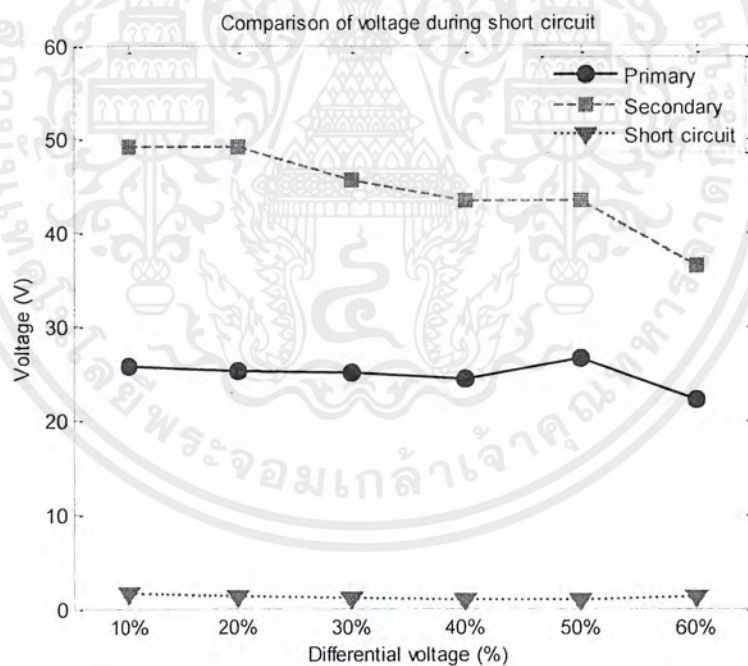


รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าหลังการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V  
 แอปขดลวดที่แรงดันต่างกัน 10 %, 20 %, 30% และ 40%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดินที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V  
 แทปขดลวดที่แรงดันต่างกัน 10 %, 20 %, 30%, 40%, 50% และ 60%



รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าหลังการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดินที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V  
 แทปขดลวดที่แรงดันต่างกัน 10 %, 20 %, 30%, 40%, 50% และ 60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ซึ่งทำการลัดวงจรระหว่างขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V เมื่อทำการเพิ่มตำแหน่งระหว่างขดลวดที่ทำการลัดวงจรให้ต่างกัน 10%, 20%, 30% และ 40% พบว่า กระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิมีแนวโน้มสูงขึ้น ทางด้านทุติยภูมิ มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรมีแนวโน้มลดลง และกระแสผลต่างหลังการลัดวงจรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าหลังการลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ส่วนทางด้านทุติยภูมิ และทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

จากรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 ซึ่งทำการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดินที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V เมื่อทำการเพิ่มตำแหน่งระหว่างขดลวดกับดินที่ทำการลัดวงจรให้ต่างกัน 10%, 20%, 30%, 40%, 50% และ 60% พบว่า กระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าที่ตำแหน่ง 50% ค่ากระแสไฟฟ้าจะมีแนวโน้มพุ่งขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว ทางด้านทุติยภูมิ มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ทางด้าน ทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรมีแนวโน้มลดลงจนถึงตำแหน่งที่ 50% แล้วจะมีค่าพุ่งขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว และ กระแสผลต่างหลังการลัดวงจรมีแนวโน้มคล้ายกับทางด้านปฐมภูมิ เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าหลัง การลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่จะมีค่าพุ่งสูงขึ้นเล็กน้อยที่ตำแหน่ง 50% ทางด้าน ทุติยภูมิมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน และทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรมีแนวโน้มลดลง

ผลการทดลองในปฏิญานพจน์นี้ได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจรภายใน หม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งทางด้านปฐมภูมิ ทางด้านทุติยภูมิ ทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจร รวมไปถึงกระแส ผลต่าง ซึ่งจากการทดลองทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของการเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า ความรุนแรงของกระแสลัดวงจร สามารถนำไปใช้ในการออกแบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า และสามารถ นำไปใช้ในการออกแบบระบบป้องกันได้ต่อไป

#### ข้อเสนอแนะ

1. ในการทำการทดลองมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถทำการทดลองที่พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟ อุปกรณ์ป้องกัน และเครื่องมือวัด ไม่สามารถทนกระแสลัดวงจรได้ จึงต้องทำการ ทดลองที่ 12.5% ของแรงดันพิกัด หากต้องการทำการทดลองที่พิกัดของหม้อแปลงสูงกว่านี้ ควรหา อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่มีพิกัดสูงกว่านี้มาใช้ในการทำการทดลอง

2. ในการทดลองได้ทำการควบคุมมุมเริ่มต้นในการลัดวงจร โดยใช้ชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุม มุมเริ่มต้นการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ที่มุมต่าง ๆ แต่ในการทดลองอาจมีความคาดเคลื่อน เนื่องจาก มีการหน่วงเวลาของแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor) ที่ไม่คงที่ ทำให้ใน บางครั้งที่ทำการทดลอง มุมเริ่มต้นในการลัดวงจรไม่เป็นไปตามต้องการ ควรหาอุปกรณ์ที่มีความคงที่ของ เวลาในการหน่วงเวลา มาแทนแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Hesham B. Elrefaie, and Ashraf I. Megahed, "Modeling Transformer Internal Faults Using Matlab," *IEEE MELECON Electrotechnical Conference*, 2002, pp. 226-230.
- [2] X.wang, M.Summer and D. W. P. Thomas, "Simulation of single-phase nonlinear and hysteretic transformer with internal faults," 2006.
- [3] S. Liu, Z. Liu, and O. A. Mohammed, Fellow, IEEE, "FE-Based Modelling of Single-Phase Distribution Transformers With Winding Short Circuit Faults," *IEEE Transactions On Magnetics*, 2007, Vol. 43, No. 4.
- [4] Karen L. Butler, Member, IEEE and Adedayo Kuforiji, Student Member, IEEE, "Experimental Results from Short-Circuit Faults on a Distribution Transformer," 2001, pp. 299-306.
- [5] Peter Palmer-Buckle, Karen L. Butler, PE, N.D.E. Sarma, and Alvin Kopp, "Simulation of Incipient Transformer Faults," *Circuits and Systems, 1998 Midwest Symposium*, 1998, pp. 50-53.
- [6] Karen L. Butler-Purry, Mustafa Bagriyanik, Mirrasoul J. Mousavi, and Peter Palmer-Buckle, "Experimental Investigation of Internal Short Circuit Faults Leading to Advanced Incipient Behavior and Failure of a Distribution Transformer," *IEEE Power Systems Conference and Exposition (PES)*, 2004, pp. 1407-1416.
- [7] Peter Palmer-Buckle, Karen L. Butler, and N. D. R. Sarma, "Characteristics of Transformer Parameters During Internal Winding Faults Based on Experimental Measurements," *IEEE Transmission and Distribution Conference*, 1999, pp. 882-887.
- [8] Karen L. Butler-Purry, and Mustafa Bagriyanik, "Identifying Transformer Incipient Events for Maintaining Distribution System Reliability," *IEEE System Sciences Hawaii International Conference (HICSS'03)*, 2002.
- [9] R. S. Bhide, M. S. S. Srinivas, A. Banerjee, and R. Somakumar, "Analysis of Winding Inter-turn Fault in Transformer: A Review and Transformer Models," *IEEE Sustainable Energy Technologies (ICSET) 2010*, 2010, pp. 1-7.
- [10] James H. Harlow, *Electrical Power Transformer Engineering*, CRC Press, 2004.
- [11] S. V. Kulkarni, and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering Design and Practice*, Taylor & Francis, 2004.
- [12] Irving M. Gottlieb, *Practical Transformer Handbook*, Newnes, 1998.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] Martin J. Heathcote, *The J & P Transformer Book: Practical Technology of the Power Transformer*, 12<sup>th</sup> Edition, Newnes, 1998.
- [14] รศ.สัมพันธ์ หาญขเล, *เครื่องกลไฟฟ้า 1 Electrical Machine 1*, เล่มที่ 1. กรุงเทพฯ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2519.
- [15] Stephen L. Herman, *Electrical Transformer & Rotating Machines*, New York, Delmar Publisher an International Thomson Publishing company, 1999.
- [16] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, *Electric Machinery Fifth Edition*, Singapore, McGraw-Hill, 1991.
- [17] Hadi Saadat, *Power System Analysis*, 2<sup>nd</sup> Edition, McGrawHill, 2004.
- [18] ไพโรจน์ ตีชื่น, “การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งโดยใช้ข้อมูลการทดสอบ,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [19] ไสว ฐานีพานิชสกุล, *หม้อแปลง*, กรุงเทพฯ, พันนี้ พับลิชชิ่ง, 2525.
- [20] ดุยพรรณ นวลหงษ์, *การคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันตก*, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- [21] ABB, *Technical Application Papers*, Italy, ABB SACE, 2008.
- [22] Ahmed Safie Eldin, *PIPSPC Practical Introduction to Power System Protection and Control*, 2005.


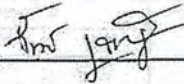
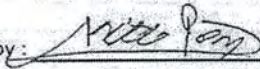


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

รายงานการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Test Report)

ขนาด 15 kVA Serial No. 5512742

		516 หมู่ 4 นิคมอุตสาหกรรมบางปู ต.แพรกษา อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10280 516 M.4 Bangpoo Industrial Estate, Samutprakarn 10280 Tel. 02 - 7697699 , 02 - 7094490 - 9 <a href="http://www.tirathai-transformer.co.th">http://www.tirathai-transformer.co.th</a>																										
Lab. 1	<b>TRANSFORMER WITNESS TEST REPORT</b>		Sheet 1 / 2																									
<b>Customer</b>		สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง																										
<b>Transformer</b>	15 kVA 1 Phase 50 Hz 352 - 220 V																											
<b>Tapping range</b>	+/-2 X 12.5 %																											
<b>Cooling type</b>	AN																											
<b>Vector group</b>	Subtractive																											
<b>Serial No.</b>	5512742																											
<b>Manufacturer</b>	TIRATHAI PUBLIC COMPANY LIMITED																											
<b>Applied standard</b>	IEC 60076																											
<b>Control No.</b>	FG55-00122 - 01																											
<b>Receipt date</b>	11 / 08 / 2012																											
<b>Test date</b>	11 / 08 / 2012																											
<b>Issue date</b>	11 / 08 / 2012																											
<b>Results of tests :</b>																												
<input checked="" type="checkbox"/>	Ratio for all taping is within limited tolerance of $\pm 0.5$ %																											
<input checked="" type="checkbox"/>	The result of winding resistance are used for further calculations and are for information only																											
<input checked="" type="checkbox"/>	Test object has withstood dielectric routine tests																											
<input checked="" type="checkbox"/>	Insulation resistance at temperature 20 °C must be > 400 M $\Omega$																											
<input type="checkbox"/>	All test result are within technical limited tolerance																											
<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>Summary referred to 75 °C at principal tap : 3</th> <th>Test result</th> <th>Guarantee</th> <th>Deviation</th> <th>Tolerance</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Short - circuit impedance</td> <td>5.83 %</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>No - load loss</td> <td>0.078 kW</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Load loss</td> <td>0.405 kW</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Total loss</td> <td>0.483 kW</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>				Summary referred to 75 °C at principal tap : 3	Test result	Guarantee	Deviation	Tolerance	Short - circuit impedance	5.83 %	-	-	-	No - load loss	0.078 kW	-	-	-	Load loss	0.405 kW	-	-	-	Total loss	0.483 kW	-	-	-
Summary referred to 75 °C at principal tap : 3	Test result	Guarantee	Deviation	Tolerance																								
Short - circuit impedance	5.83 %	-	-	-																								
No - load loss	0.078 kW	-	-	-																								
Load loss	0.405 kW	-	-	-																								
Total loss	0.483 kW	-	-	-																								
Witnessed by: 		Observed by: 																										
The above results are valid exclusively for test samples as mention in this report Publicity of the test reports except in full is prohibited unless written permission is obtained from the governor of TIRA THAI laboratory.																												



516 หมู่ 4 นิคมอุตสาหกรรมบางปู ต.เทพราชา อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10280  
 516 M.4 Bangpoo Industrial Estate, Samutprakarn 10280  
 Tel. 02 - 7697699 , 02 - 7094490 - 9 http://www.tirathai-transformer.co.th

Lab.1

## TRANSFORMER WITNESS TEST REPORT

Sheet  
2 / 2

Serial No. : 5512742

Cotrol No. : FG55-00122 - 01

Environment conditions

Ambient Temperature 32 °C

Relative Humidity 58 %

1. Applied Voltage Withstand Test IEC 60076-3	Supplied	HV winding	with	3 kV	50 Hz	60 sec.	Withstood
	Supplied	LV winding	with	3 kV	50 Hz	60 sec.	Withstood
2. Induce Voltage Withstand Test IEC 60076-3	Supplied	LV winding	with	0.704 kV	200 Hz	30 sec.	Withstood
	Induce	HV winding	with	0.704 kV	200 Hz	30 sec.	Withstood

## 3. Insulation Resistance Test : IEEE C57.12.90

Temperature	Test Voltage	Time	Unit	HV - LV	HV - G	LV - G	Core-Clamp	Core - G	Clamp - G
20 °C	1000 V	1 Min	M-Ohm	103	287	169	-	-	-

## 4. Voltage Ratio Measurement and Check of Phase displacement IEC 60076-1

Tap	Rated Voltage		Rated Ratio	Deviation (%)		
	HV	LV		Phase 1	Phase 2	Phase 3
1	440	220	2.00	+0.02		
2	396	220	1.80	+0.02		
3	352	220	1.60	+0.03		
4	308	220	1.40	+0.05		
5	264	220	1.20	+0.08		
6	220	220	1.00	+0.16		
7	176	220	1.25	+0.18		
8	132	220	1.67	+0.28		
9	88	220	2.50	+0.01		
10	44	220	5.00	+0.03		

Polarity Check : Subtractive

## 5. Measurement of Winding Resistance : IEC 60076-1

Average Oil Temperature 32 °C

	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Tap 4	Tap 5	Tap 6	Tap 7	Tap 8	Tap 9	Tap 10
High Voltage Winding milli-Ohm	132	119	106.1	98.42	80.52	67.45	54.22	40.85	27.7	14.531
Low Voltage Winding	23.84	milli-Ohm								

6. No - Load Loss Test  
IEC 60076-1

F / Hz	U mean	I1	I2	I3	I mean	% I exciting	No - Load Loss
50	220 V	3.12 A	-	-	3.12 A	4.58 %	0.078 kW

## 7. Measurement of Short - Circuit Impedance and Load Loss : IEC 60076-1

Tap Position	Average Oil Temperature 32 °C					Rated Power 15 kVA		Base on --- kVA	
	F / Hz	U mean	I mean	Load Loss	% Imp.Voltage	Calculation to 75 °C		Calculation to 75 °C	
Max. 1	50	11.53 V	34.09 A	0.234 kW	2.62 %	0.281 kW	2.82 %	---	---
Nom. 3	50	20.11 V	42.61 A	0.365 kW	5.71 %	0.405 kW	5.83 %	---	---

## Efficiency and voltage Regulation Calculation at Rated Power

Tap	Characteristics			Voltage Regulation (%) at PU = 1.0		Efficiency at PF = 1.0			
	%Z	%R	%X	PF = 1.0	PF = 0.8	pu = 1.0	pu = 0.75	pu = 0.50	pu = 0.25
3	5.83	2.700	5.169	2.83	5.29	96.88	97.35	97.67	97.32

Date : 11 / 08 / 2012

Tested By :

Checked By :

The above results are valid exclusively for test samples as mention in this report  
 Publicity of the test reports except in full is prohibited unless written permission is obtained from the governor of TIRA THAI laboratory.

Rev. 1 March 27 , 2012

TF-T1-501

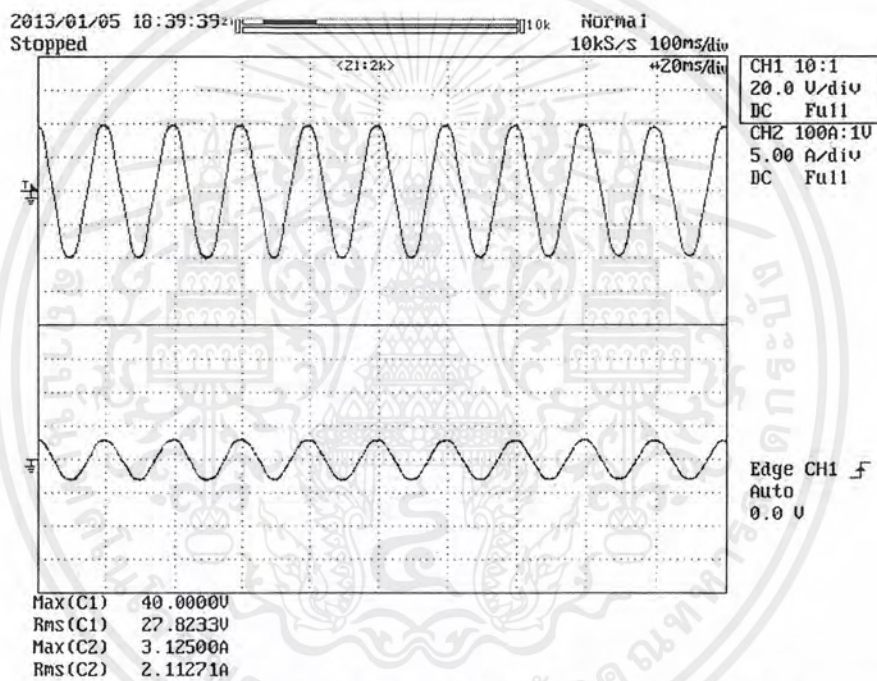
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

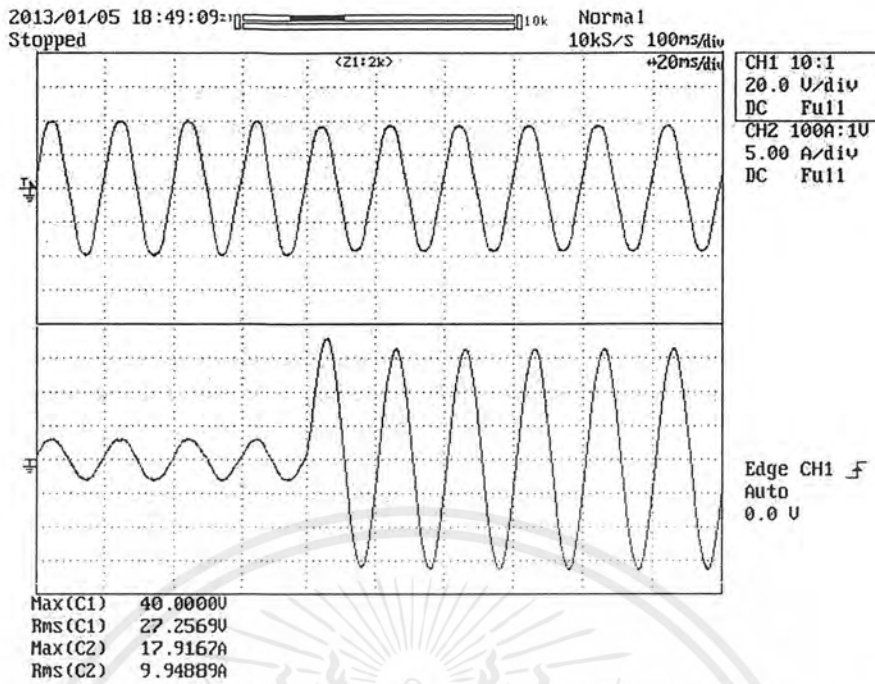
### การลัดวงจรโดยการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า

การทำการทดลองการลัดวงจรโดยการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า ได้ทำการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 จ่ายโหลดที่ 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา โดยการทดลองกรณีนี้จะทำการเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ 27.5/55 โวลต์ 55/110 โวลต์ และ 82.5/165 โวลต์ เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นว่าการเปลี่ยนแรงดันจะมีผลต่อกระแสลัดวงจรหรือไม่ ซึ่งผลจากการทดลองเป็นดังนี้

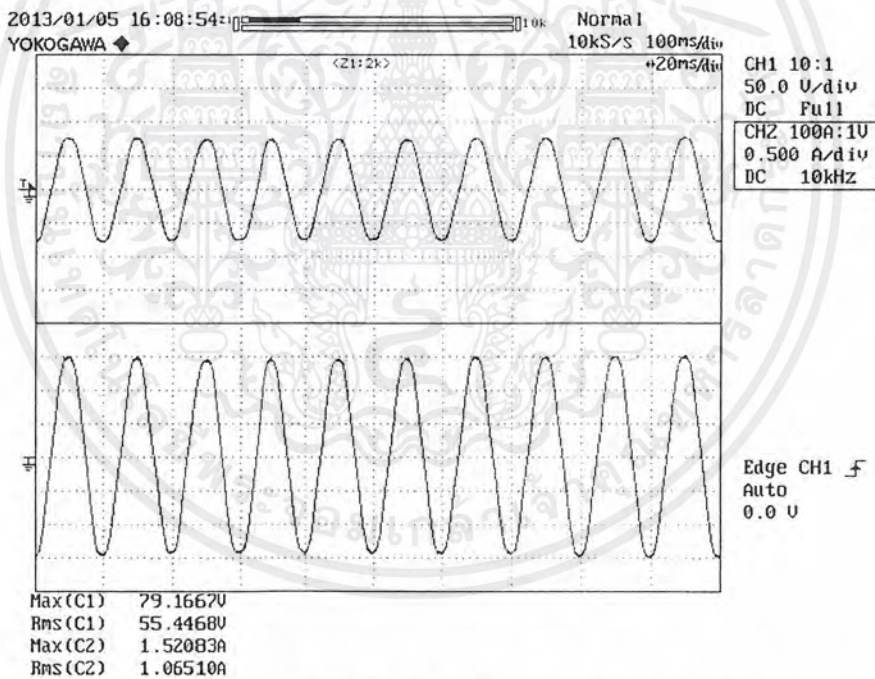
#### ข.1 ระดับแรงดันไฟฟ้า 27.5/55 โวลต์



(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจรรูปที่ ข.1 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 27.5/55 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา



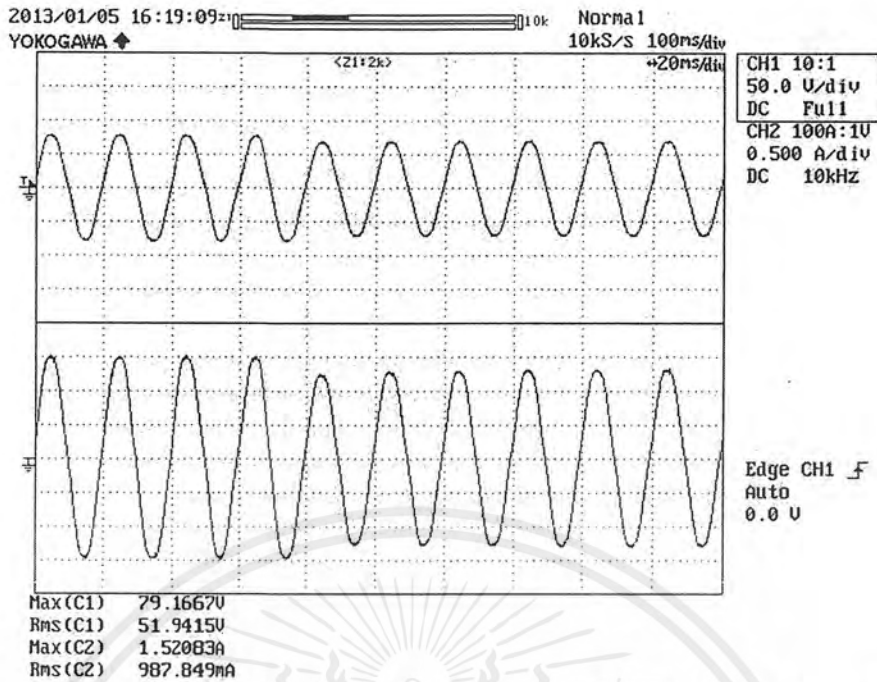
(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร



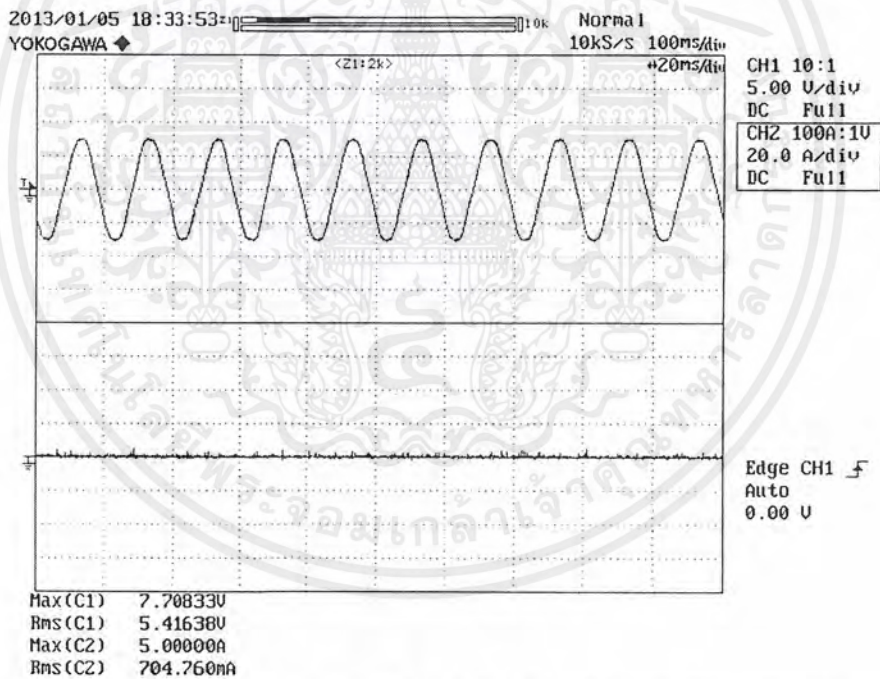
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

รูปที่ ข.1 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 27.5/55 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



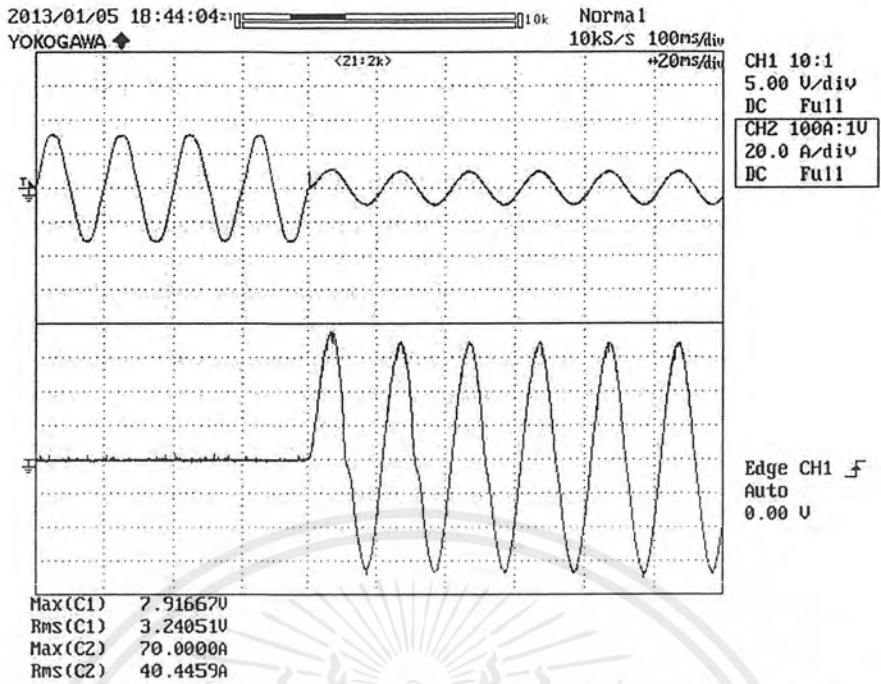
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร



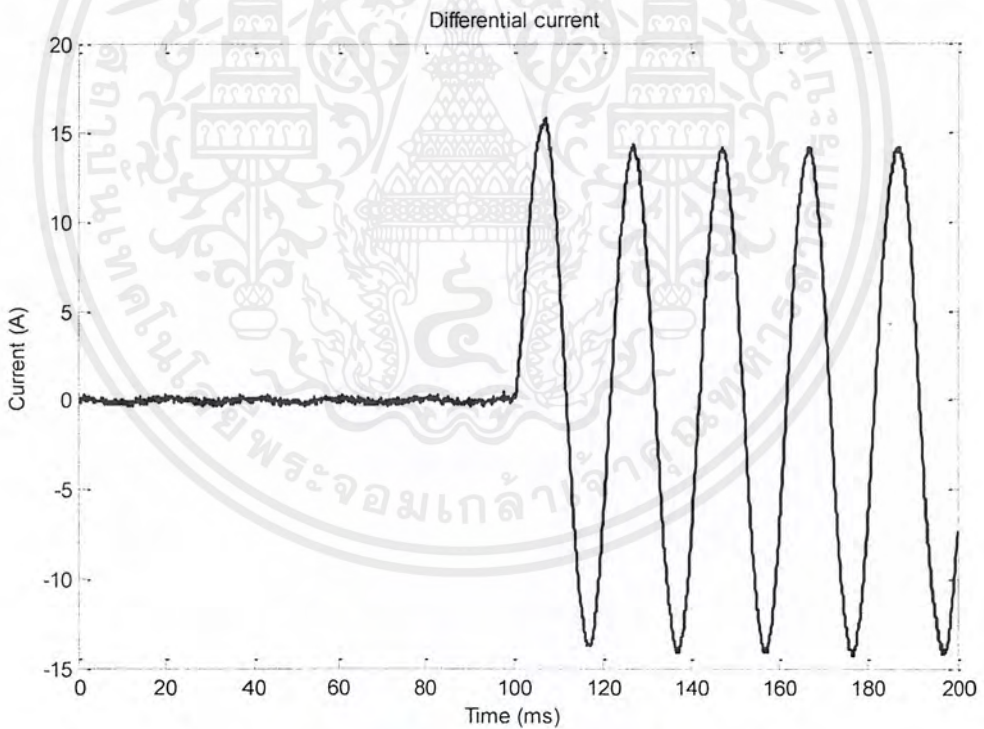
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

รูปที่ ข.1 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 27.5/55 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

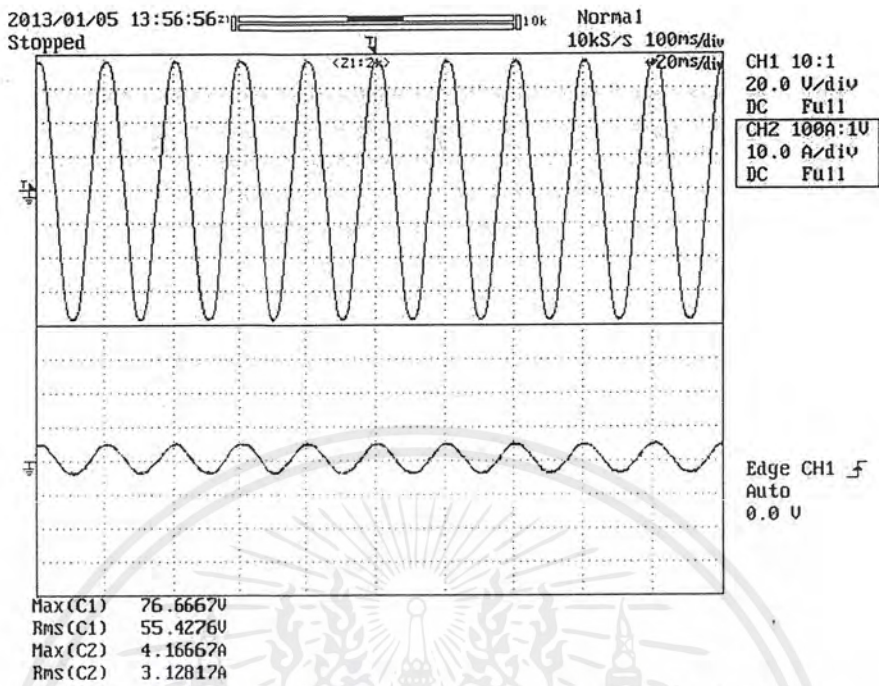


(ช) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

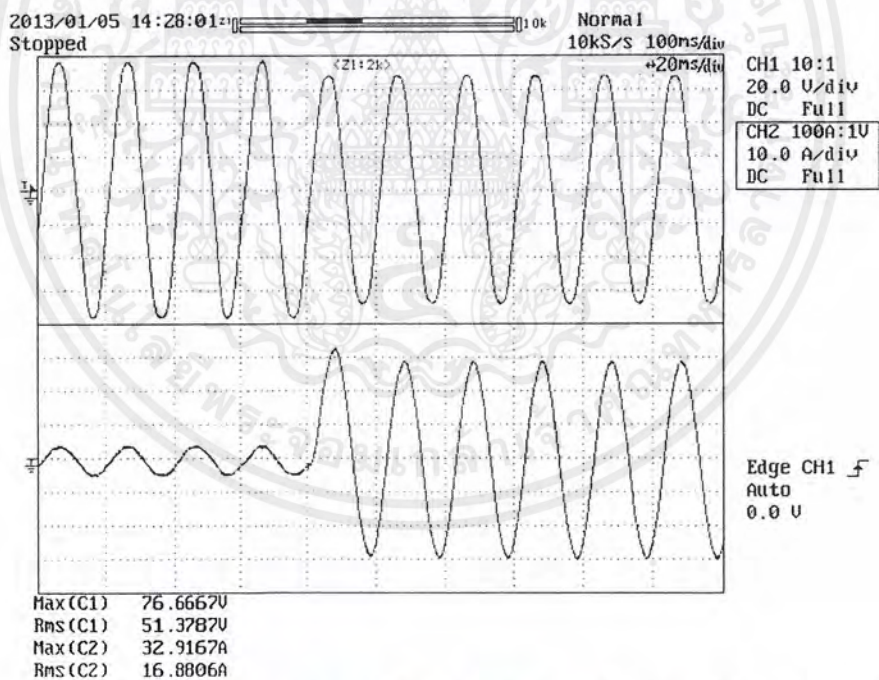
รูปที่ ข.1 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 27.5/55 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข.2 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์

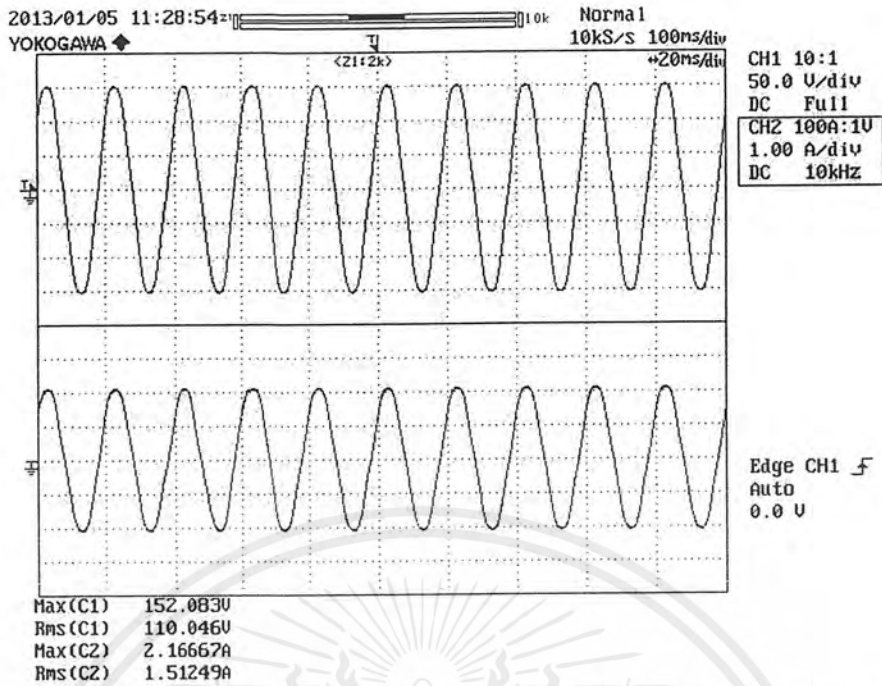


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

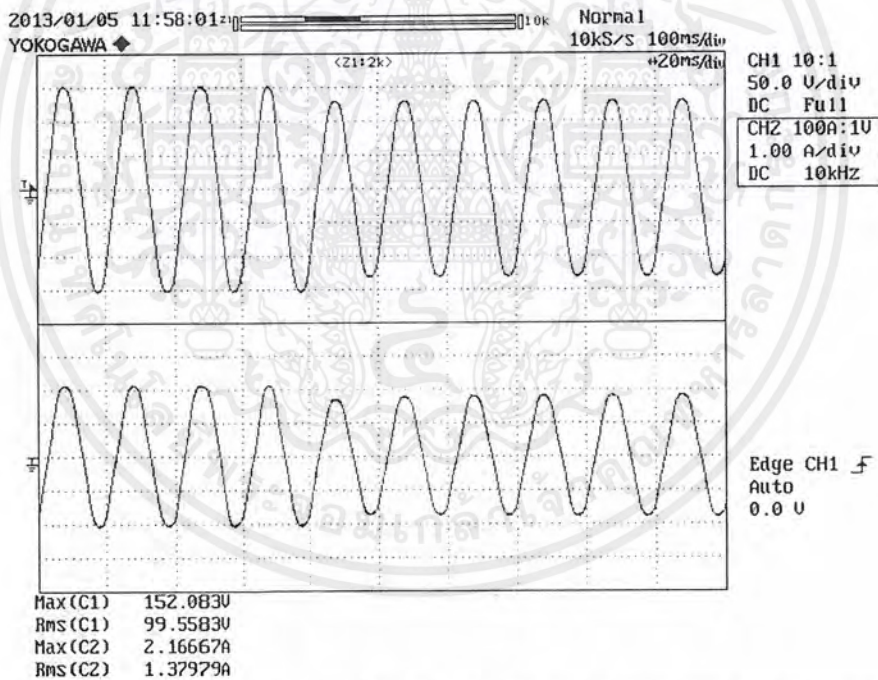


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ ข.2 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



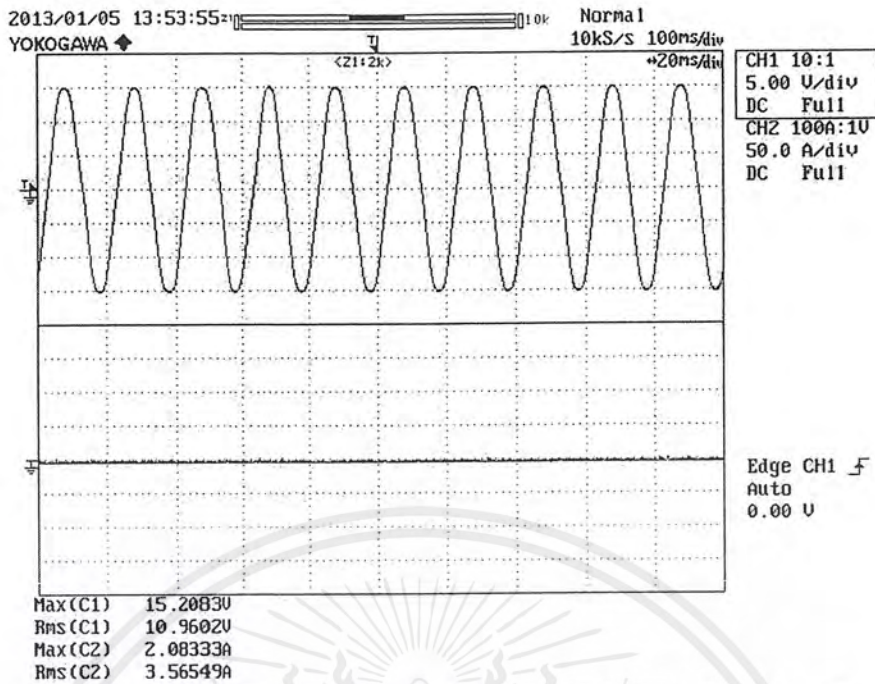
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



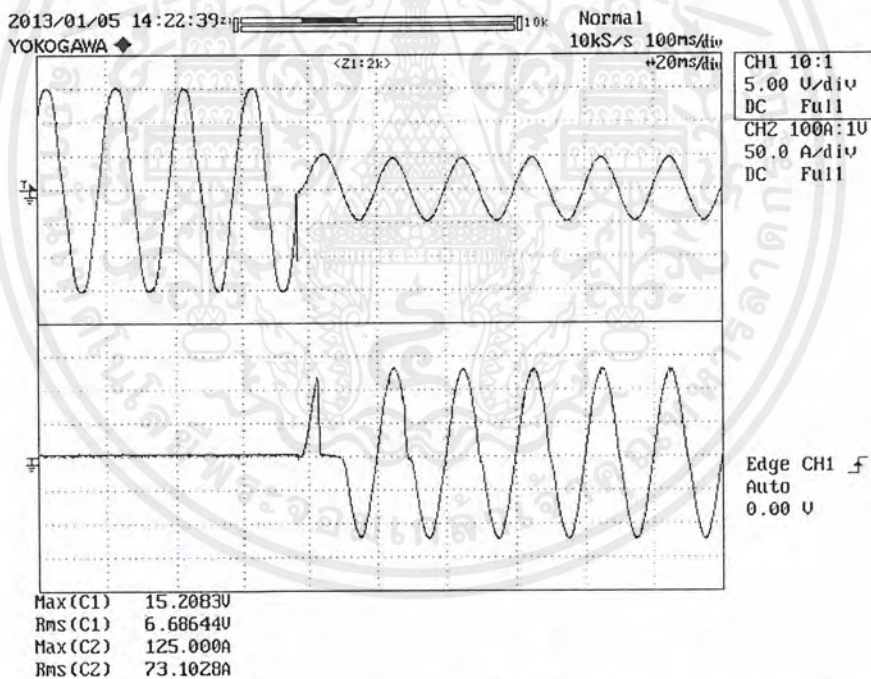
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ข.2 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



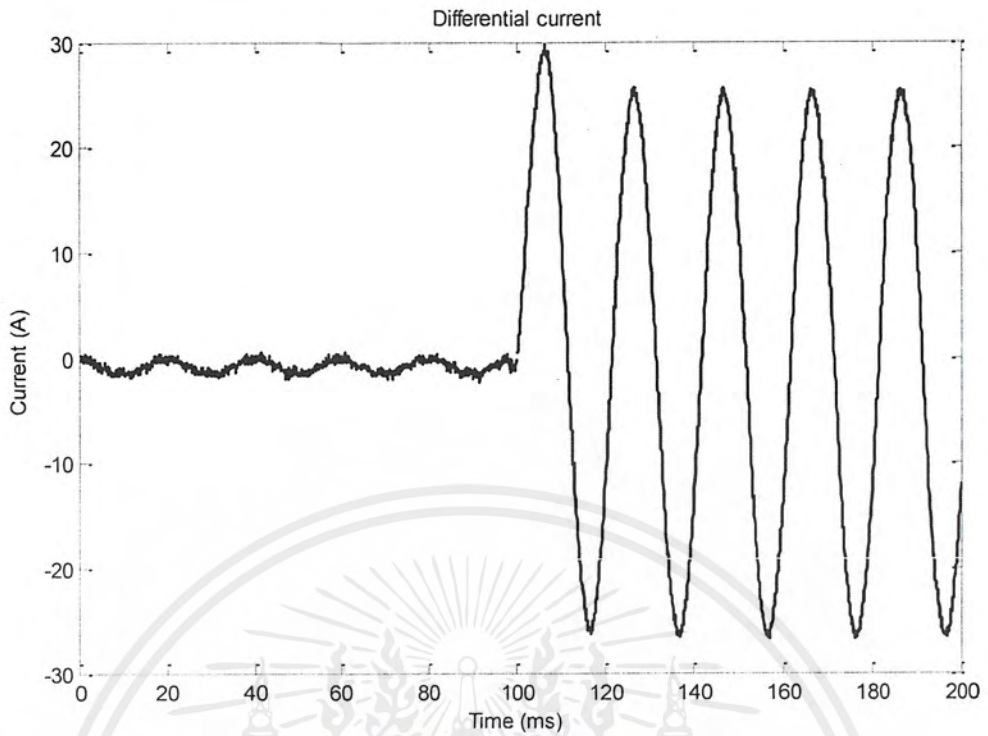
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ข.2 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

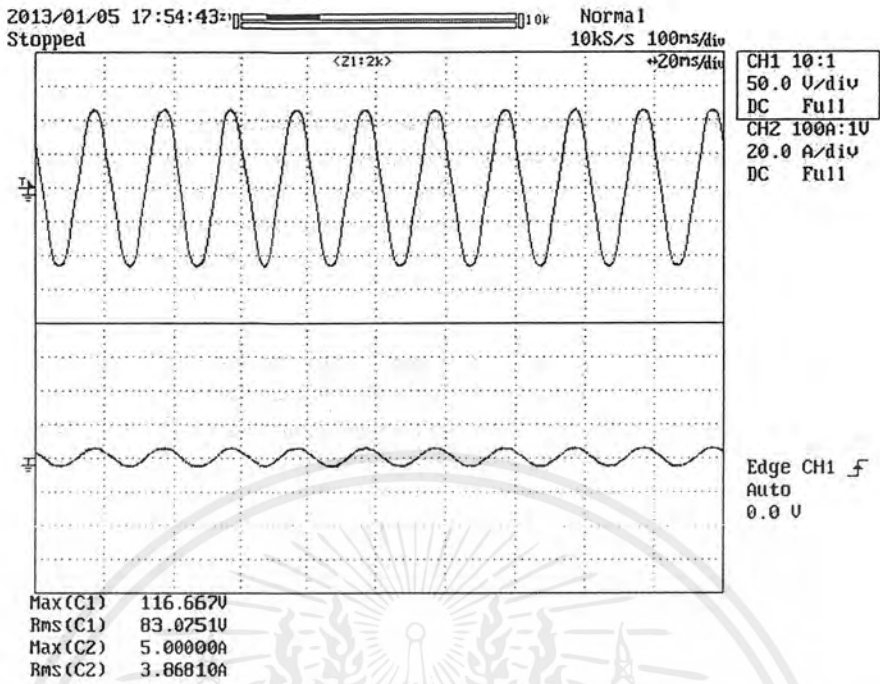


(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

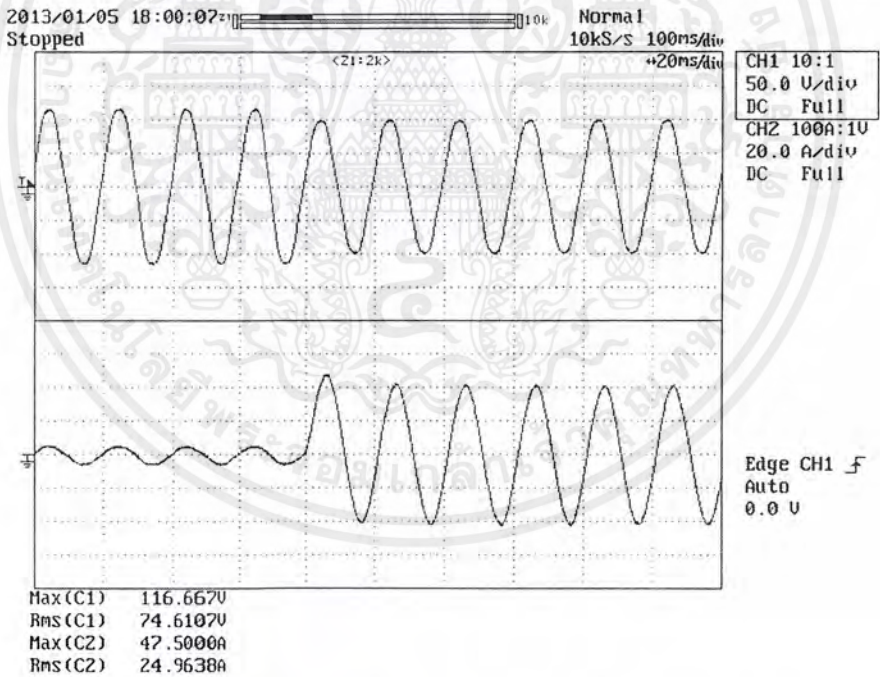
รูปที่ ข.2 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 ระดับแรงดันไฟฟ้า 82.5/165 โวลต์

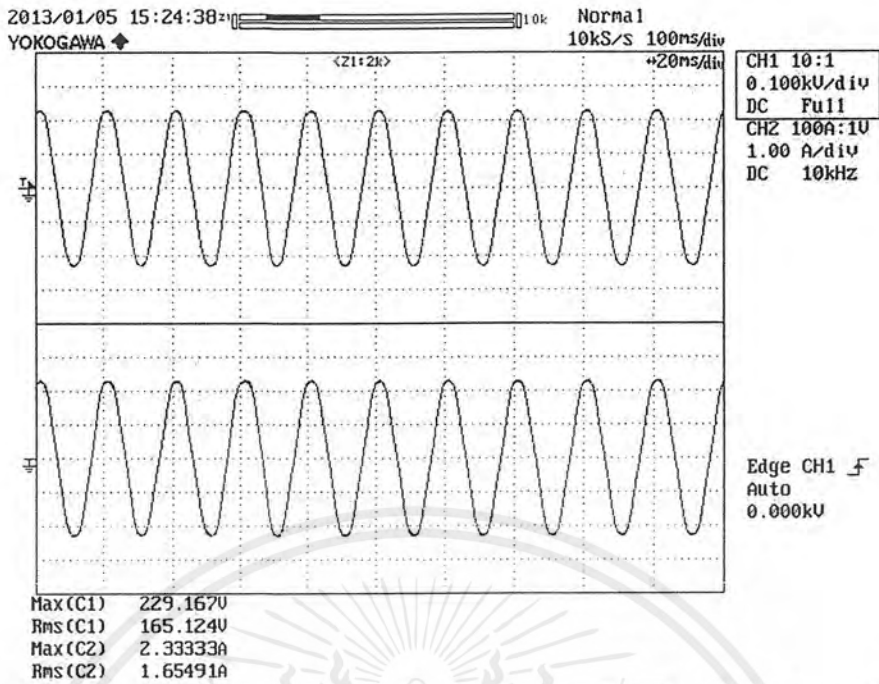


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

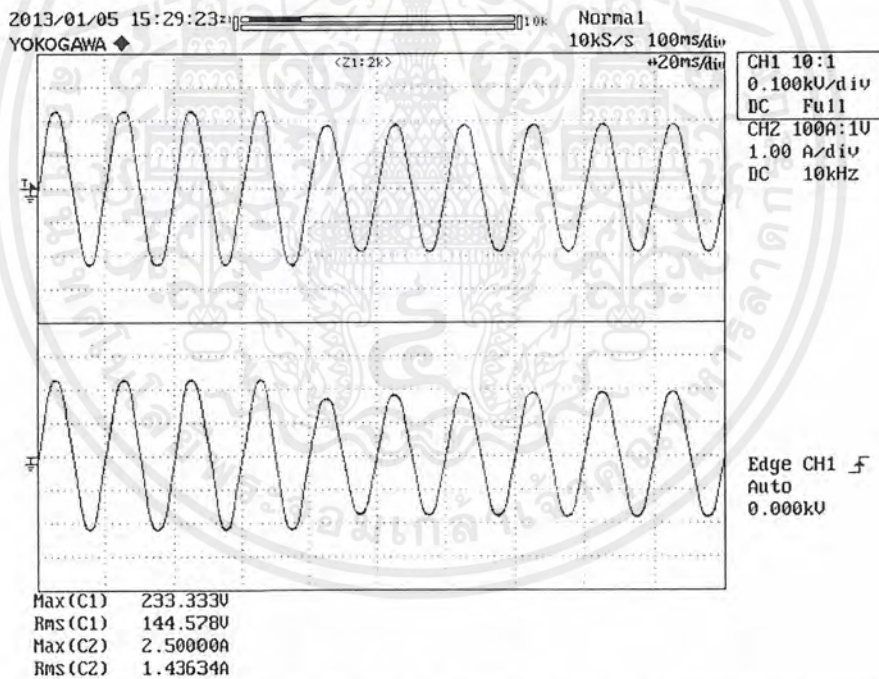


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ ข.3 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 82.5/165 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



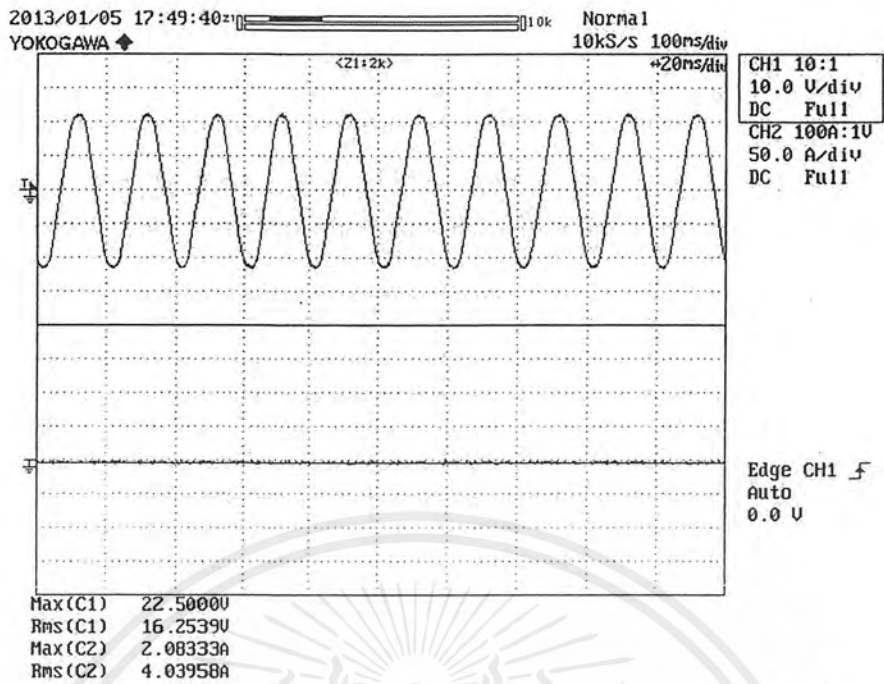
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



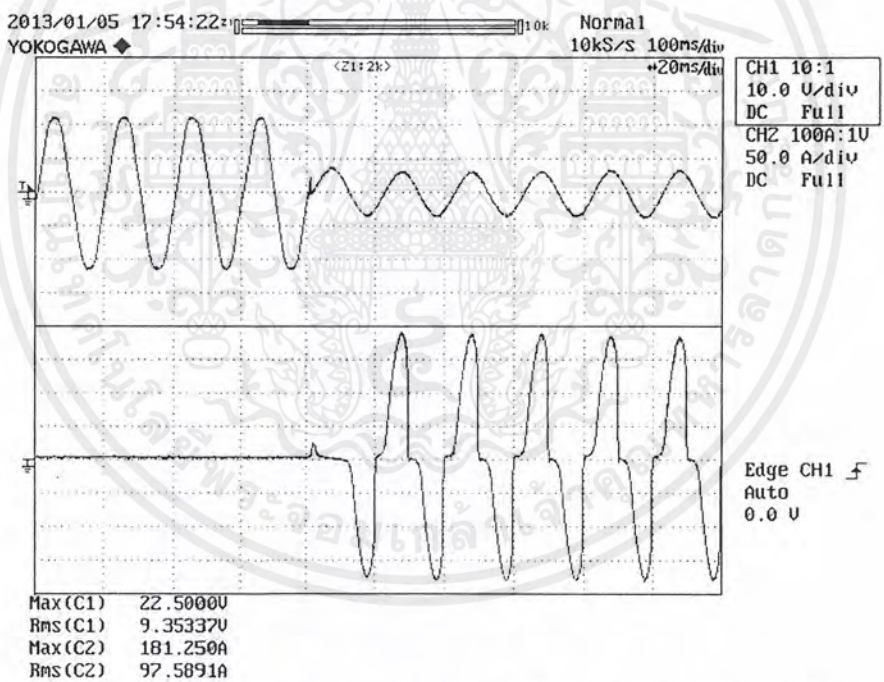
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ข.3 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซนต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 82.5/165 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



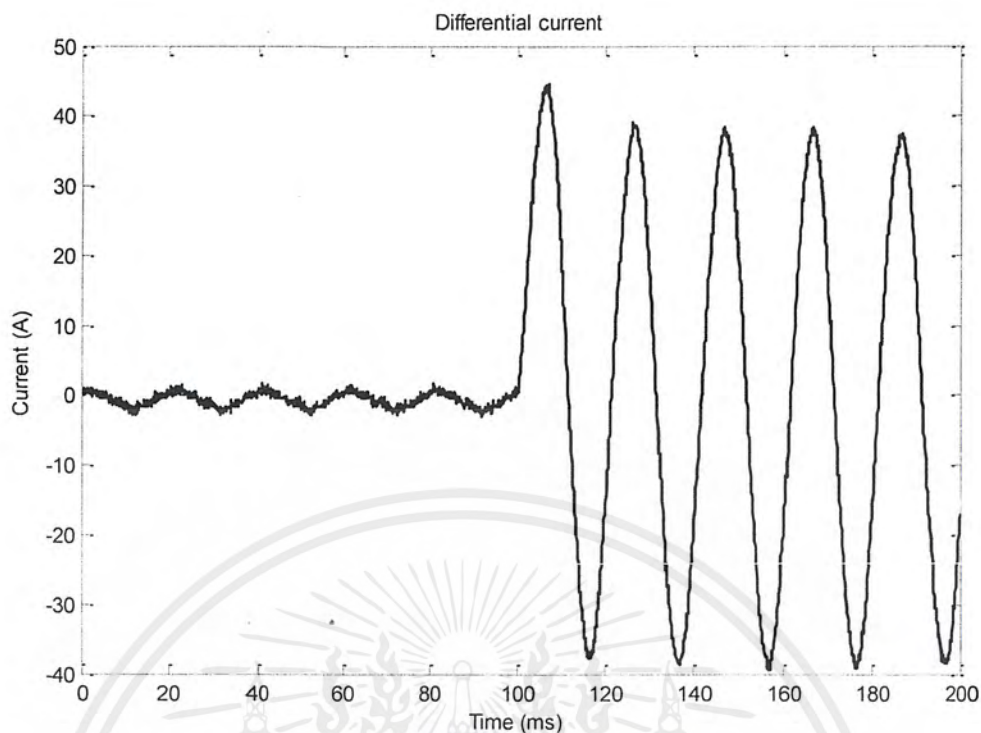
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ข.3 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 82.5/165 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ ข.3 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 82.5/165 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด โดยการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า

ระดับแรงดัน หม้อแปลง	โหลด	มุม		ปฏิกิริยา				ทฤษฎี				ลัดวงจร		กระแสผลต่าง			
		ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน	หลัง		
		แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	ก่อน	หลัง		
44-88	27.5/55 V	56 W	0	27.82	2.11	26.02	12.67	55.45	1.07	49.50	0.93	5.42	0	1.94	49.50	0.03	10.81
44-88	55/110 V	156 W	0	55.43	3.13	48.51	23.28	110.05	1.51	92.63	1.26	10.96	0	3.46	88.39	0.11	20.76
44-88	82.5/165 V	260 W	0	83.08	3.87	70.71	33.59	165.1	1.65	136.47	1.39	16.25	0	4.81	128.16	0.57	30.81

จากการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด โดยการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า แบบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 โหลด 15.4 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองก่อน และหลังการลัดวงจร พบว่า

ทางด้านปฏิกิริยา แรงดันไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร กระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อทำการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็น 27.5/55, 55/110 และ 82.5/165 โวลต์ ตามลำดับ จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ทางด้านทฤษฎี แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อทำการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็น 27.5/55, 55/110 และ 82.5/165 โวลต์ ตามลำดับ จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ทางด้านทฤษฎีในส่วนของลัดวงจร แนวโน้มพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า คล้ายกับทางด้านปฏิกิริยา แต่ค่าแอมพลิจูดของแรงดันต่ำกว่า ค่าแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรสูงกว่า

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็น 27.5/55, 55/110 และ 82.5/165 โวลต์ ตามลำดับ จะเห็นว่า กระแสผลต่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

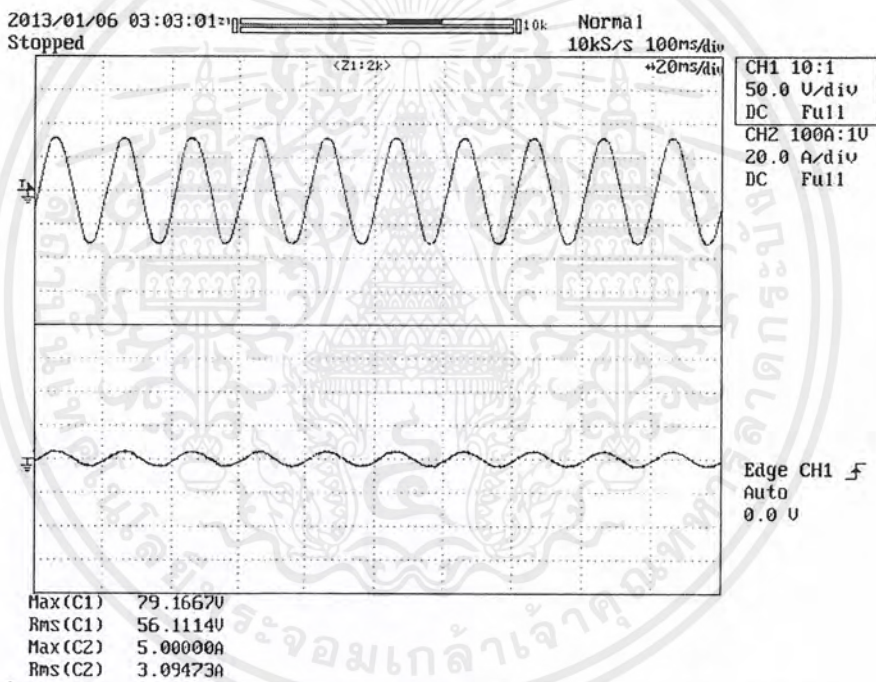
ภาคผนวก ค.

การลัดวงจรโดยการปรับเปลี่ยนโหลด

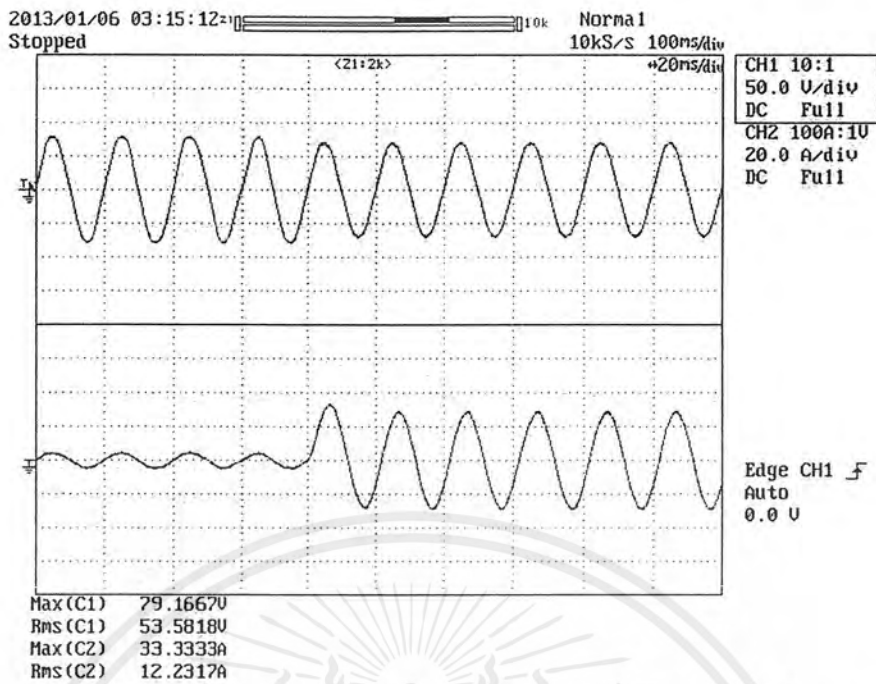
การทำการทดลองการลัดวงจรโดยการปรับเปลี่ยนโหลด ได้ทำการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 มุมเริ่มต้น 0 องศา ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โดยการทดลองกรณีนี้จะทำการเปลี่ยนชนิด และขนาดของโหลด แบ่งเป็น โหลดความต้านทาน (R) และโหลดความต้านทานความเหนี่ยวนำ (RL) เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นว่าขนาด และชนิดของโหลดมีผลต่อกระแสลัดวงจรหรือไม่ ซึ่งผลจากการทดลองเป็นดังนี้

ค.1 กรณีโหลดความต้านทาน

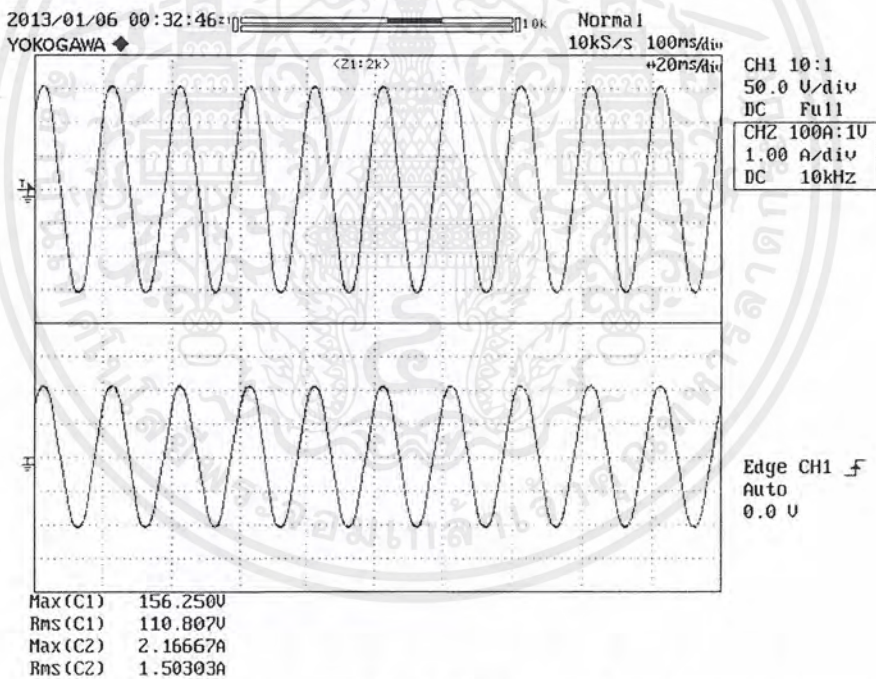
ค.1.1 โหลดความต้านทานขนาด 155 วัตต์



(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร รูปที่ ค.1 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 155 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา



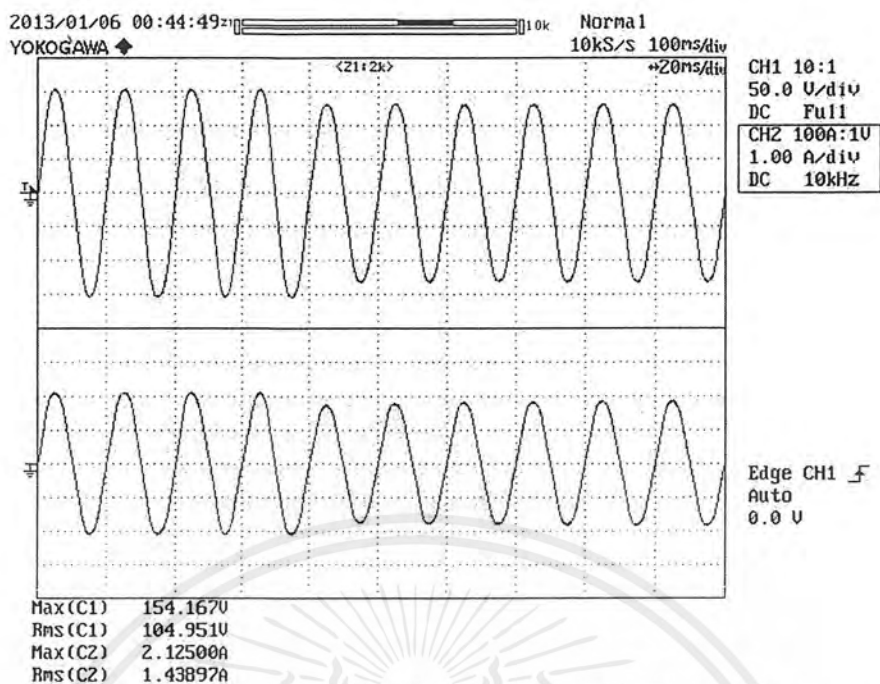
(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร



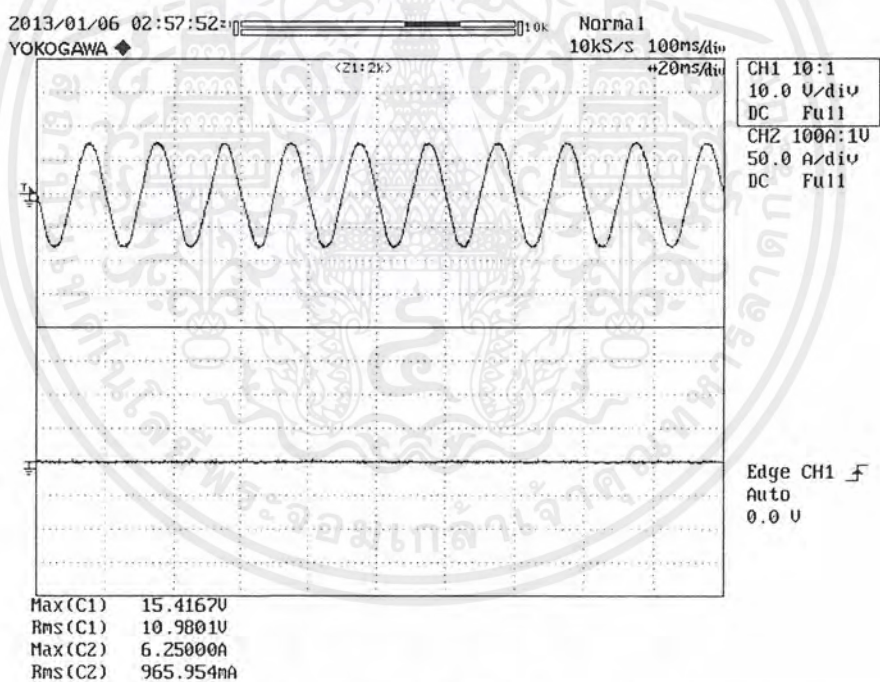
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

รูปที่ ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซนต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 155 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



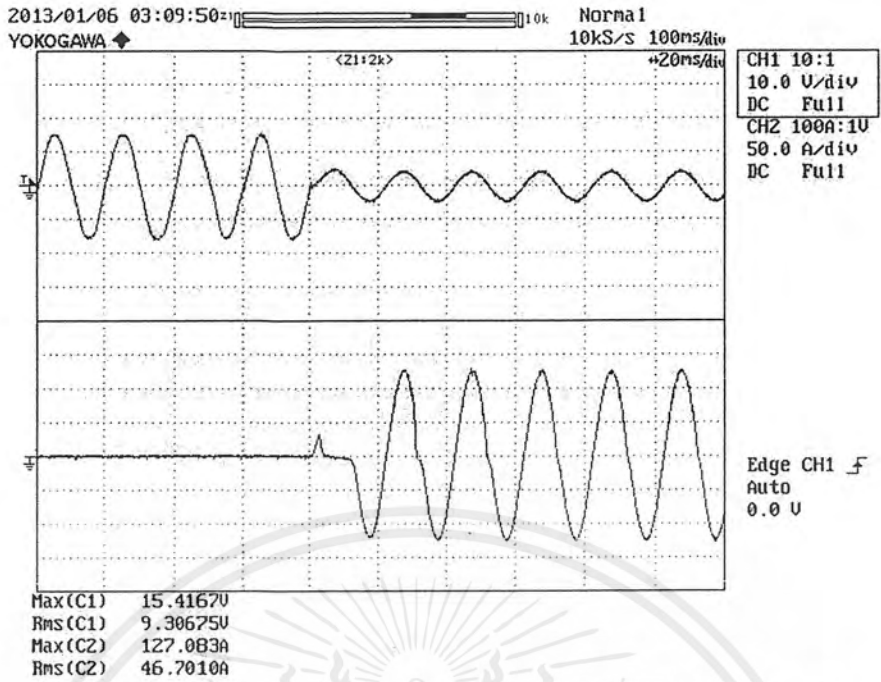
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร



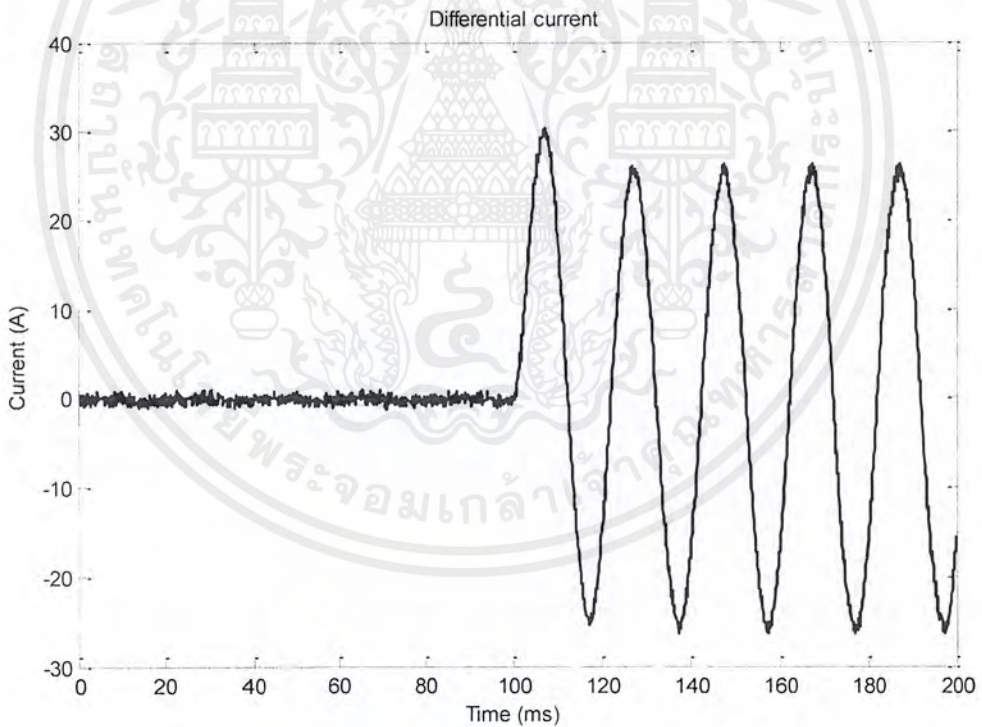
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

รูปที่ ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 155 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

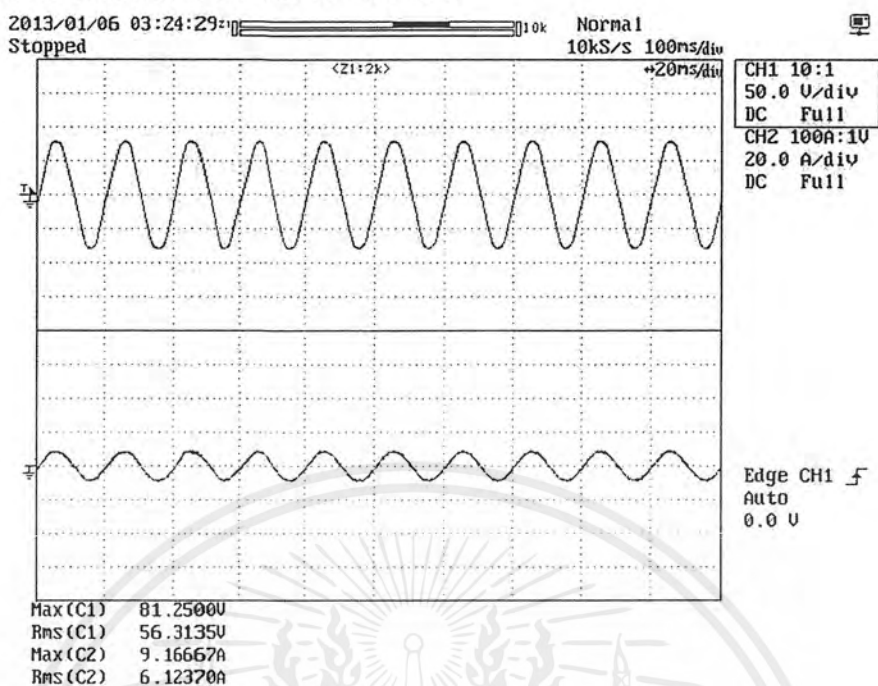


(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

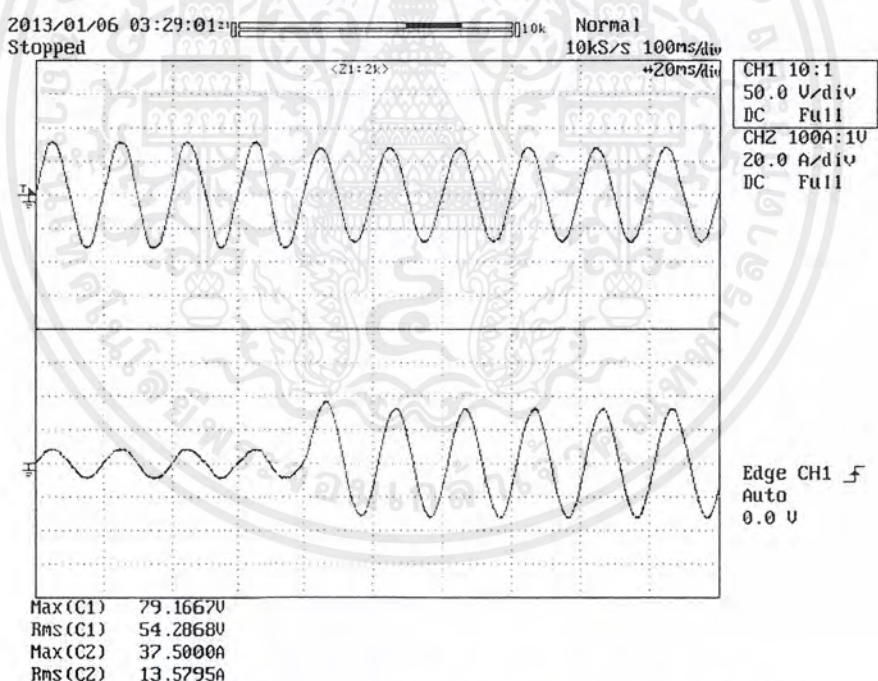
รูปที่ ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซนต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 155 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค.1.2 โหลดความต้านทานขนาด 308 วัตต์



(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

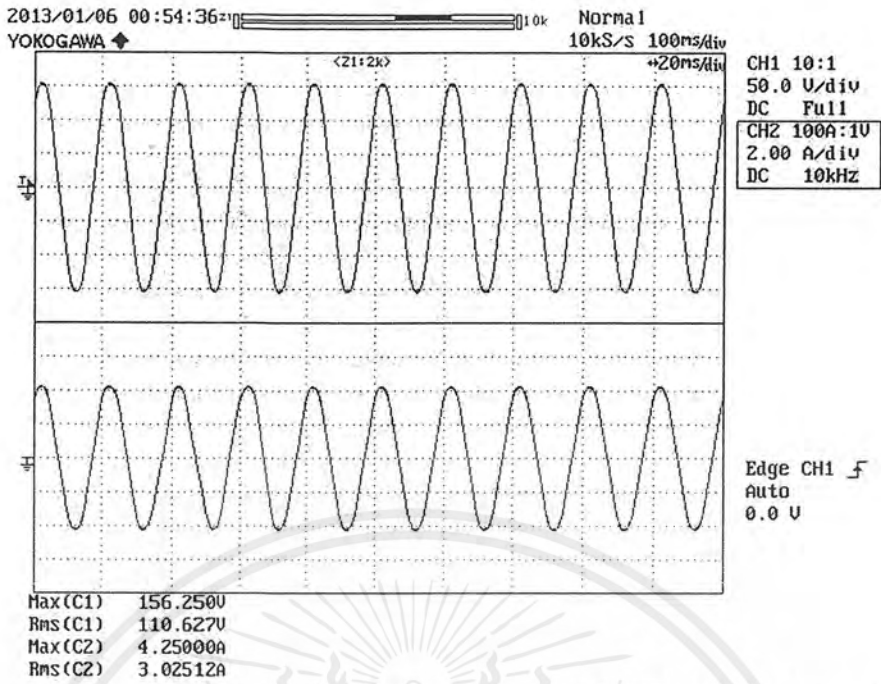


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร

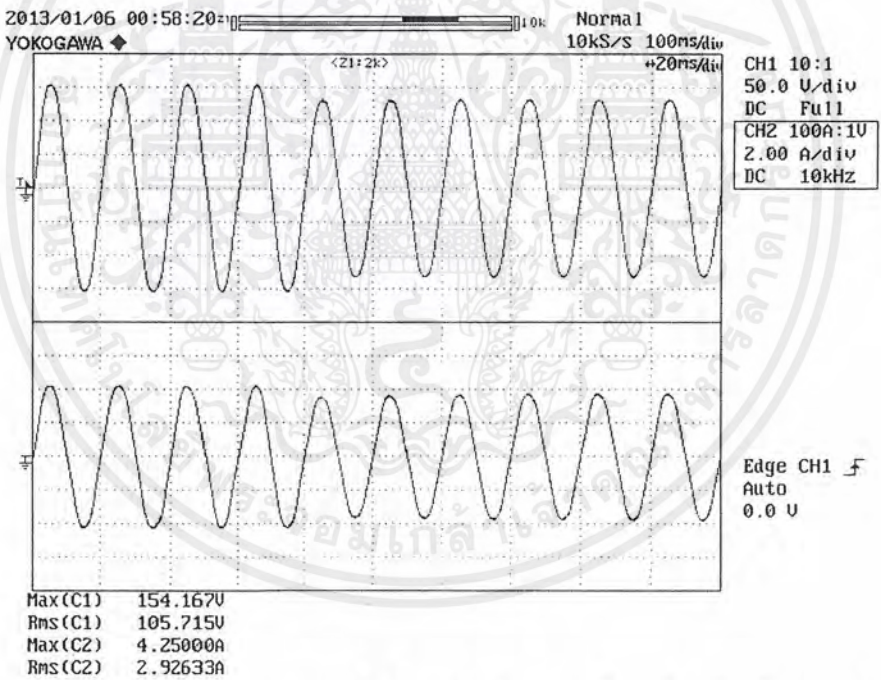
รูปที่ ค.2 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 308 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



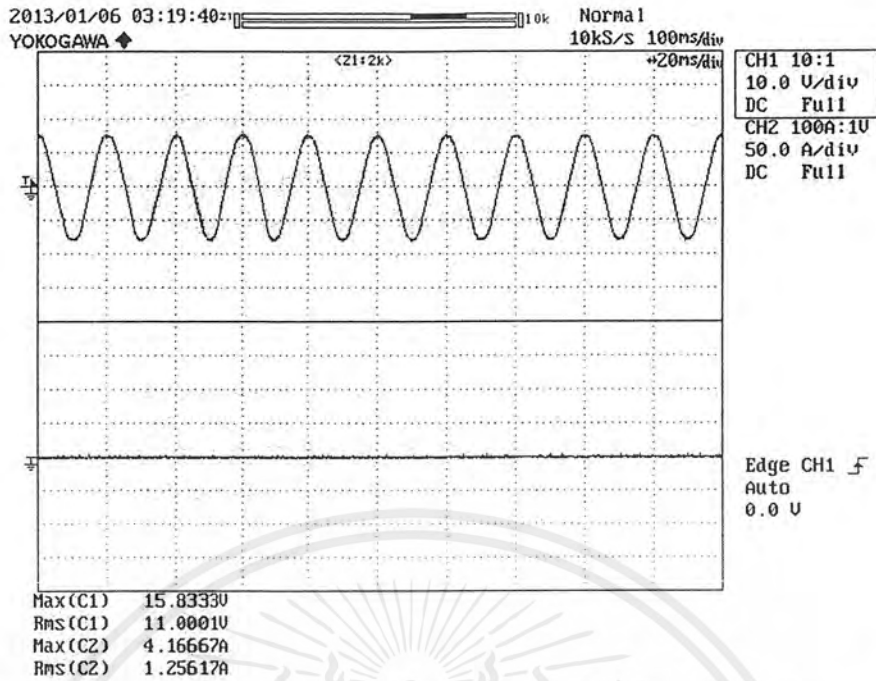
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



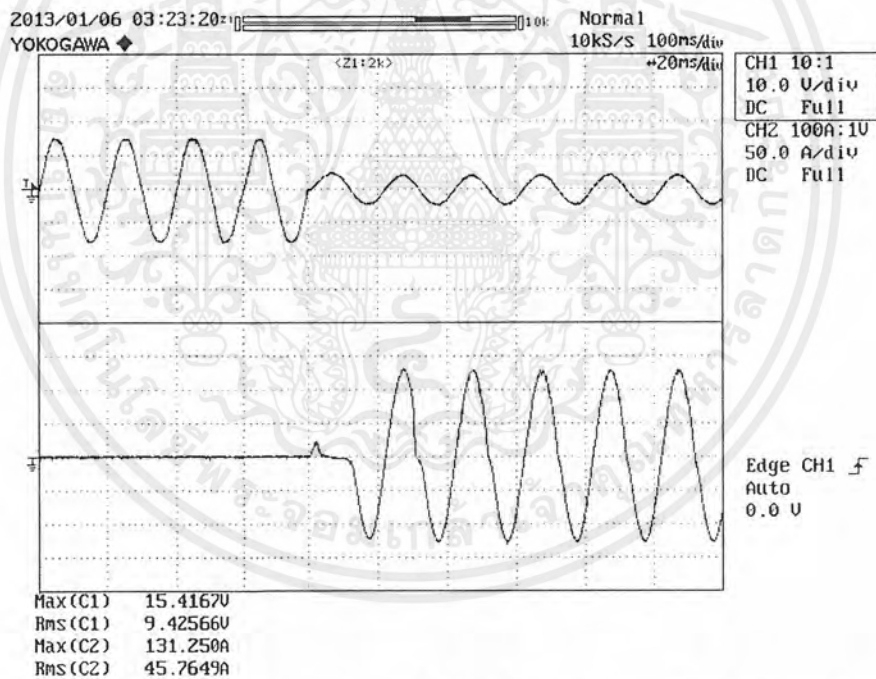
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 308 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



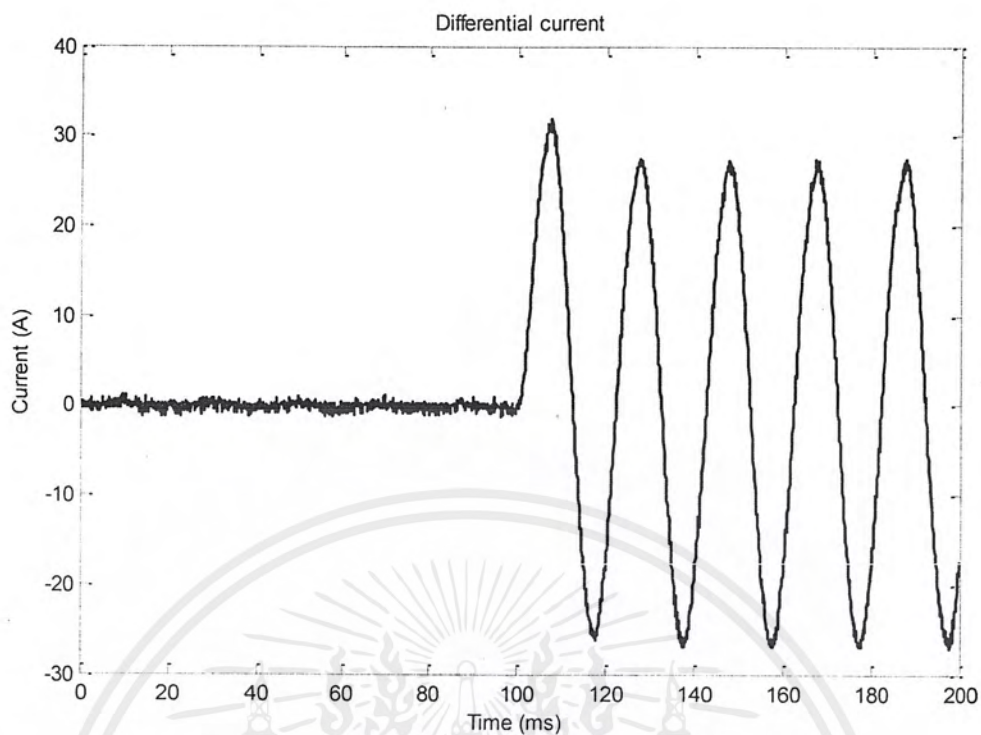
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เพอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 308 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

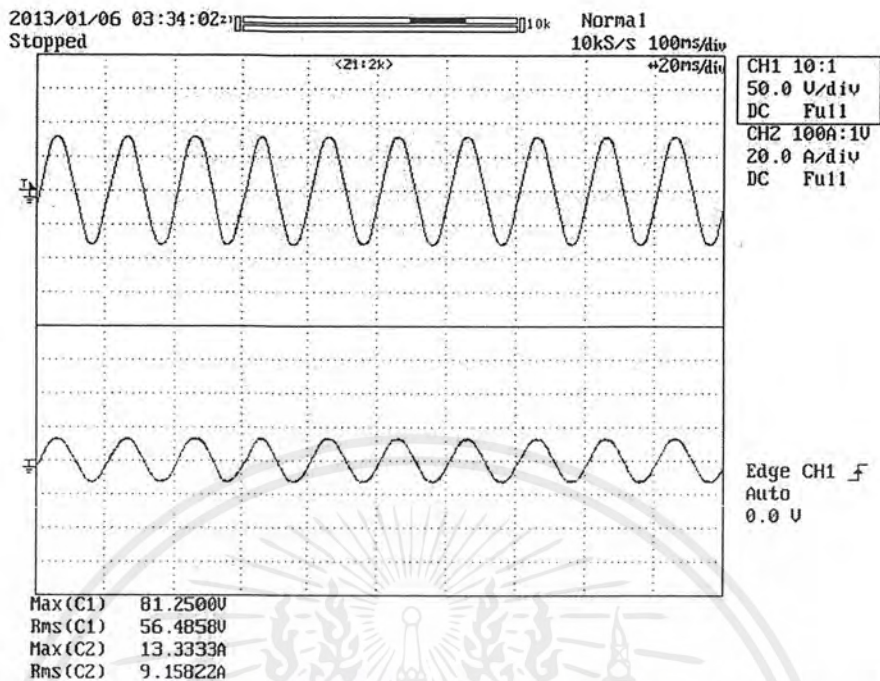


(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

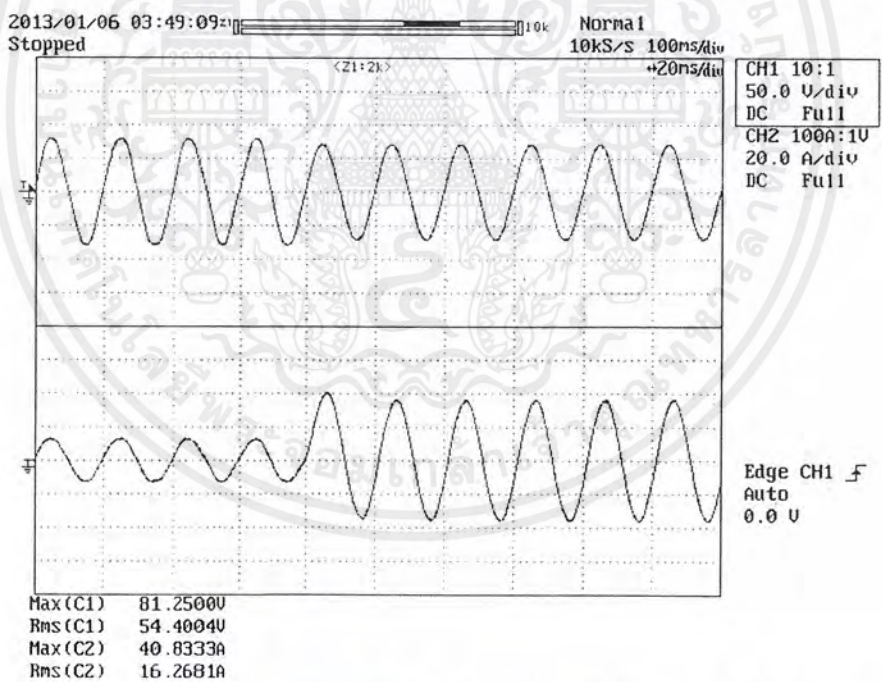
รูปที่ ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 308 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค.1.3 โหลดความต้านทานขนาด 450 วัตต์

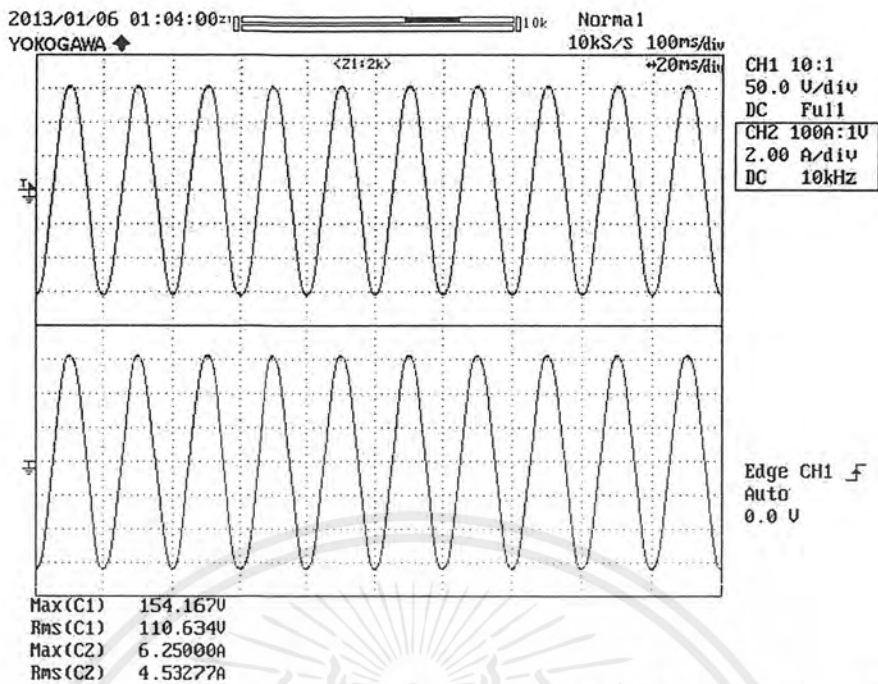


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

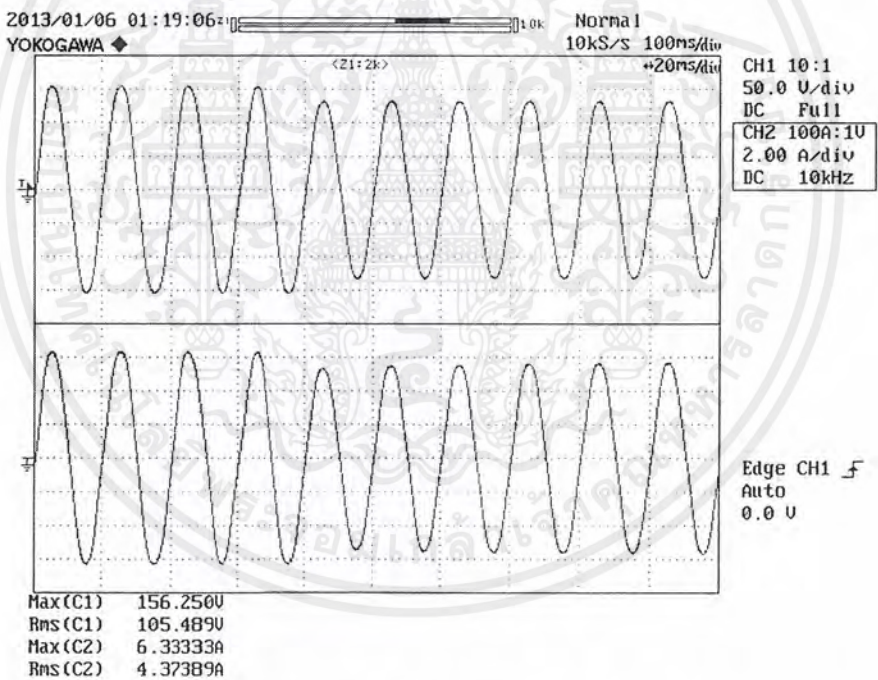


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ ค.3 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 450 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

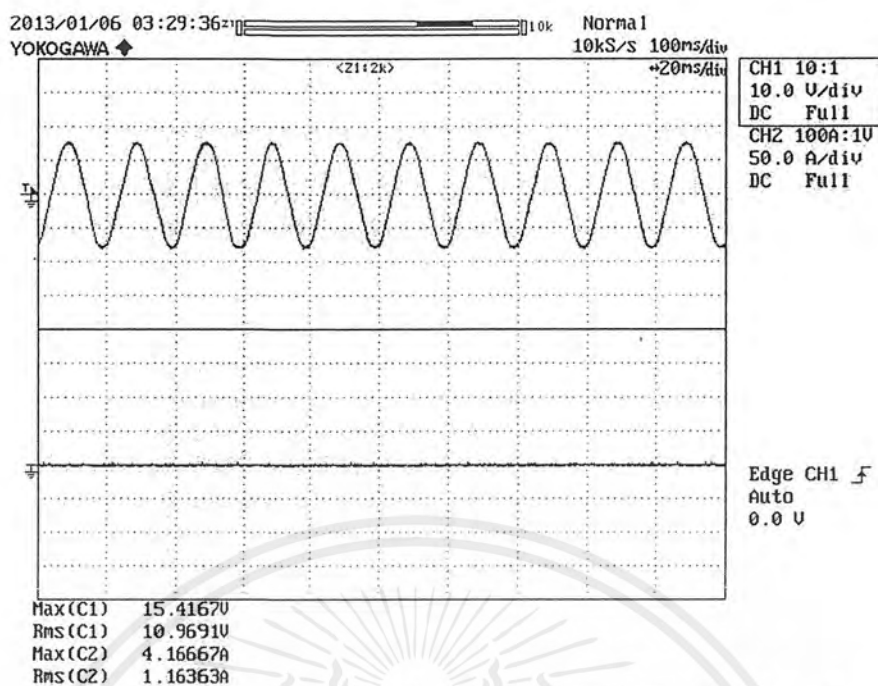


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

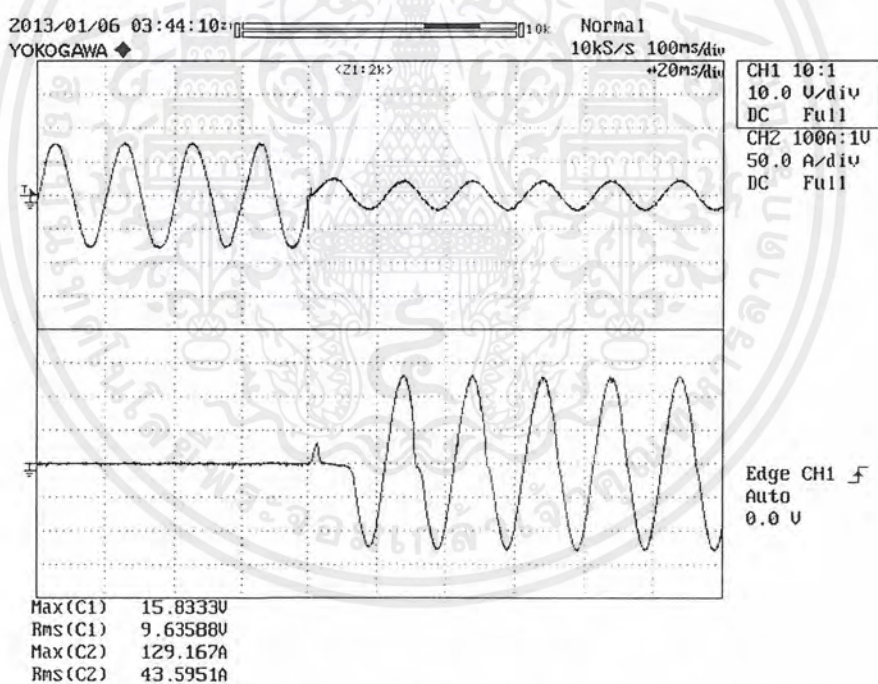


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร รูปที่ ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 450 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



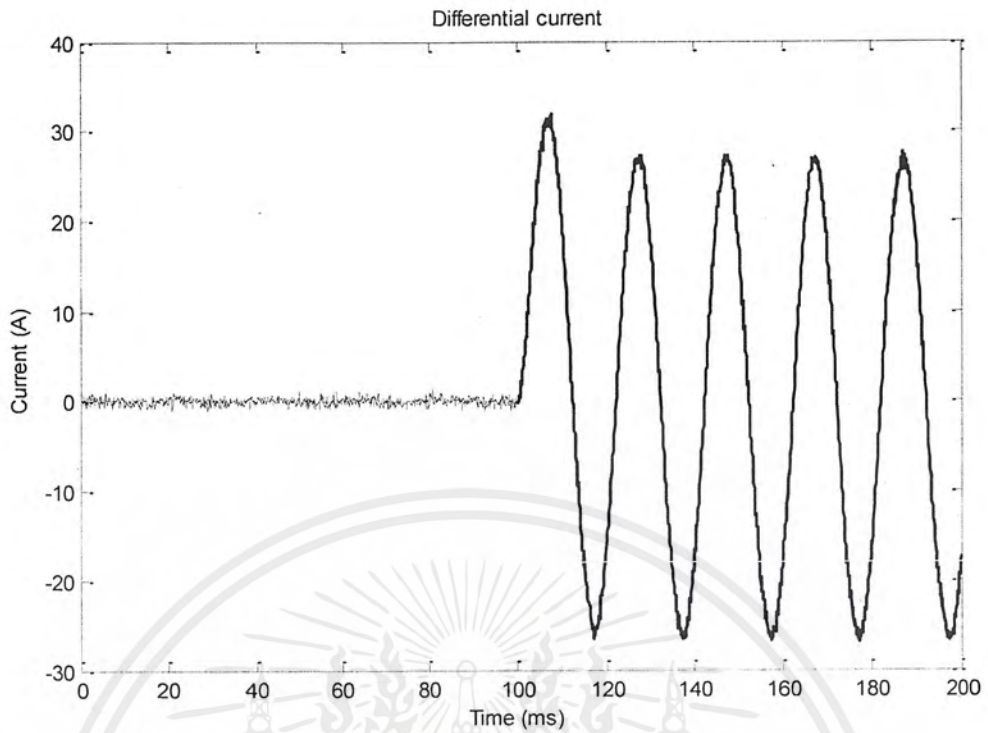
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 450 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

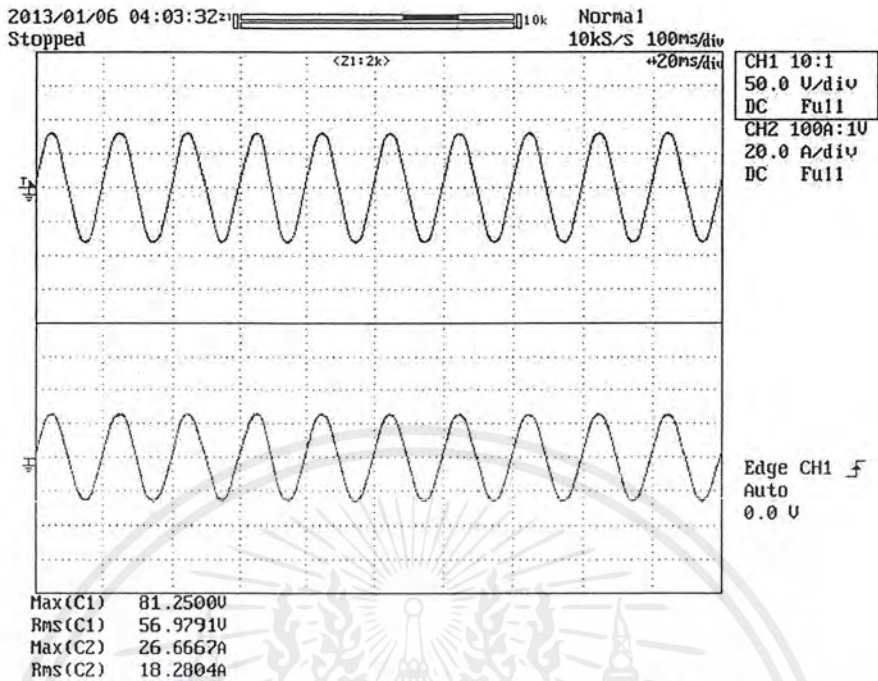
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



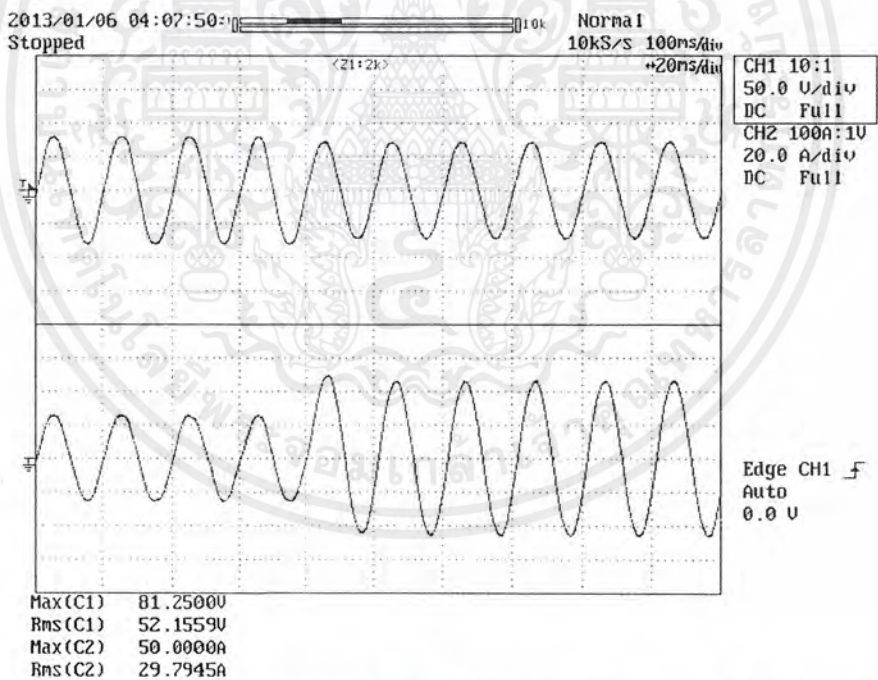
(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 450 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

### ค.1.4 โหลดความต้านทานขนาด 898 วัตต์

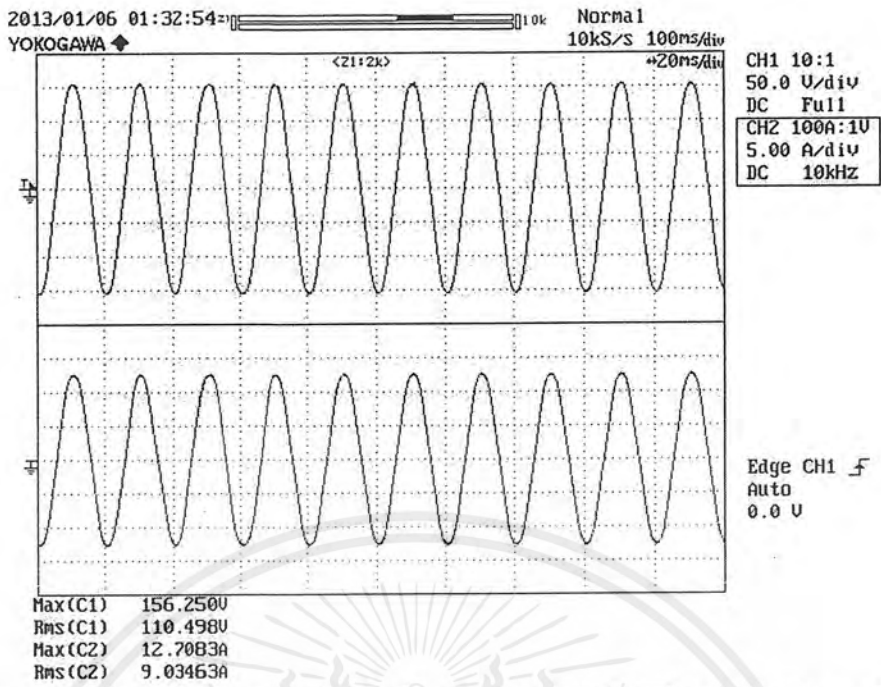


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

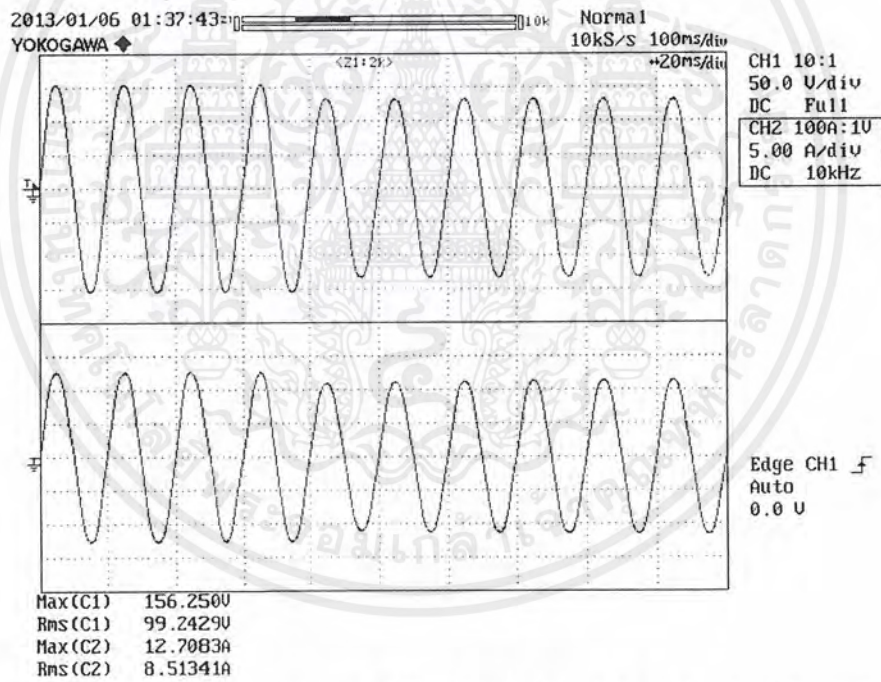


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ ค.4 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 898 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



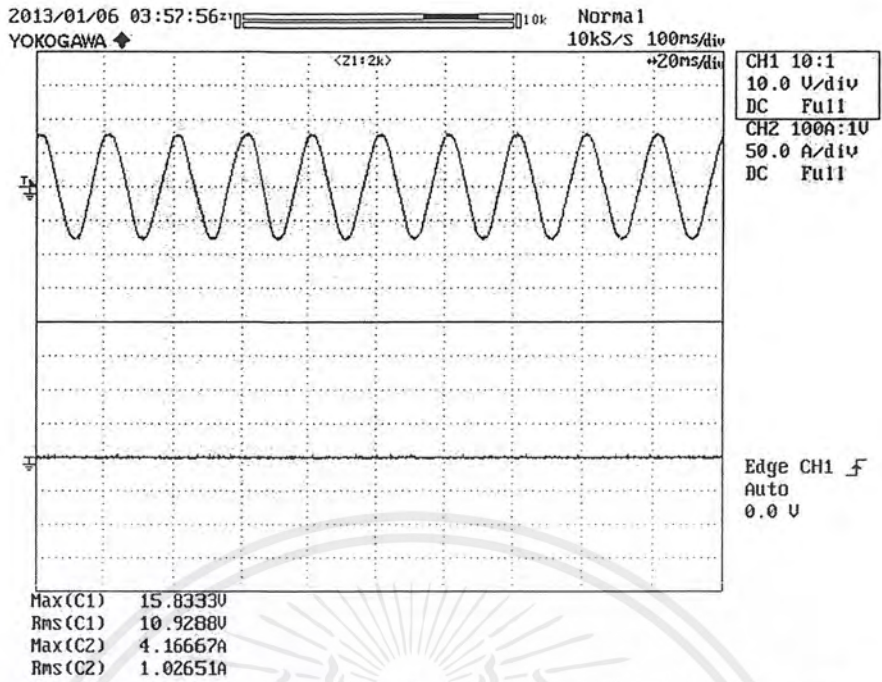
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



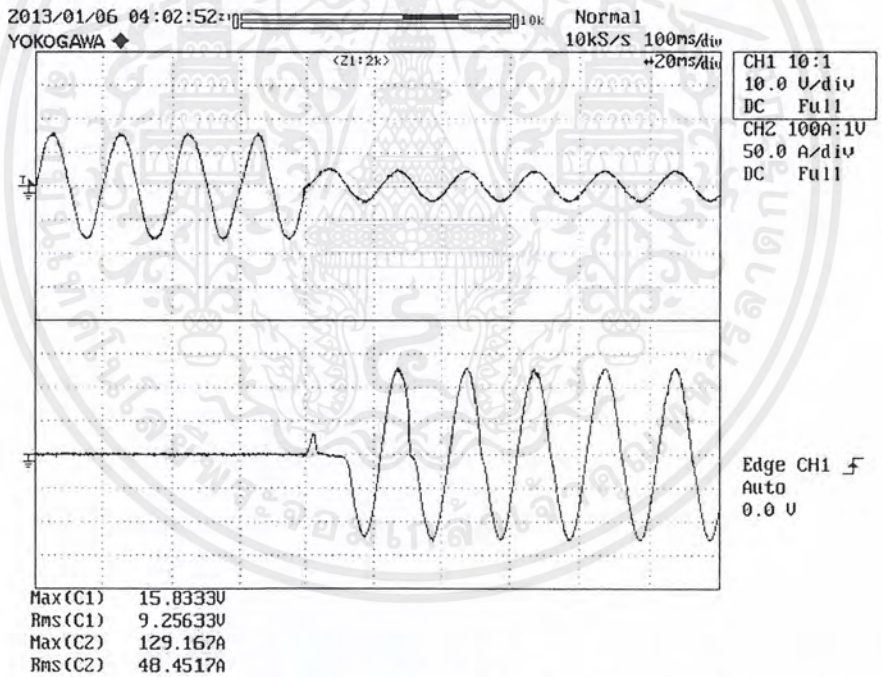
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 898 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



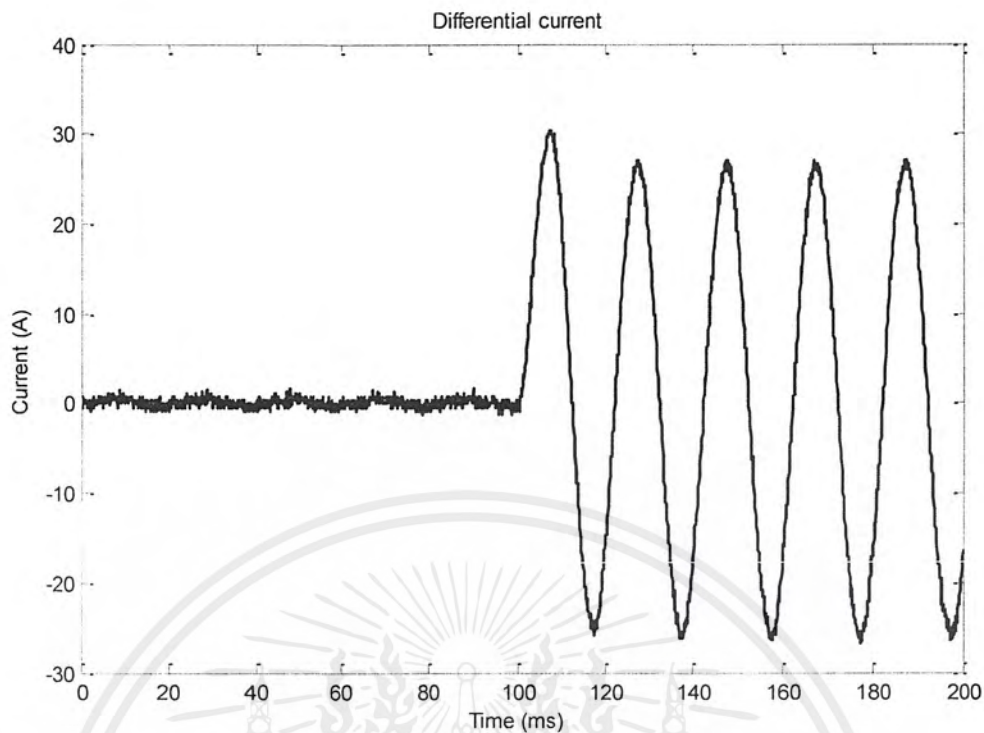
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 898 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



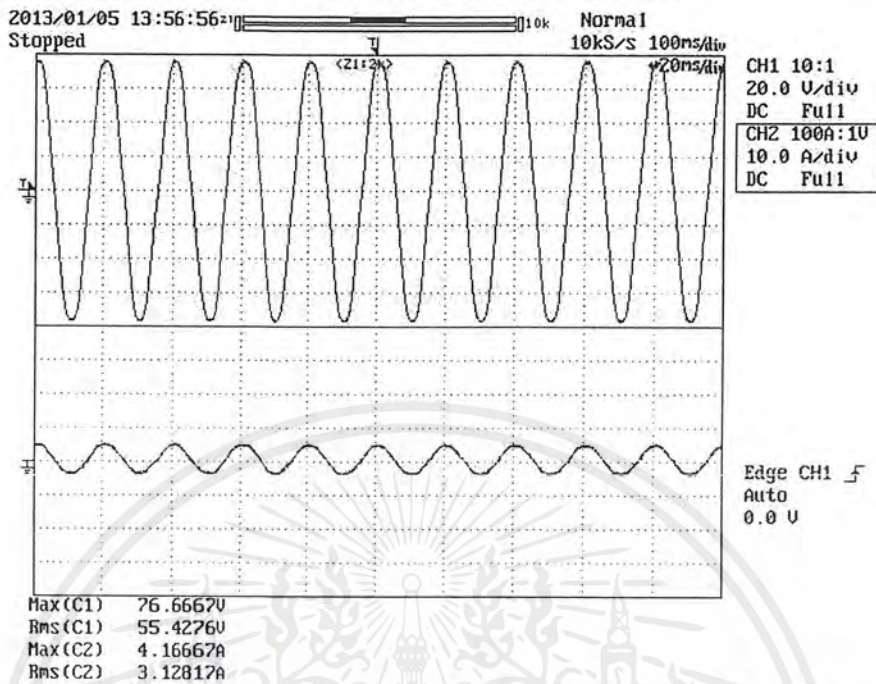
(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เพอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 898 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

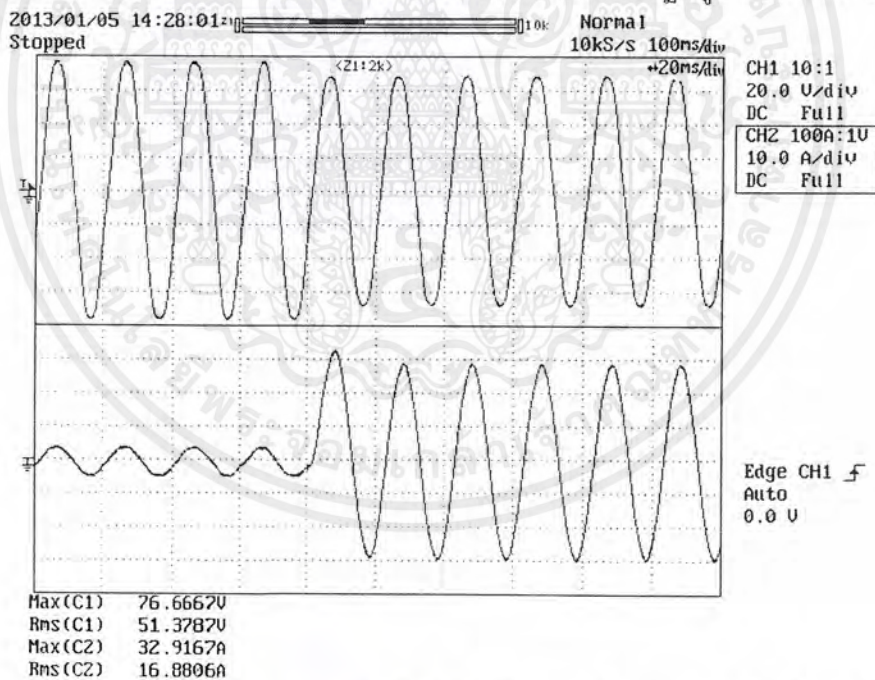
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค.2 กรณีโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำ

### ค.2.1 โหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำขนาด 156 วัตต์



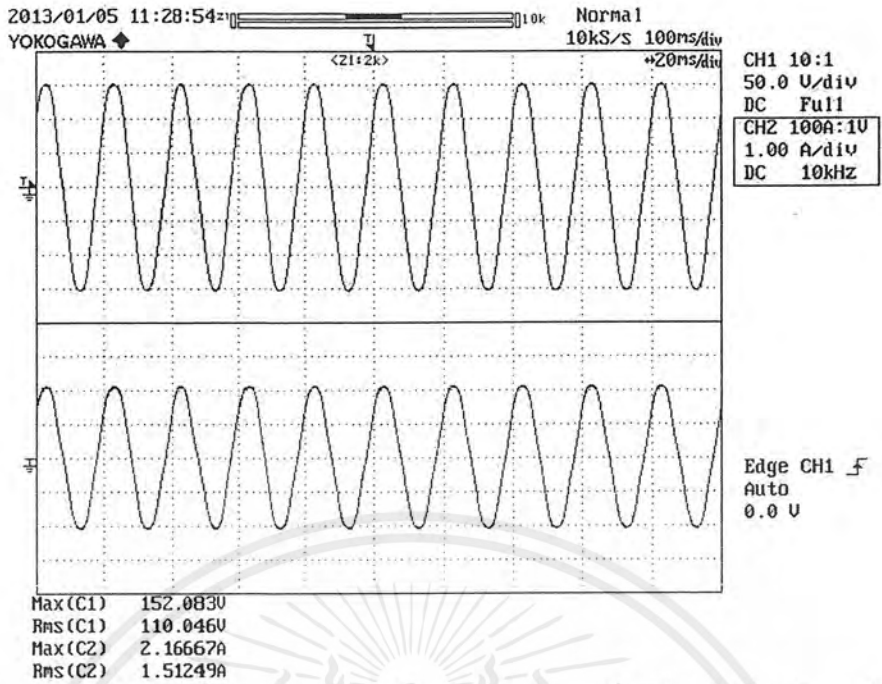
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



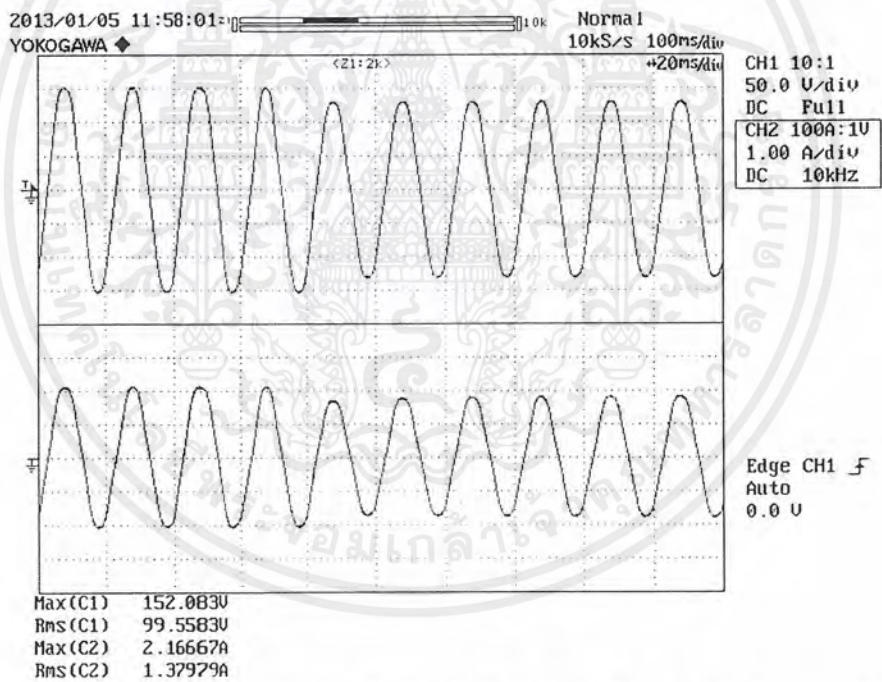
(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ค.5 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



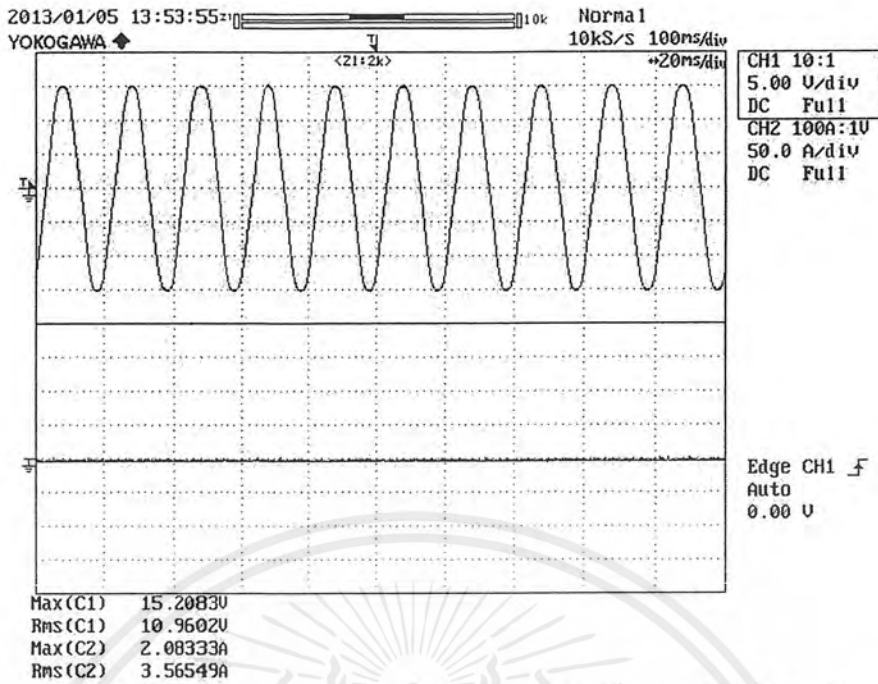
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร



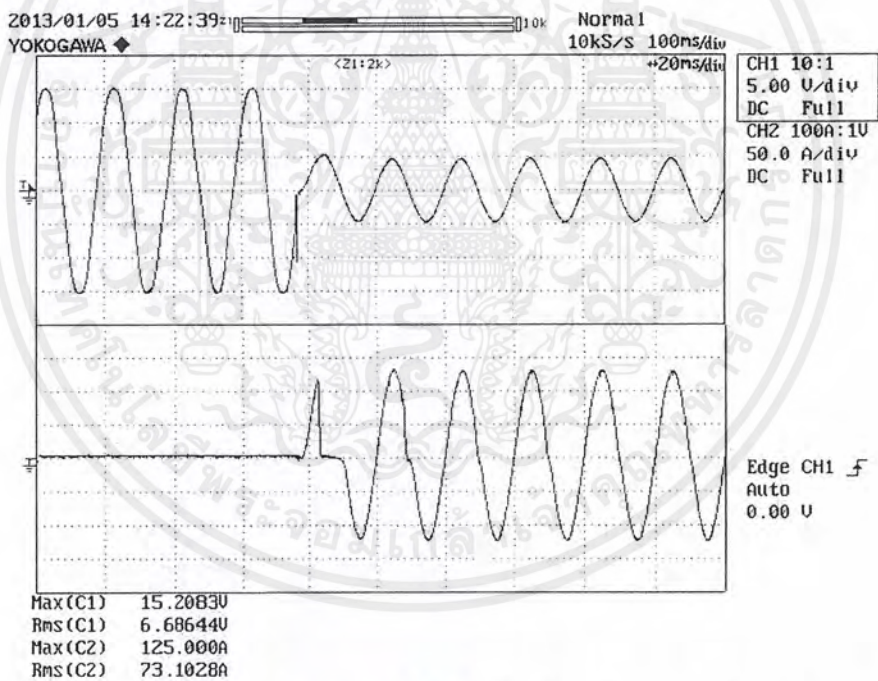
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ค.5 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เพอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



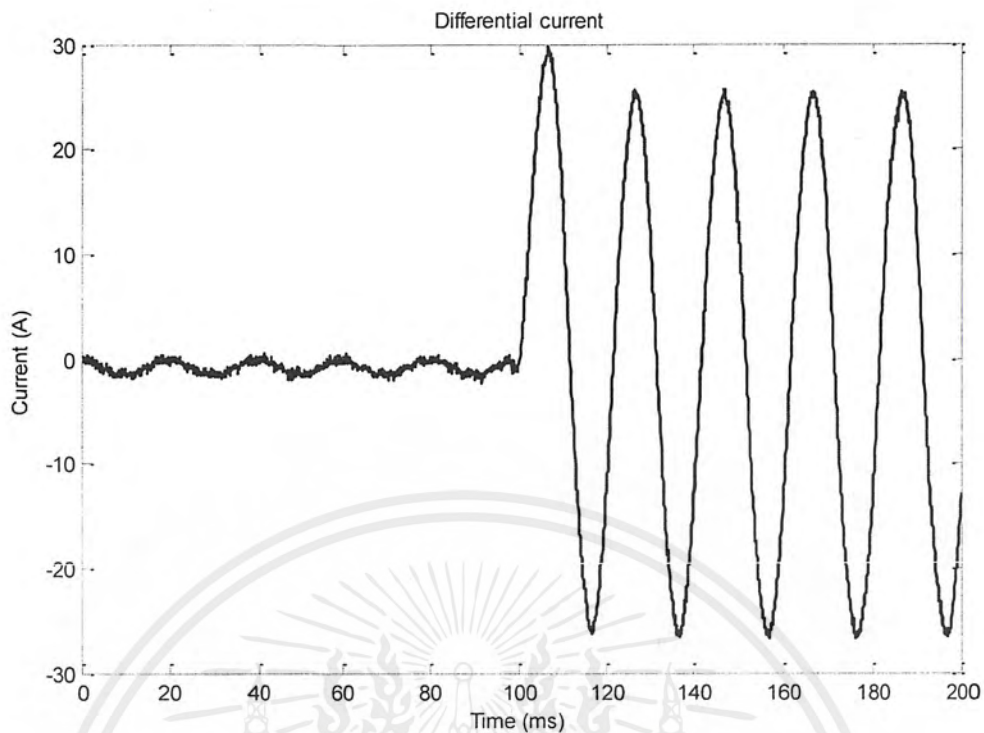
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ค.5 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซนต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

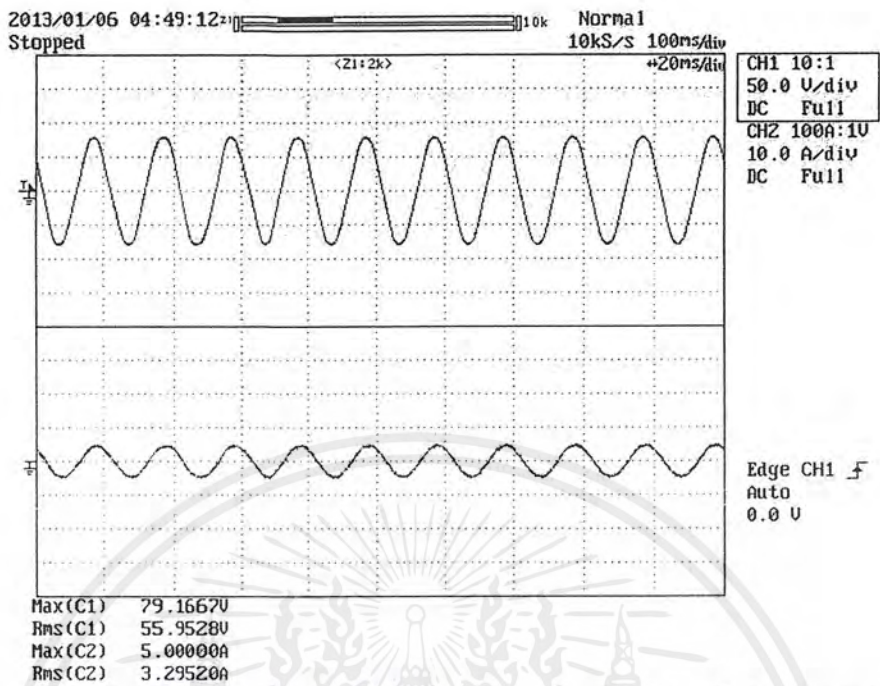


(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

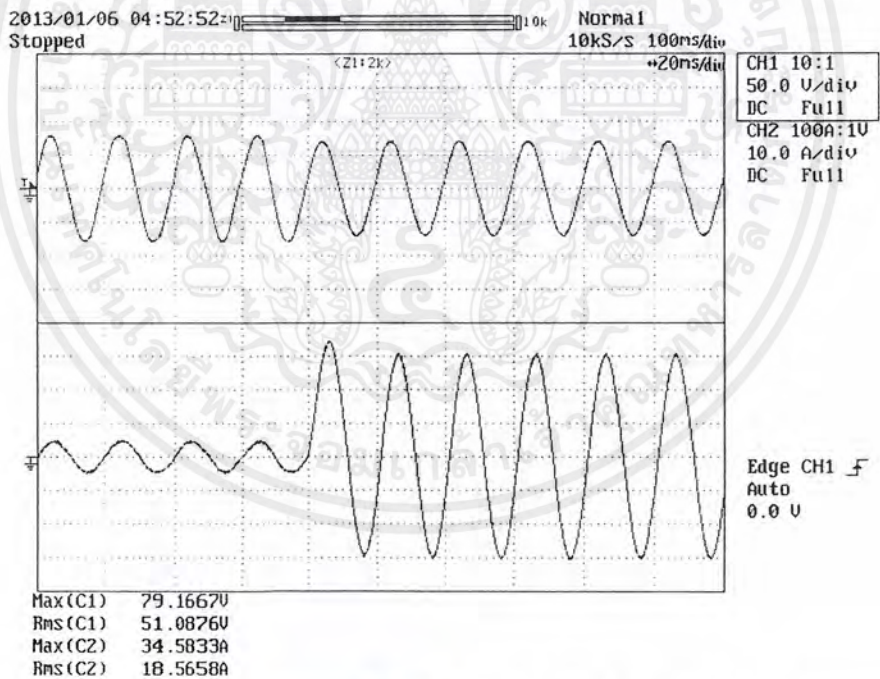
รูปที่ ค.5 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2.2 โหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำขนาด 160 วัตต์

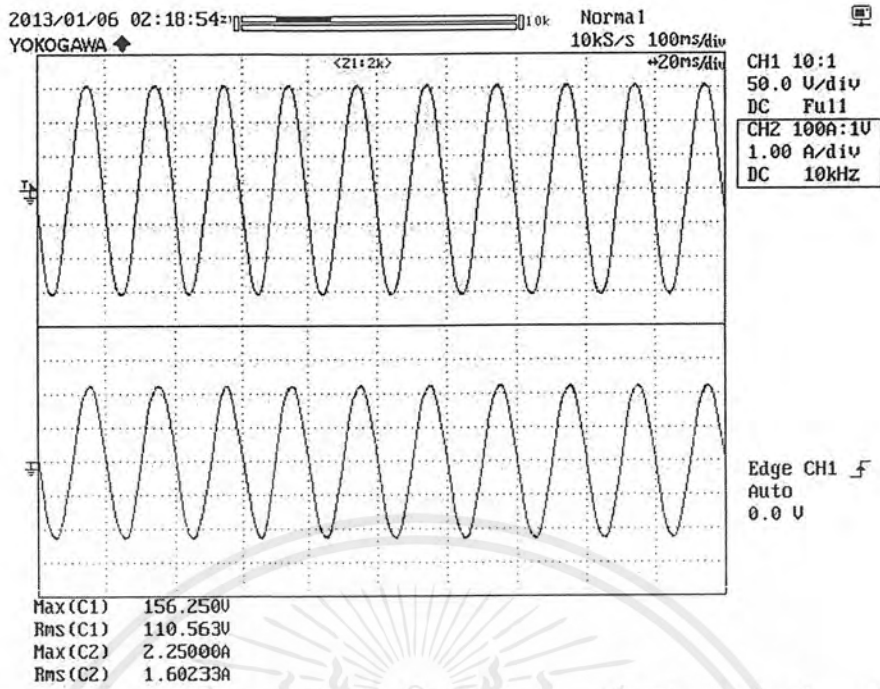


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

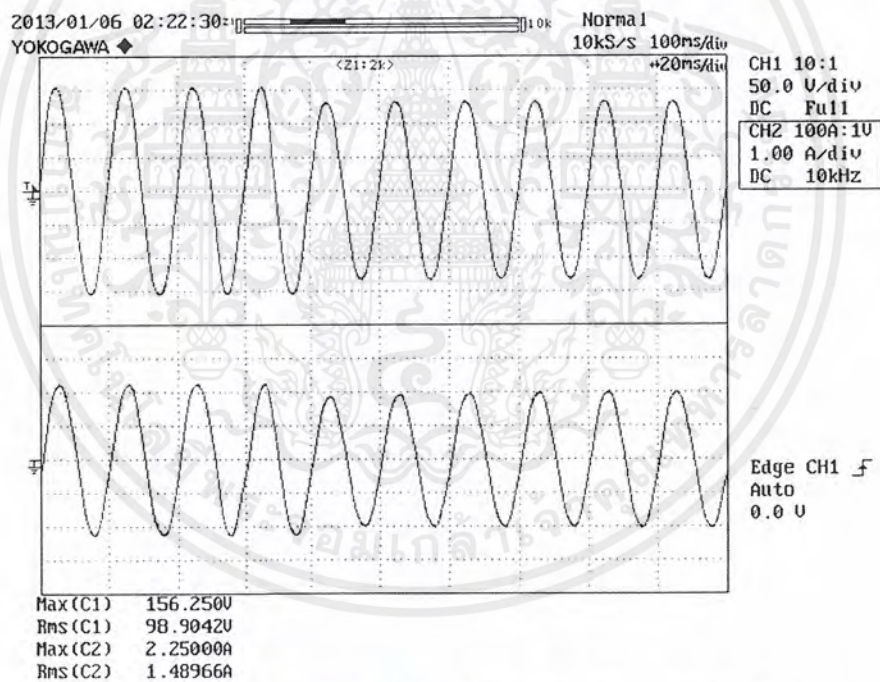


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ ค.6 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 160 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

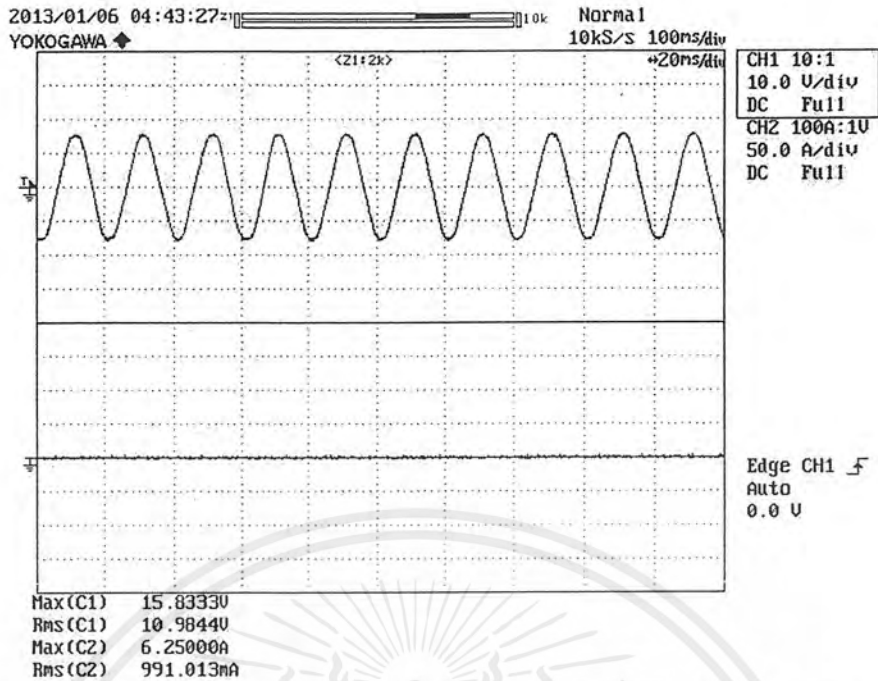


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

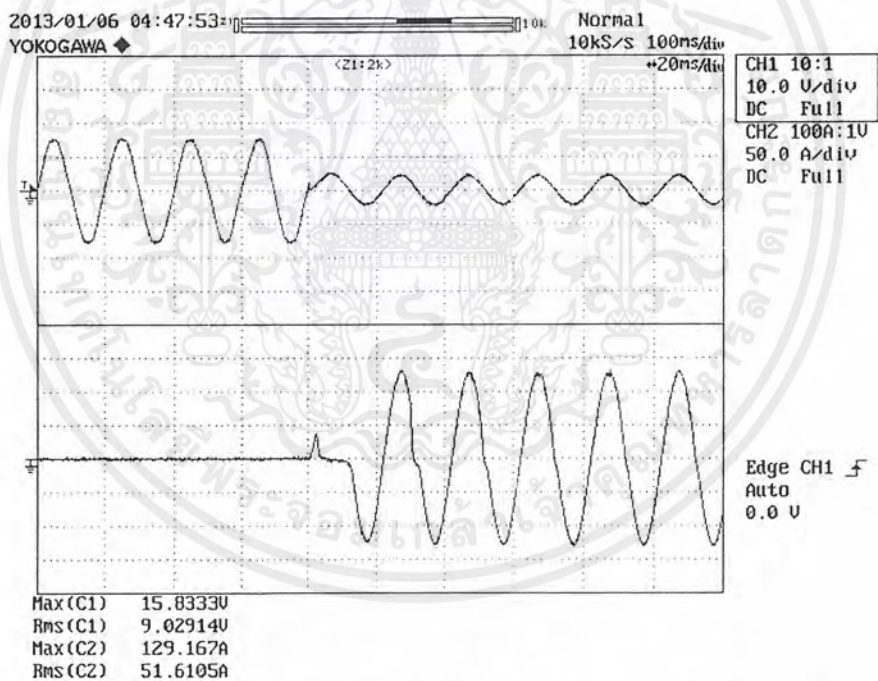


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ค.6 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 160 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา



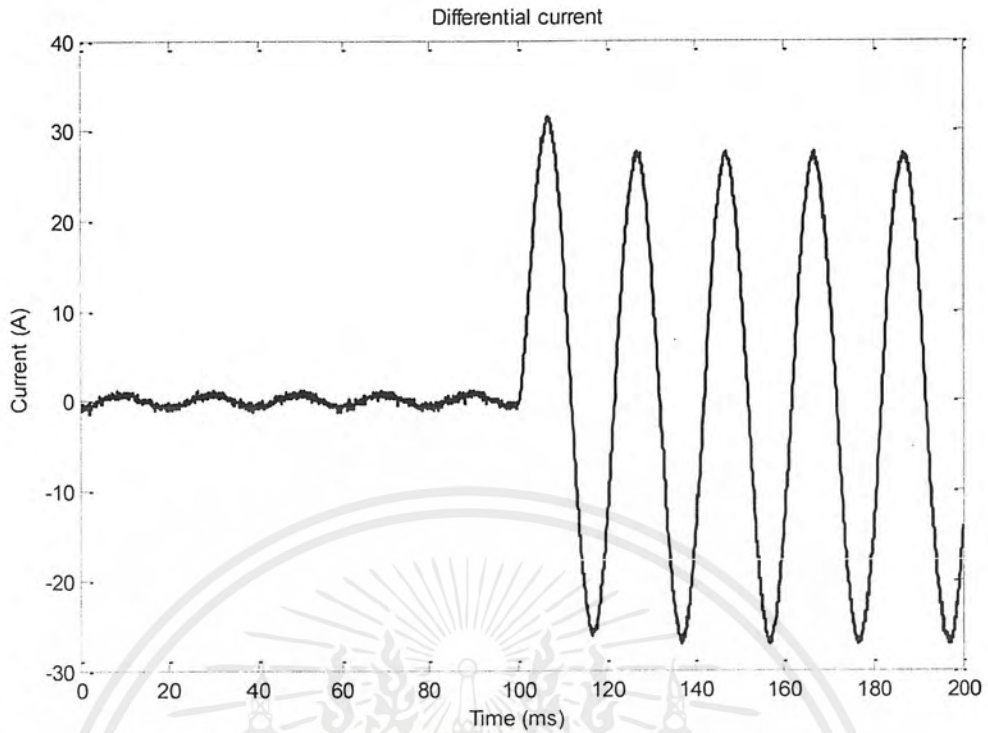
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ค.6 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซนต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 160 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ ค.6 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เพอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 160 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างของขดลวด โดยการปรับเปลี่ยนโพลต์

ระดับแรงดันหม้อแปลง	โพลต์	มุม	ปฐมภูมิ				ทุติยภูมิ				การลัดวงจร				กระแสผลต่าง	
			ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน	หลัง
			แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส				
44-88	R 155 W	0	56.11	3.09	49.50	23.57	110.81	1.50	93.33	1.30	10.98	0	3.04	89.86	0.09	20.97
44-88	R 308 W	0	56.32	6.12	49.50	26.52	110.62	3.03	92.63	2.64	11.00	0	3.18	92.81	0.06	21.24
44-88	R 450 W	0	56.49	9.16	50.20	28.87	110.63	4.53	94.05	3.95	10.97	0	3.18	91.33	0.10	20.97
44-88	R 898 W	0	56.98	18.28	50.91	35.36	110.50	9.03	94.40	8.10	10.93	0	3.18	91.33	0.22	19.16
44-88	RL 156 W	0	55.43	3.13	48.51	23.28	110.05	1.51	92.63	1.26	10.96	0	3.46	88.39	0.11	20.76
44-88	RL 160 W	0	55.95	3.30	49.85	24.45	110.56	1.60	94.40	1.41	10.98	0	3.25	91.33	0.10	21.63

จากการทดลองการลัดวงจรระหว่างของขดลวด โดยการปรับเปลี่ยนโพลต์ แพบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 10 เอรอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา เมื่อเปรียบเทียบผลของการทดลองก่อน และหลังการลัดวงจร พบว่า

ทางด้านปฐมภูมิ แรงดันไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร กระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการลัดวงจร เมื่อปรับเปลี่ยนโพลต์เป็น โพลต์ความต้านทานขนาด 155, 308, 450, 898 วัตต์ และ โพลต์ความต้านทานความเหนี่ยวนำขนาด 156, 160 วัตต์ ตามลำดับ จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่กระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าวัตต์ที่เพิ่มขึ้น

ทางด้านทุติยภูมิ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อปรับเปลี่ยนโพลต์เป็น โพลต์ความต้านทานขนาด 155, 308, 450, 898 วัตต์ และ โพลต์ความเหนี่ยวนำขนาด 156, 160 วัตต์ ตามลำดับ จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่กระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการลัดวงจรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าวัตต์ที่เพิ่มขึ้น

ทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจร แนวนอนมีพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า คล้ายกับทางด้านปฐมภูมิ แต่ค่าแอมพลิจูดของแรงดันต่ำกว่า ค่าแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรสูงกว่า

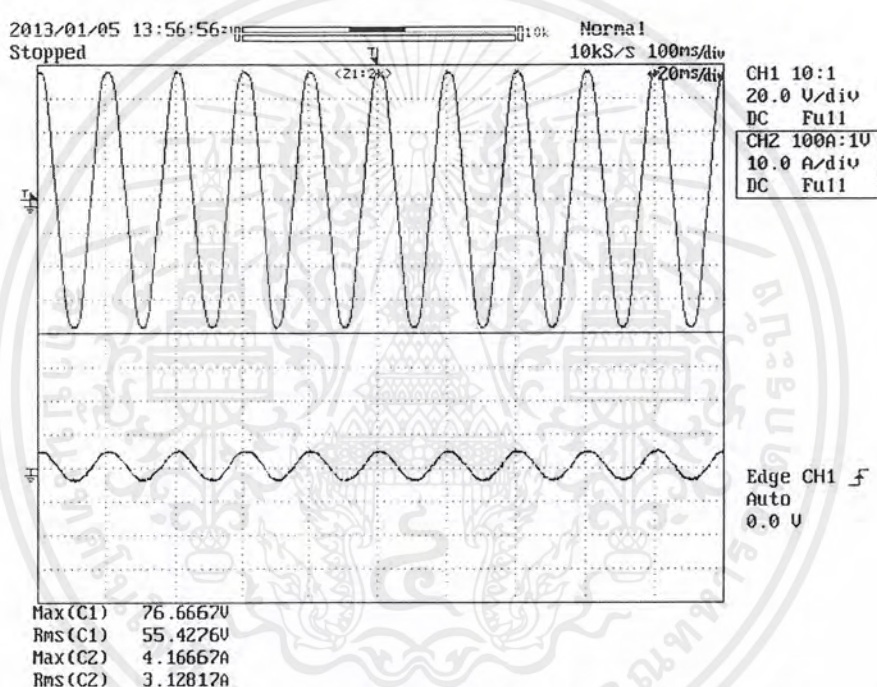
เมื่อทำการปรับเปลี่ยนโพลต์ที่ค่า วัตต์ ต่าง ๆ กระแสผลต่างหลังการลัดวงจรมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

## ภาคผนวก ง.

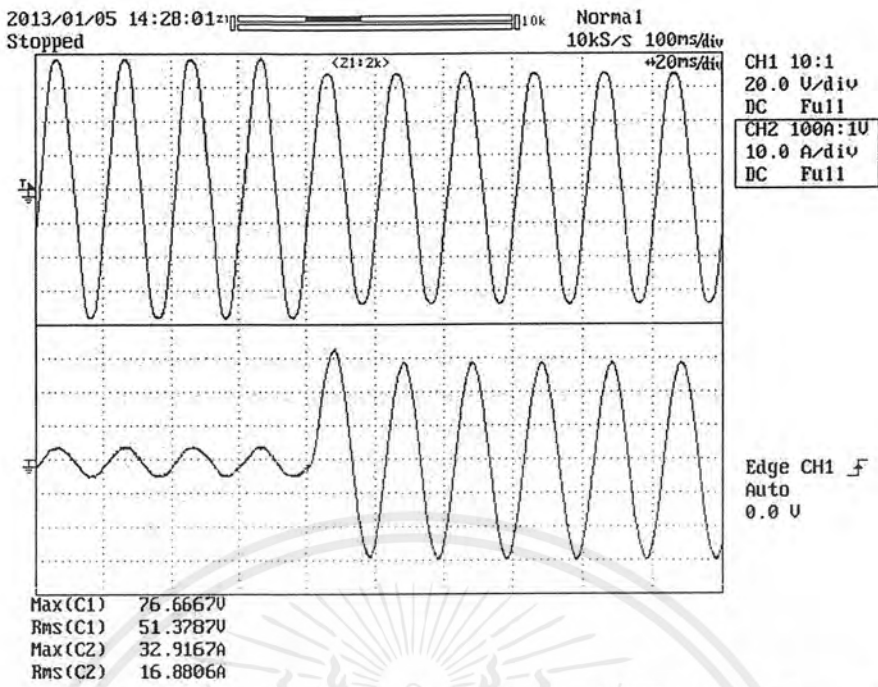
### การลัดวงจรโดยการปรับเปลี่ยนขนาดมุมเริ่มต้น

การทำาทดลองการลัดวงจรโดยการปรับเปลี่ยนขนาดมุมเริ่มต้น ได้ทำการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ จ่ายโหลดที่ 156 วัตต์ โดยการทดลองกรณีนี้จะทำการเปลี่ยนมุมเริ่มต้นในการเกิดกระแสลัดวงจรเป็นมุม 0, 90, 180, 270 องศา เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นว่าการเปลี่ยนขนาดของมุมเริ่มต้นจะมีผลต่อกระแสลัดวงจรหรือไม่ ซึ่งผลจากการทดลองเป็นดังนี้

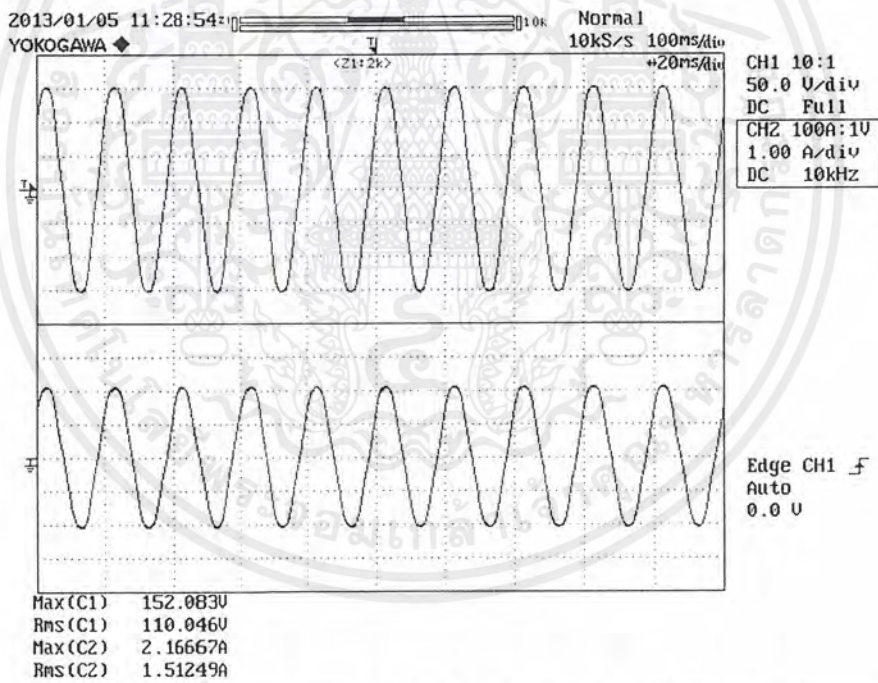
#### ง.1 กรณีมุมเริ่มต้นที่มุม 0 องศา



(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจรรูปที่ ง.1 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา



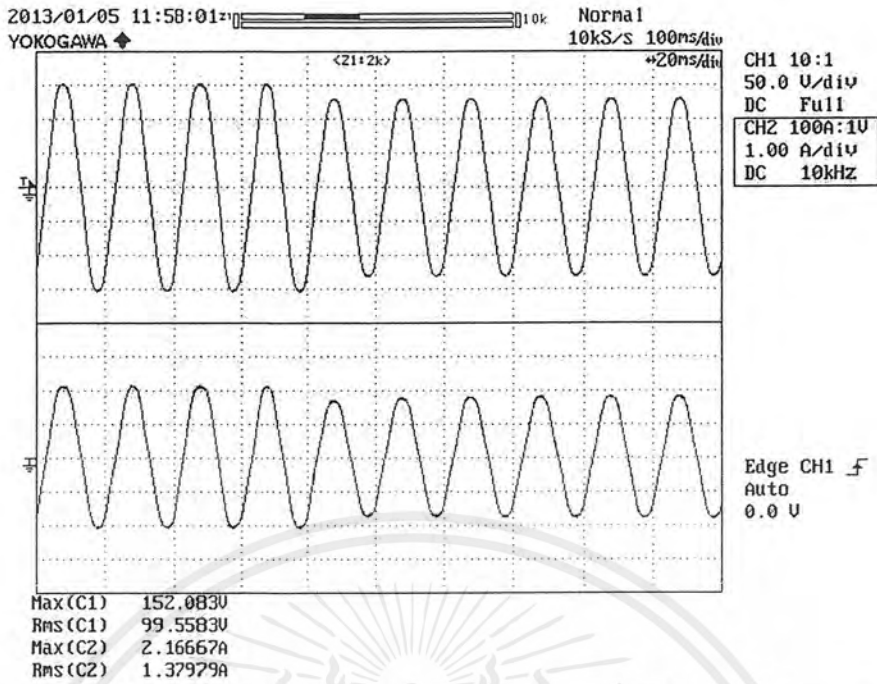
(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร



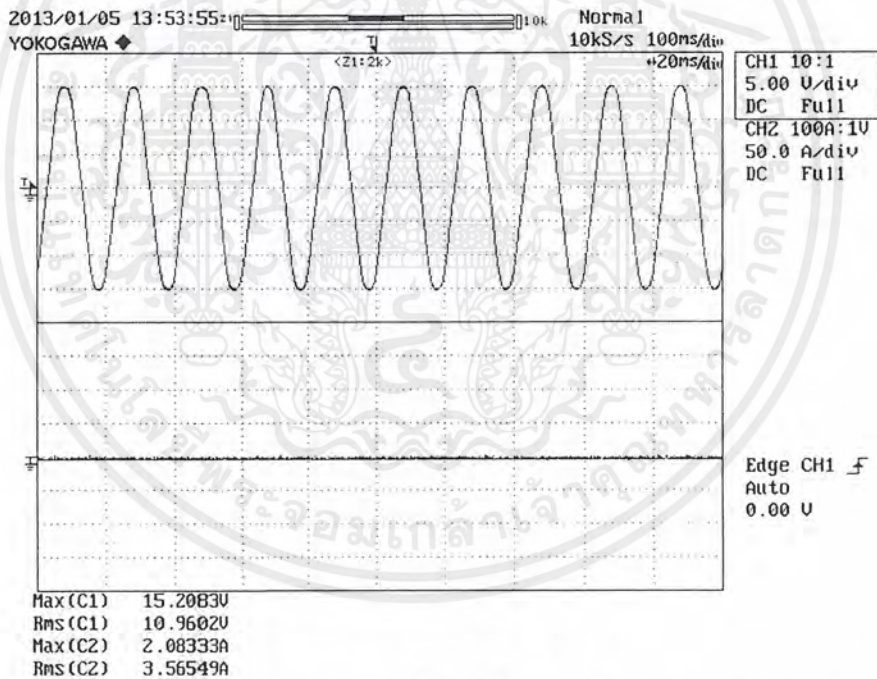
(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

รูปที่ ง.1 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



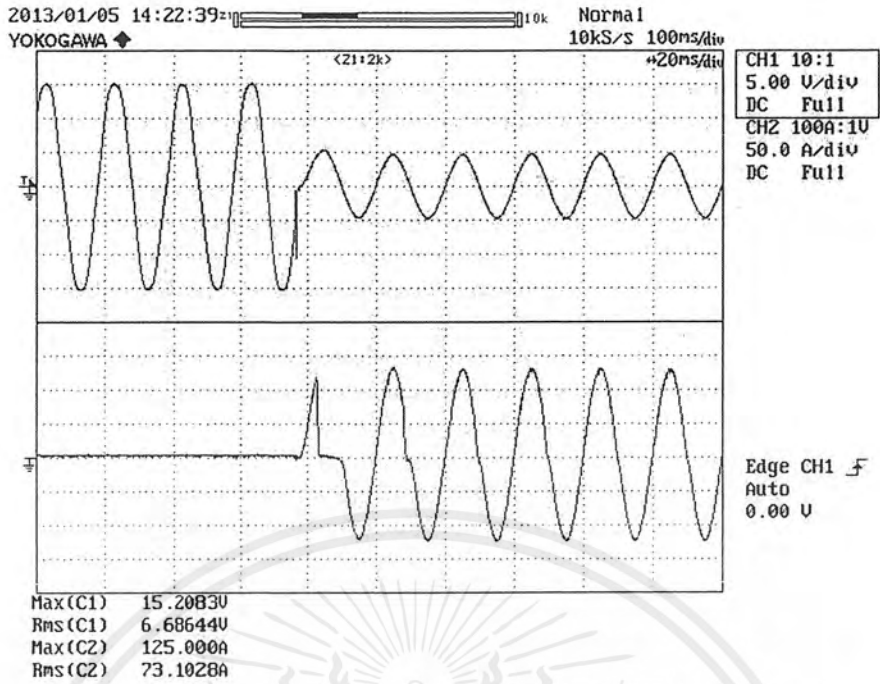
(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร



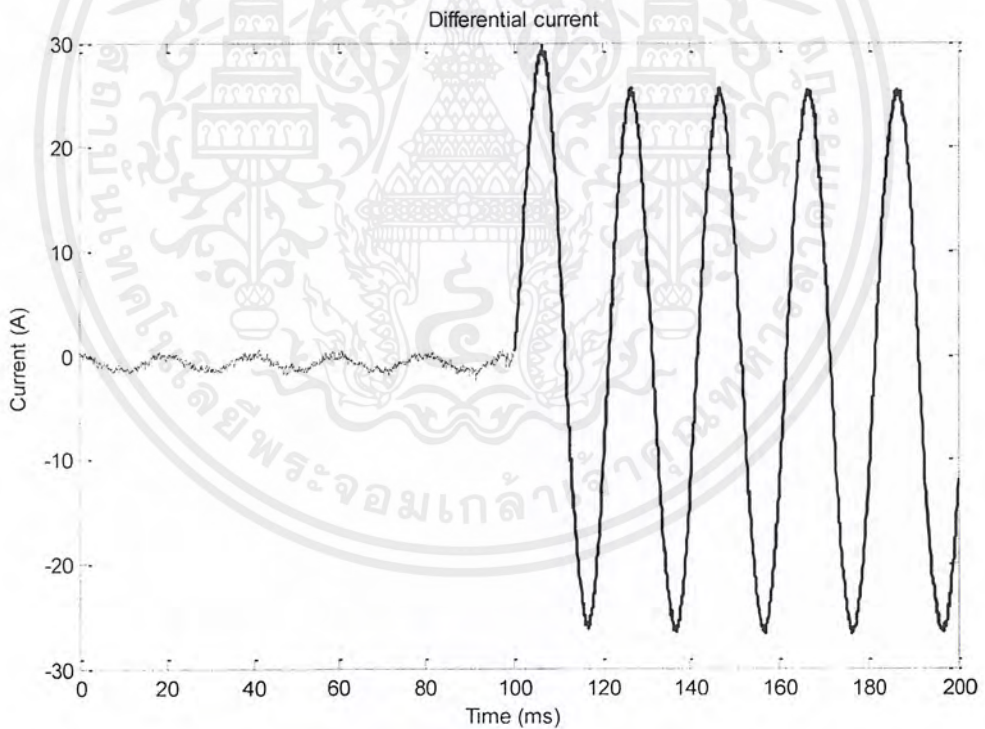
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

รูปที่ ง.1 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซนต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ฉ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

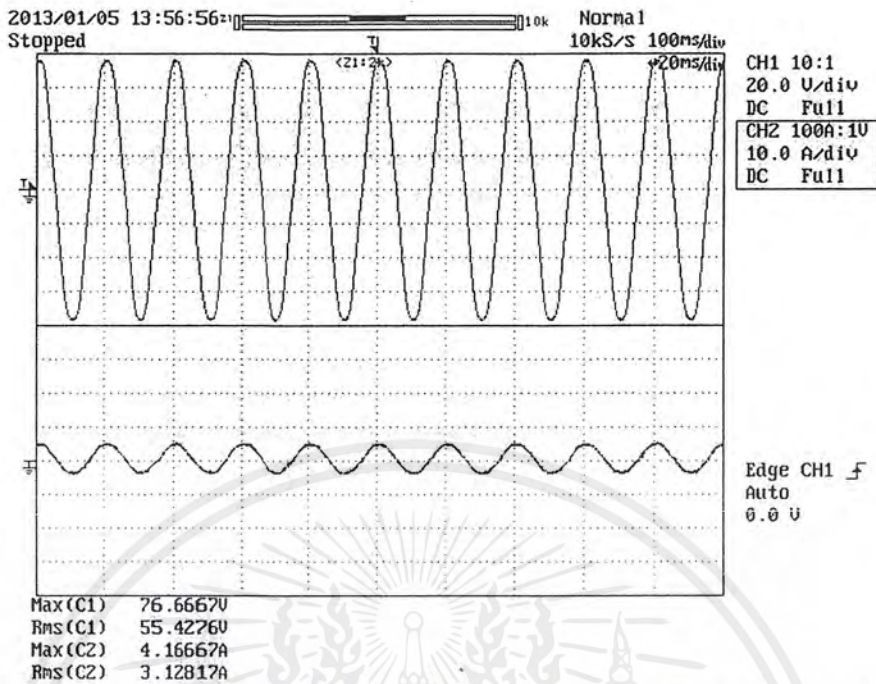


(ช) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

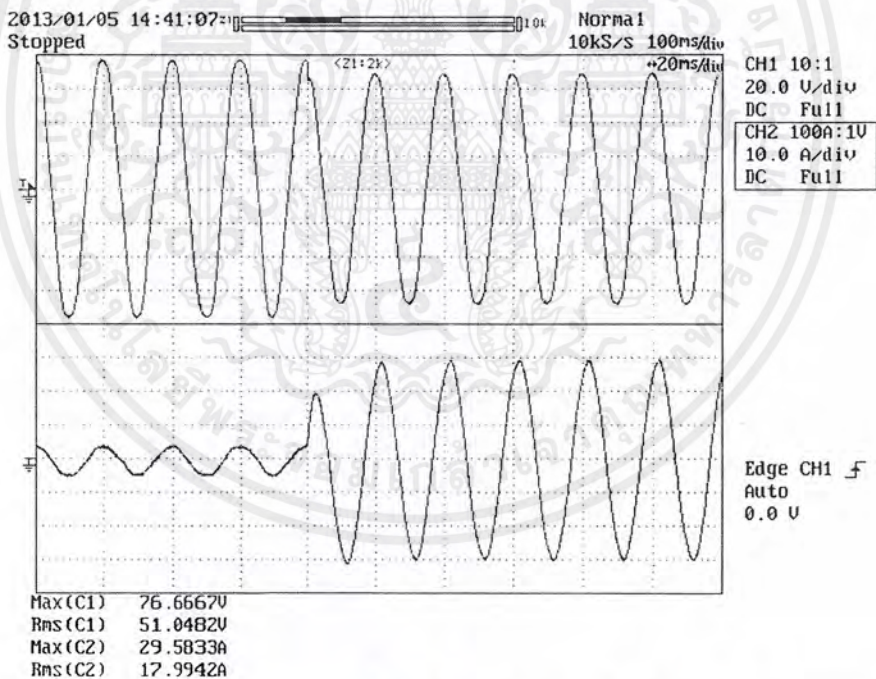
รูปที่ ง.1 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.2 กรณีมุมเริ่มต้นที่มุม 90 องศา

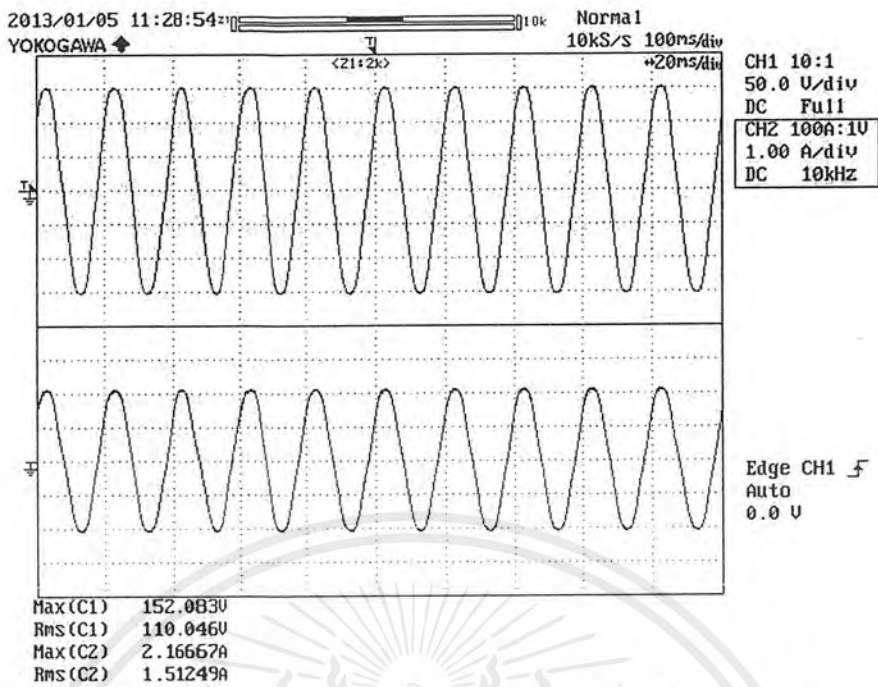


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

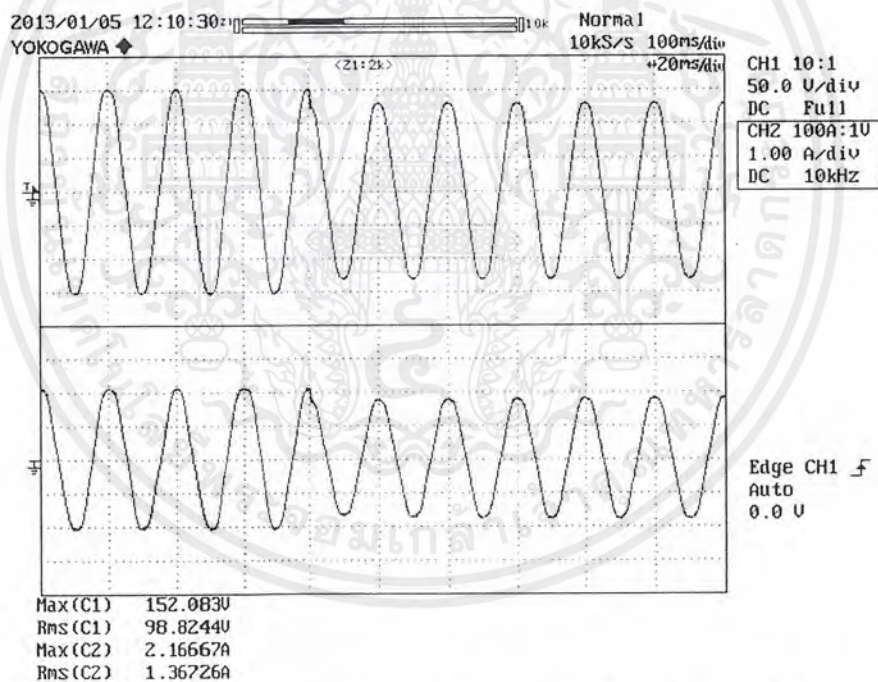


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ ง.2 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

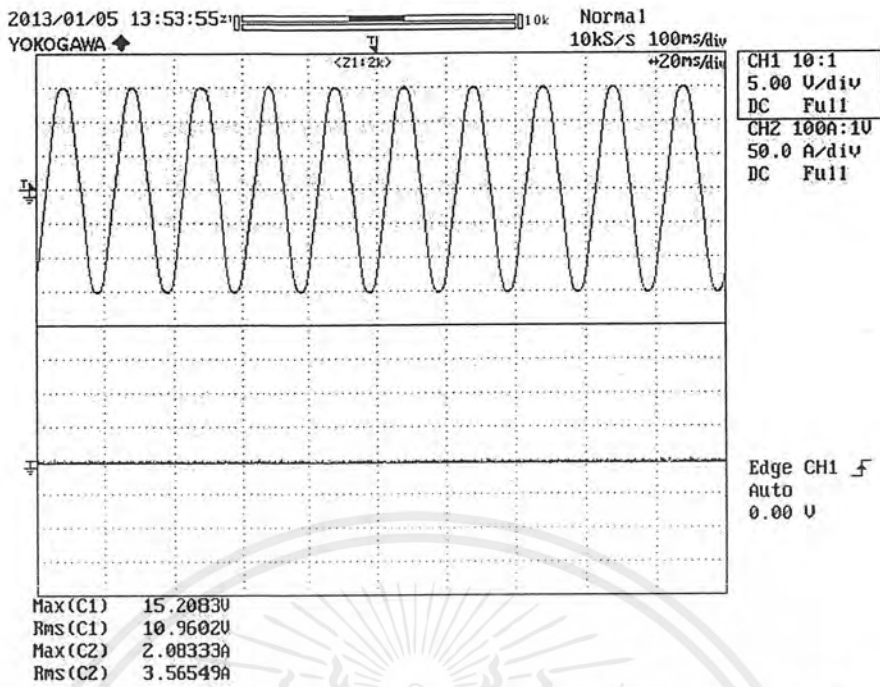


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร

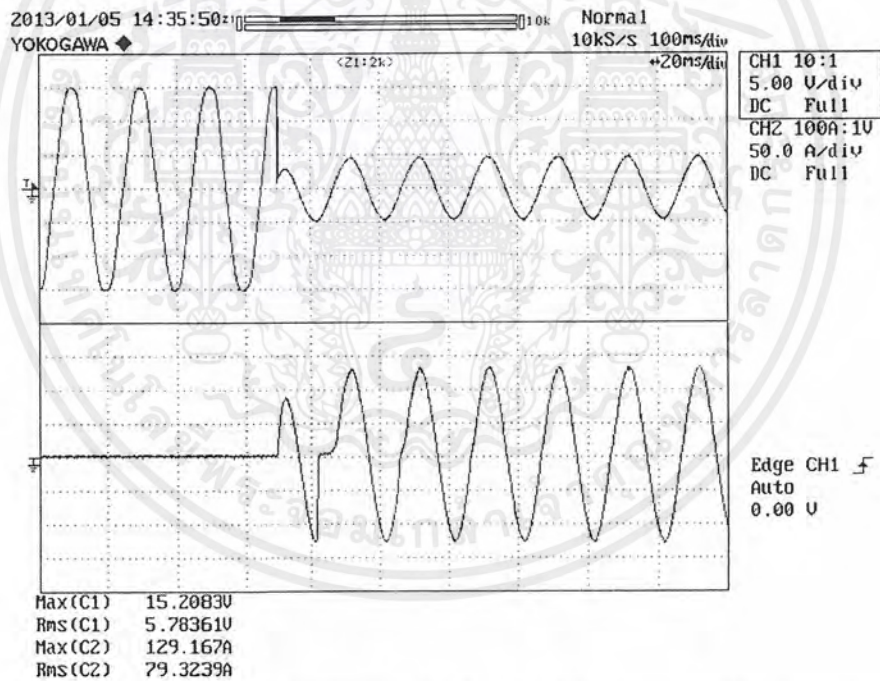
รูปที่ ง.2 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



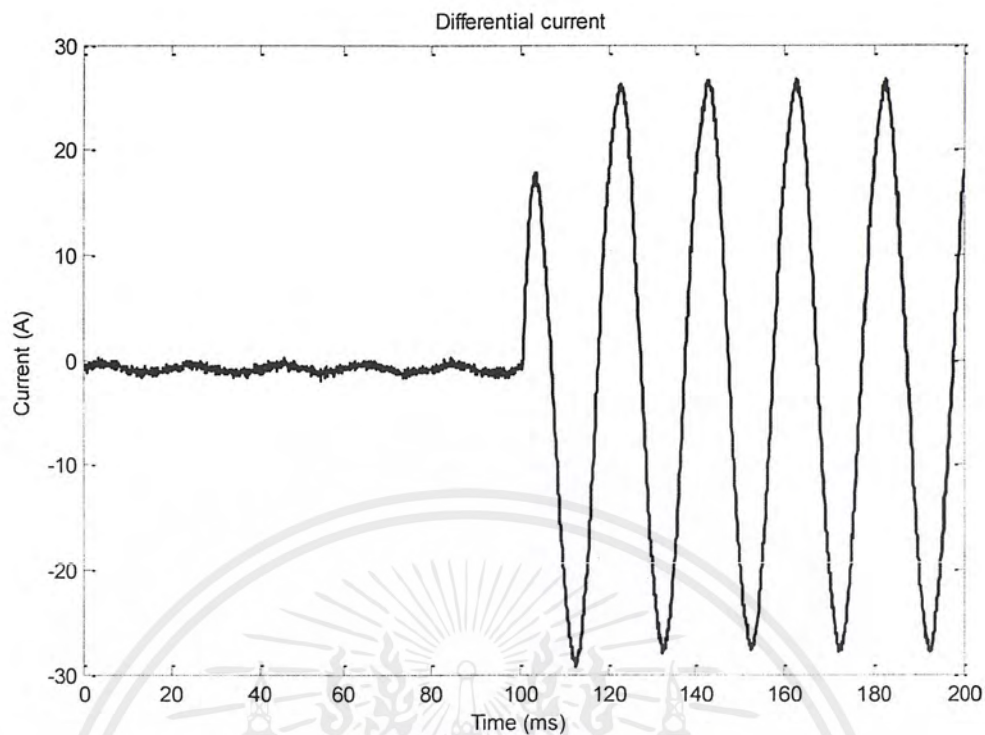
(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร



(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ง.2 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

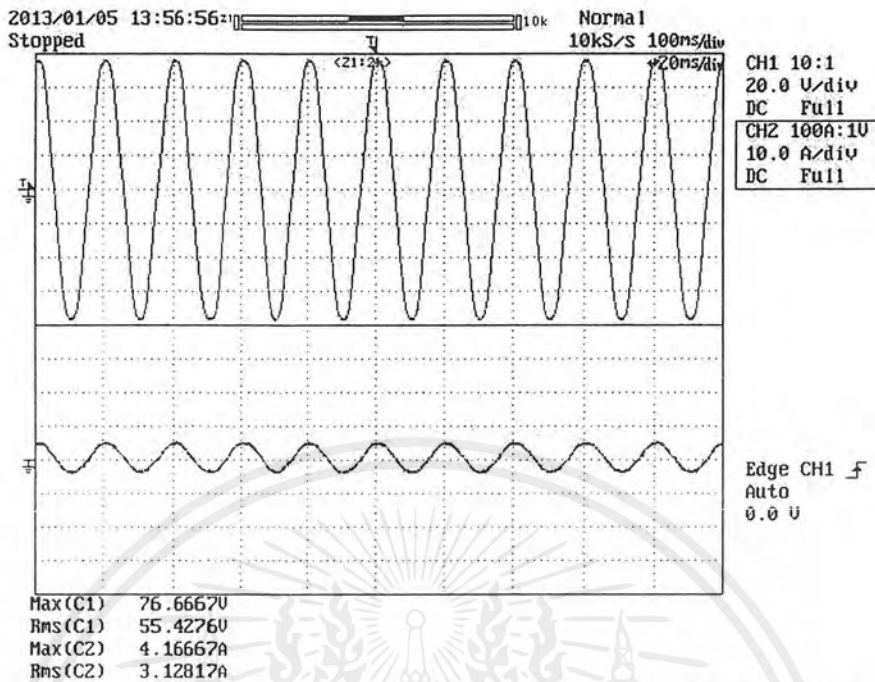


(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

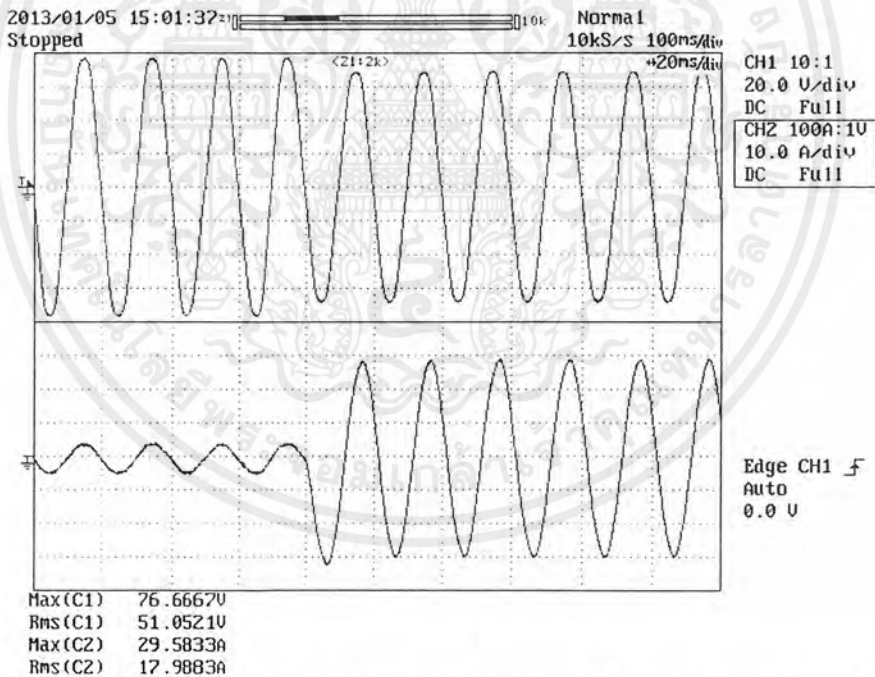
รูปที่ ง.2 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ง.3 กรณีมุมเริ่มต้นที่มุม 180 องศา

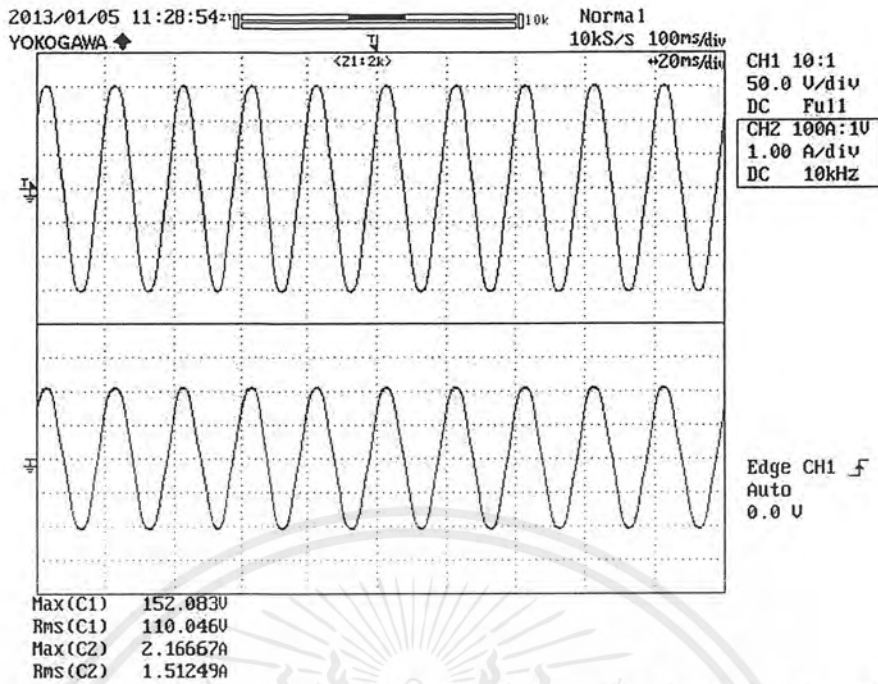


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

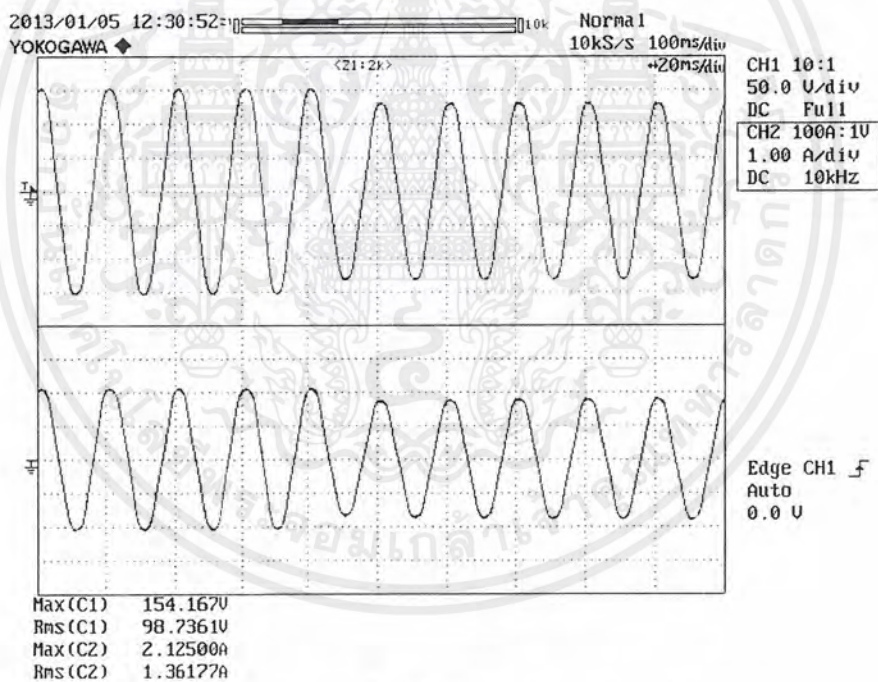


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ ง.3 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

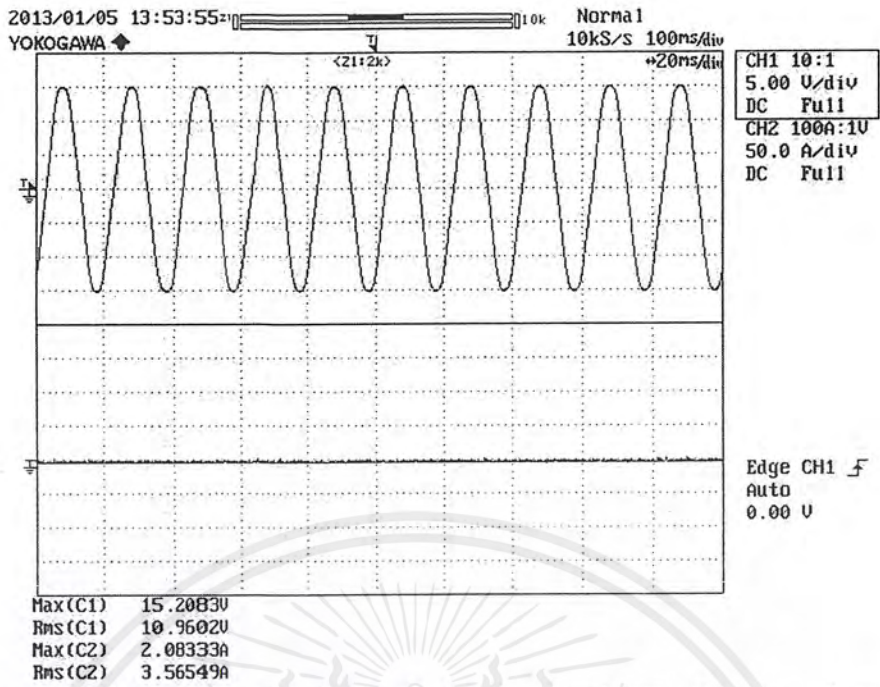


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

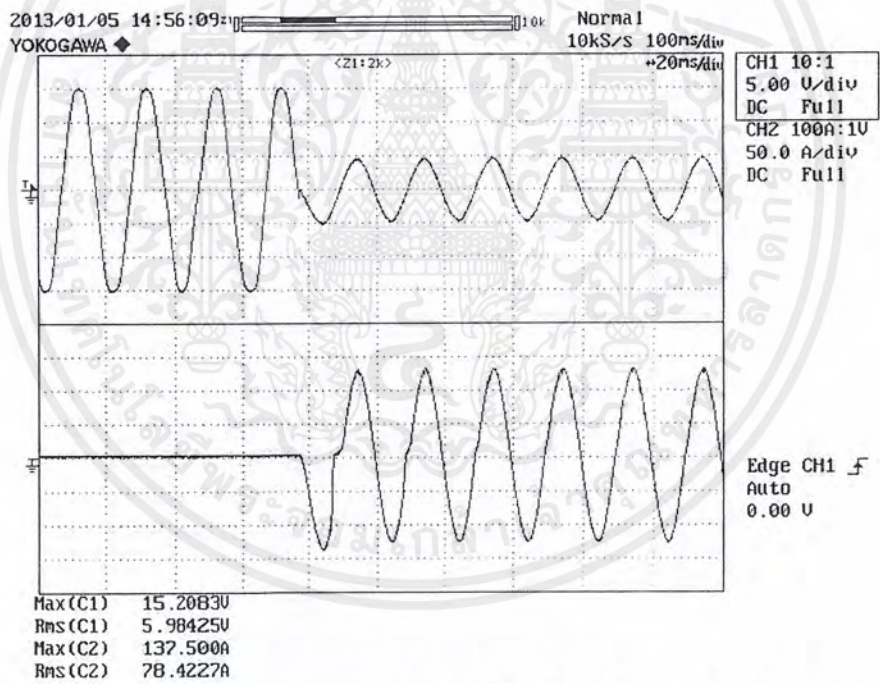


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ ง.3 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

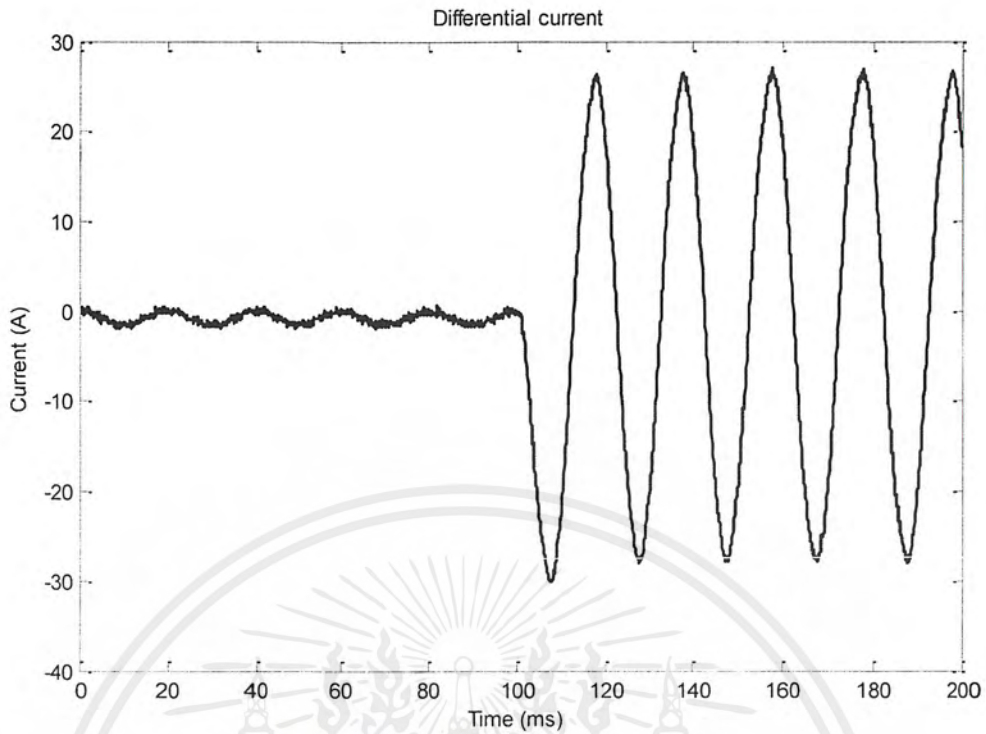


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ง.3 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 180 องศา

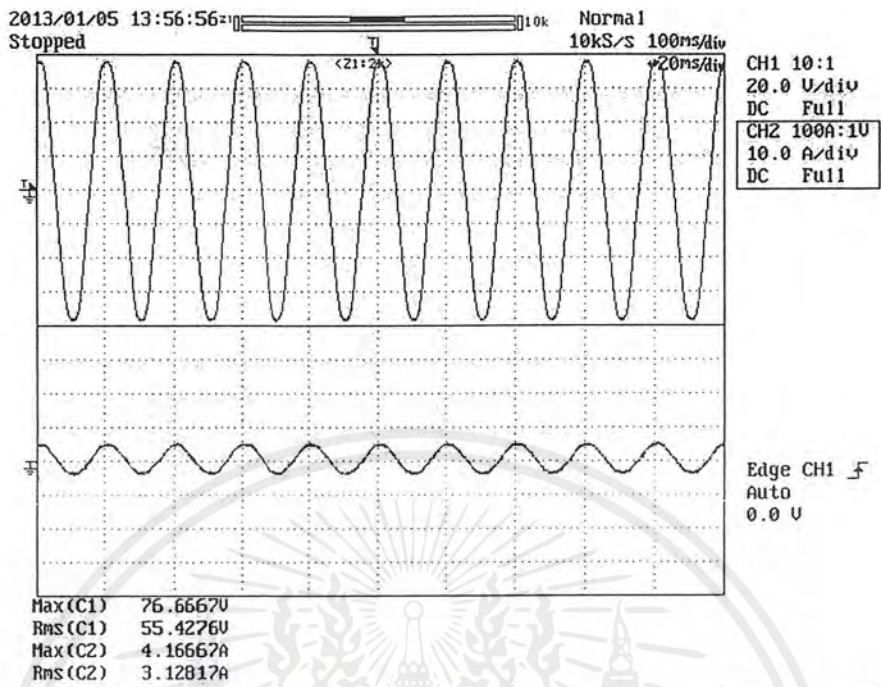
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



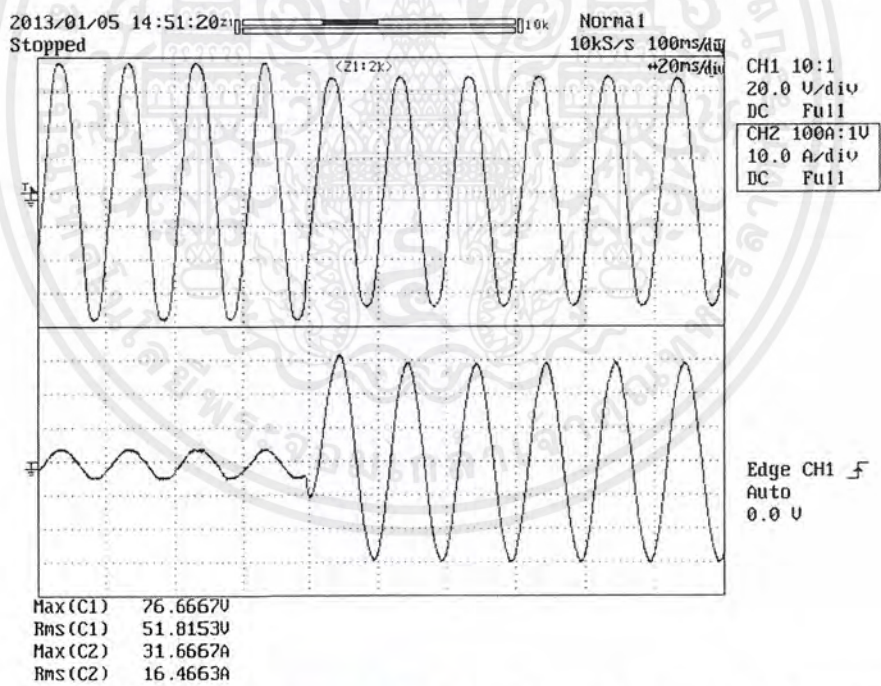
(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ ง.3 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 180 องศา

ง.4 กรณีมุมเริ่มต้นที่มุม 270 องศา

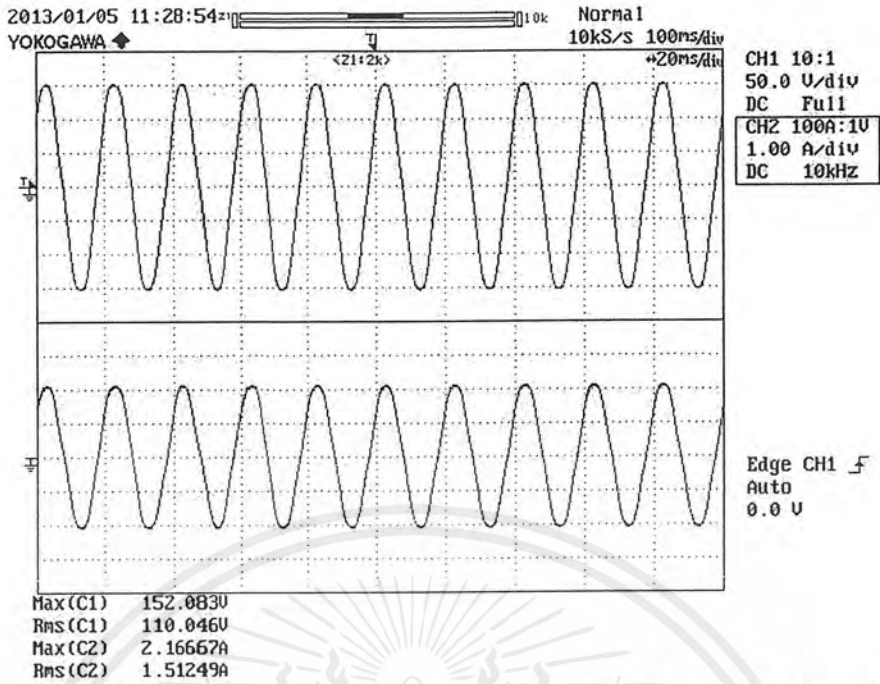


(ก) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

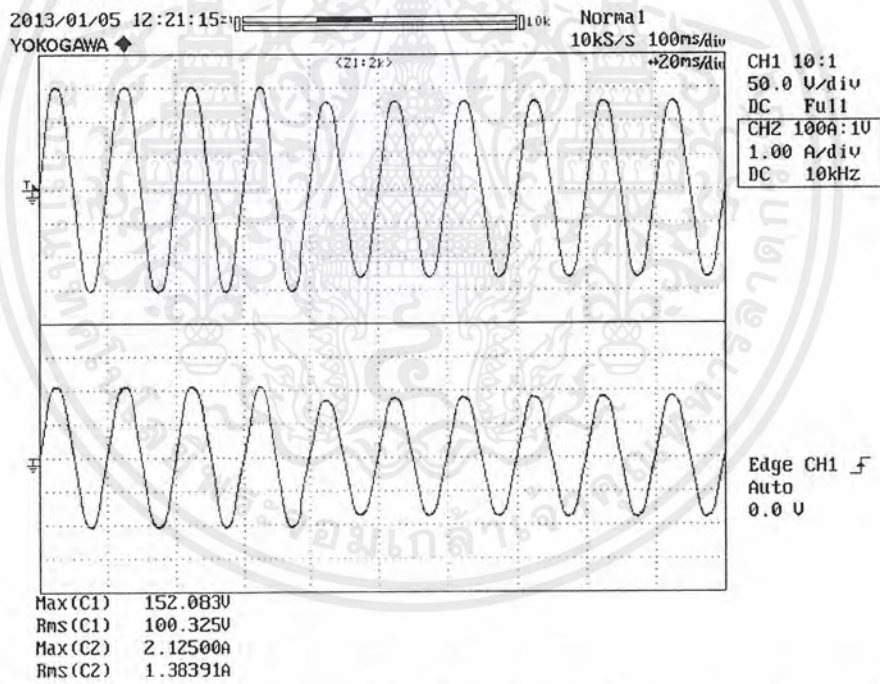


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านปฐมภูมิ หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ง.4 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 270 องศา

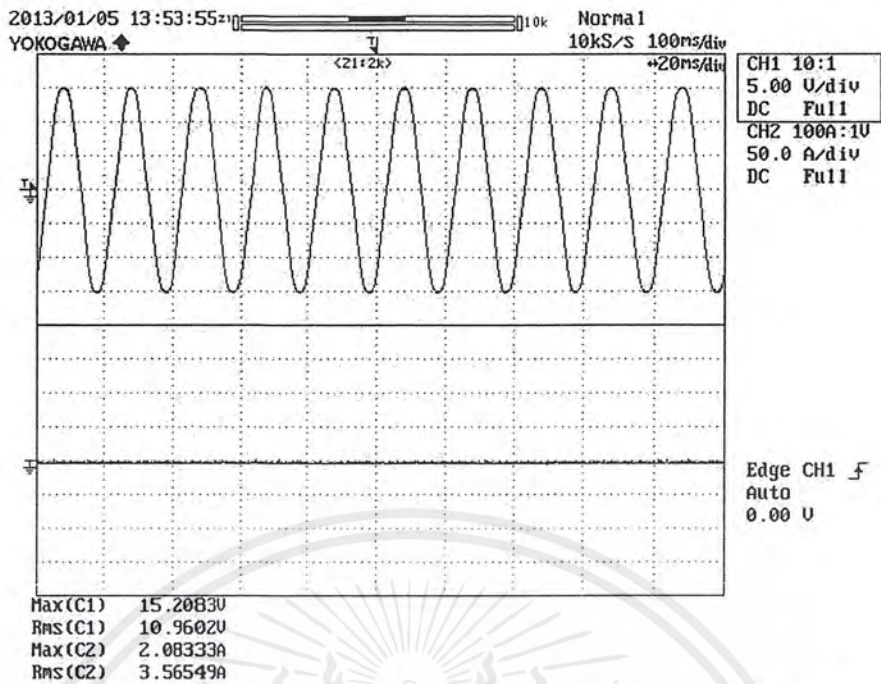


(ค) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ ก่อนทำการลัดวงจร

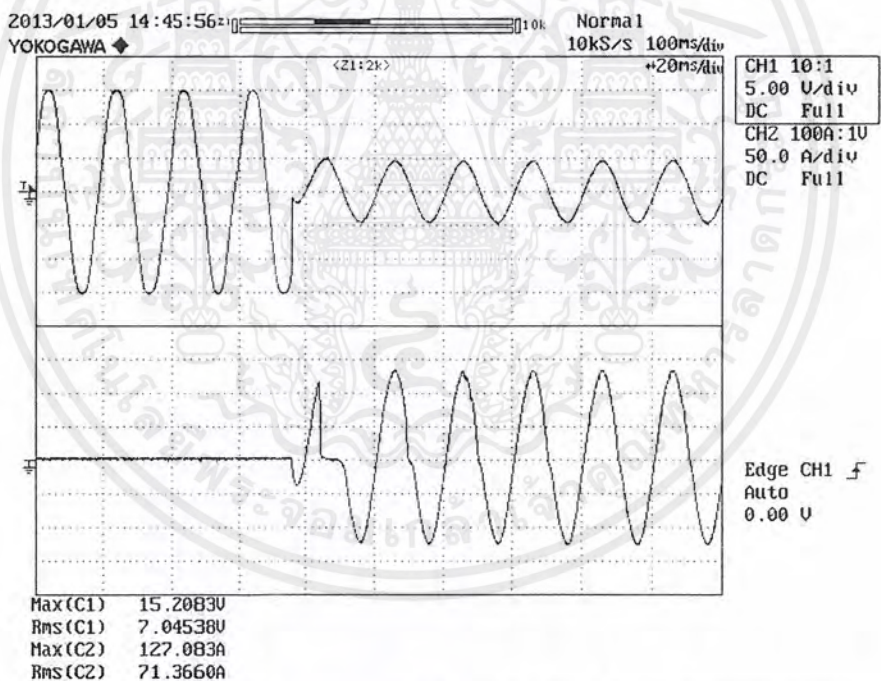


(ง) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ทางด้านทุติยภูมิ หลังทำการลัดวงจร  
รูปที่ ง.4 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 270 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร ก่อนทำการลัดวงจร

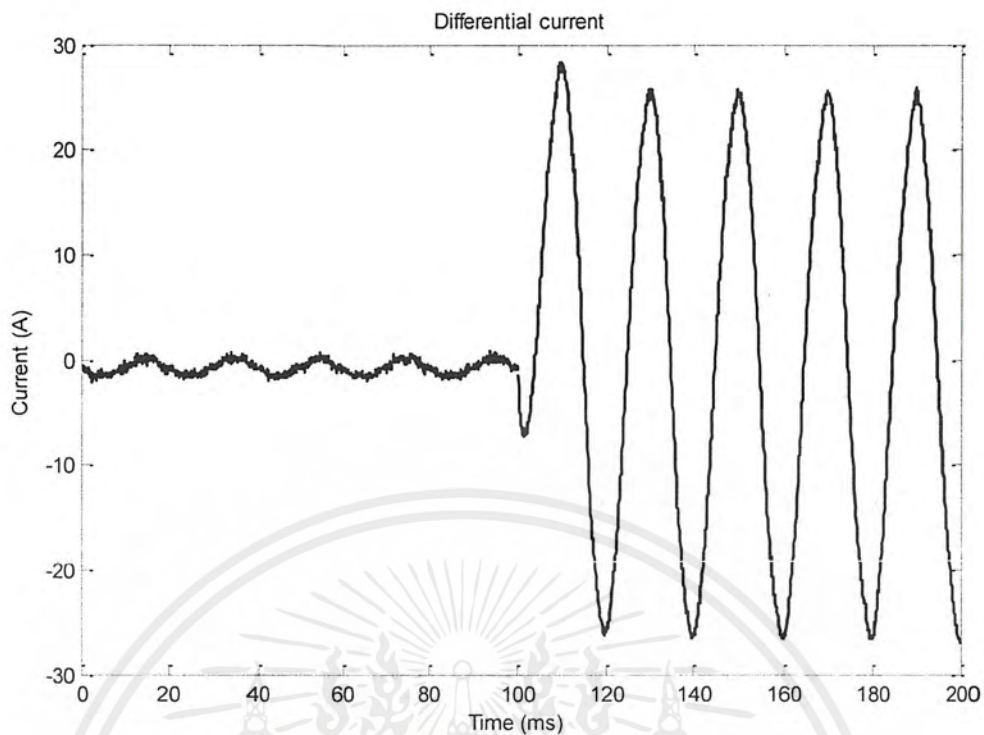


(ข) แรงดันไฟฟ้า (ด้านบน) และกระแสไฟฟ้า (ด้านล่าง) ลัดวงจร หลังทำการลัดวงจร

รูปที่ ง.4 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 270 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระแสผลต่างก่อน และหลังการลัดวงจร

รูปที่ ง.4 (ต่อ) ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ขดลวดแรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์  
ตำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ โหลด 156 วัตต์ มุมเริ่มต้น 270 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด โดยการปรับเปลี่ยนมุมเริ่มต้น

ประเภทขดลวด	ระดับแรงดันหม้อแปลง	โหนด	มุม	ปฐมภูมิ				ทุติยภูมิ				การลัดวงจร		กระแสผลต่าง			
				ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง		
				แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส	แรงดัน	กระแส						
44-88	55/110 V	156 W	0	55.43	3.13	48.51	23.28	110.1	1.51	92.63	1.26	10.96	0	3.46	88.39	0.11	20.76
44-88	55/110 V		90	55.43	3.13	48.08	20.92	110.1	1.51	92.63	1.31	10.96	0	3.32	91.34	0.11	18.3
44-88	55/110 V		180	55.43	3.13	48.51	20.92	110.1	1.51	92.63	1.29	10.96	0	3.43	97.23	0.11	18.34
44-88	55/110 V		270	55.43	3.13	48.08	22.39	110.1	1.51	92.63	1.31	10.96	0	3.64	89.86	0.11	19.77

จากการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด โดยการปรับเปลี่ยนมุมเริ่มต้น พบขดลวดที่แรงดันต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ ดำแหน่ง 44-88 ระดับแรงดันไฟฟ้า 55/110 โวลต์ มุมเริ่มต้น 0 องศา เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองก่อน และหลังการลัดวงจร พบว่า

ทางด้านปฐมภูมิ แรงดันไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร กระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อปรับเปลี่ยนมุมเริ่มต้นเป็นมุม 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับ จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ก่อน และหลังการลัดวงจรมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

ทางด้านทุติยภูมิ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลัดวงจร เมื่อปรับเปลี่ยนมุมเริ่มต้นเป็นมุม 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับ จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ก่อน และหลังการลัดวงจรมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

ทางด้านทุติยภูมิในส่วนของลัดวงจร แนวโน้มพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า คล้ายกับทางด้านปฐมภูมิ แต่ค่าแอมพลิจูดของแรงดันต่ำกว่า ค่าแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรสูงกว่า

เมื่อทำการเปลี่ยนมุมเริ่มต้นเป็นมุม 0, 90, 180, 270 องศา ตามลำดับ กระแสผลต่างหลังการลัดวงจรมีแนวโน้มพฤติกรรมใกล้เคียงกัน แต่ค่าแอมพลิจูดมีค่าแตกต่างกัน



ภาคผนวก จ.

คู่มือการใช้งาน ET-OPTO AC DIMMER

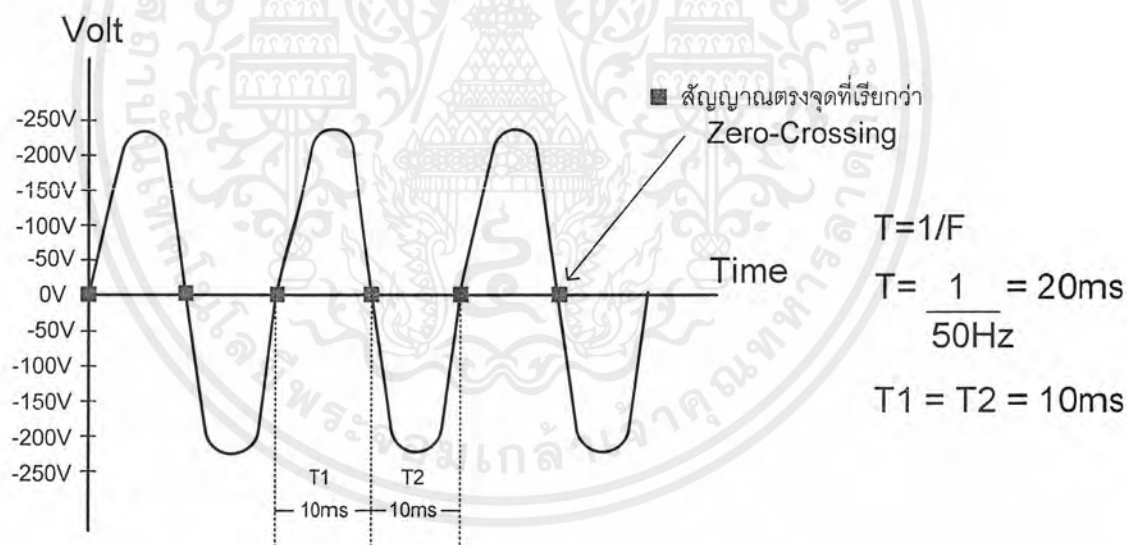
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การใช้งาน ET- OPTO AC DIMMER

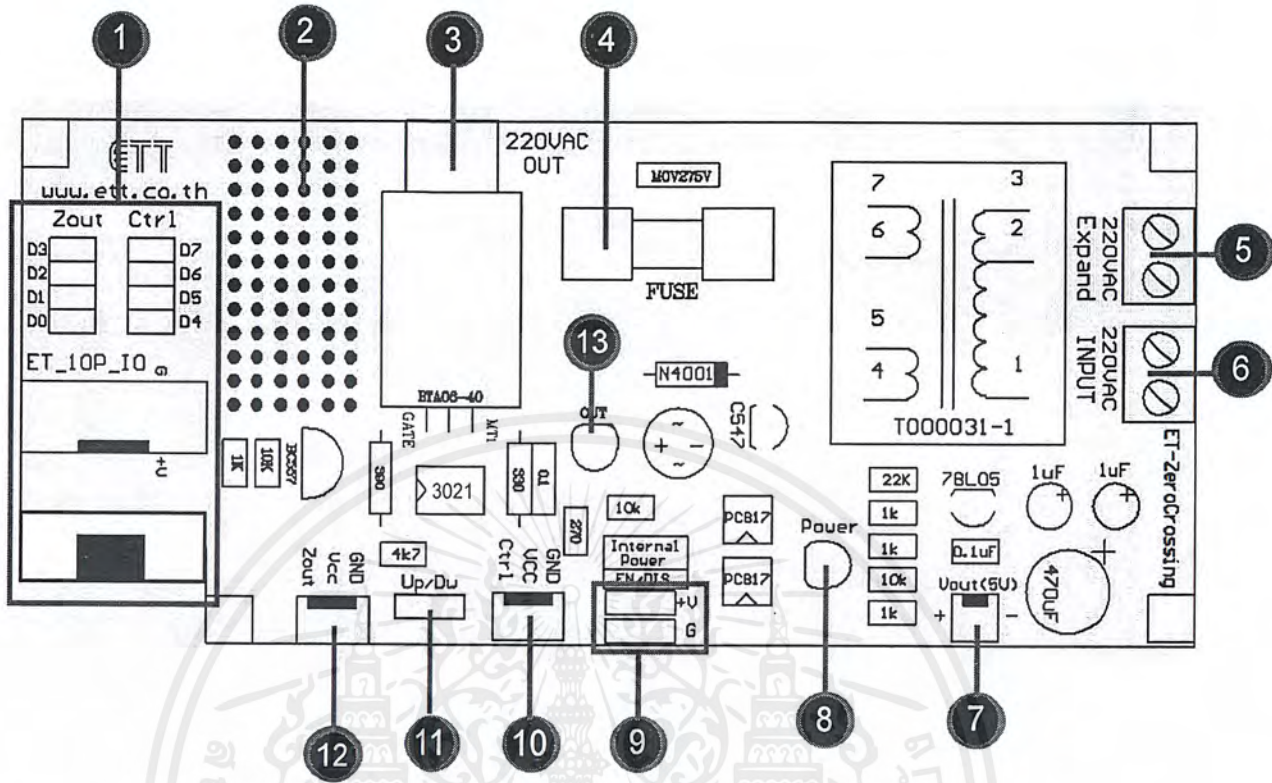
ปัจจุบันเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ล้วนแล้วแต่ใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจาก ไฟฟ้ากระแสสลับแทบทั้งสิ้น เช่น หลอดไฟ, พัดลม, กระจกไฟฟ้า และ อื่นๆ เป็นต้น โดยความต้องการของการควบคุมไฟฟ้านั้น นอกจากการเปิด-ปิด แล้วยังมีเครื่องใช้ไฟฟ้าบางประเภทที่มีความต้องการที่จะทำงานในระดับแรงดันต่างๆ เช่น หลอดไฟแบบไส้ , พัดลม ,มอเตอร์ไฟฟ้า , เครื่องทำความร้อน เป็นต้น

ET-OPTO AC DIMMER เป็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อจุดประสงค์ในการควบคุมระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ให้สามารถมีระดับแรงดันเอาต์พุตต่างๆ ตามที่เราต้องการ โดยอาศัยหลักการในการควบคุมเฟสของ สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (AC 220V) ซึ่งเป็นสัญญาณไซน์เวฟ (มุมเฟส 360 องศา) ขนาดความถี่ 50Hz

การควบคุมเฟสจะอาศัยหลักการทำงานของไทรแอก (Triac) โดยการควบคุมการจุดชนวนเกตของไทรแอก ซึ่งการจุดชนวนเกตที่มุมเฟสต่างๆ ของไทรแอกจะมีผลต่อค่าระดับแรงดันเอาต์พุตกระแสสลับ โดยเราจะใช้ สัญญาณจากจุดที่เรียกว่า Zero-Crossing เป็นจุดอ้างอิงในการกระตุ้นเฟสของสัญญาณ

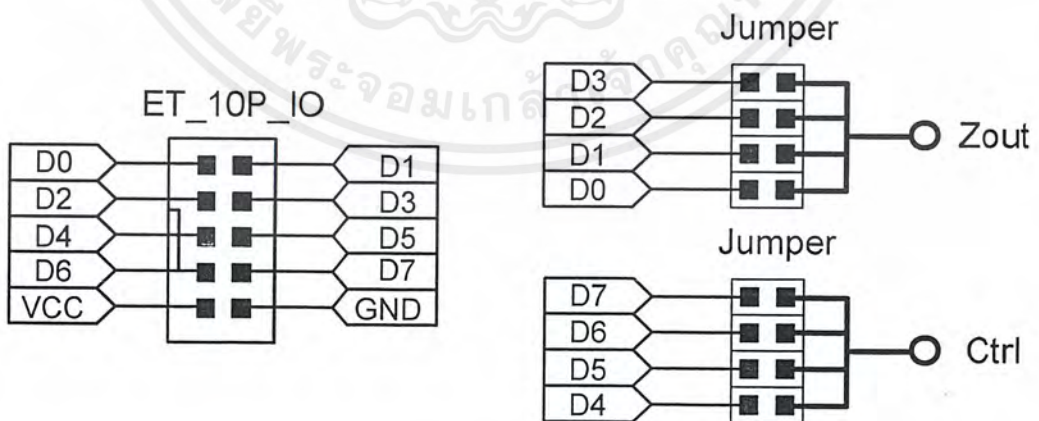


จากรูปสัญญาณ Zero-Crossing จะเกิดขึ้นทุกๆ 10 ms ดังนั้นการควบคุมเฟสของสัญญาณสามารถทำได้โดยอาศัยวิธีการหน่วงเวลาภายใน 0 ถึง 10 ms แล้วส่งพัลส์ไปกระตุ้นขาเกตของไทรแอก (Ctrl) ซึ่งขนาดของสัญญาณพัลส์ที่ไปกระตุ้นควรมีความกว้างอย่างน้อย 10 uSec โดยการจุดชนวนเกตภายในเวลา 0 ถึง 10ms จะมีผลต่อระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เอาต์พุต ซึ่งมีสัดส่วนแปรผันกัน โดยตรงกับค่าเวลาดังกล่าว



สามารถอธิบายโครงสร้างบอร์ดเรียงตามหมายเลขต่างๆ ได้ดังนี้

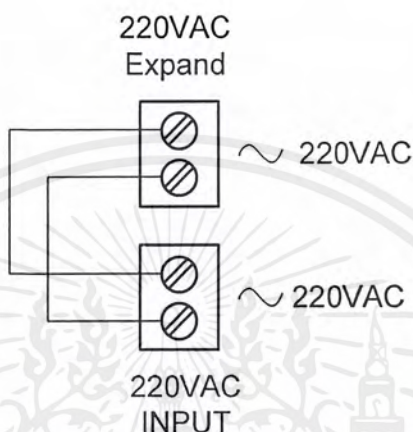
1. พอร์ต ET\_10P\_IO เป็นคอนเนกเตอร์สำหรับเชื่อมต่อระหว่าง สัญญาณของอุปกรณ์ภายนอกกับสัญญาณภายในของบอร์ด ET-OPTO AC DIMMER โดยสัญญาณภายในบอร์ดก็คือ Zout, Ctrl, VCC และ GND



Zout = Zero Crossing Output คือ สัญญาณใช้อ้างอิงที่มุมเฟส 0 องศาของสัญญาณไฟ 50Hz

Ctrl = Control เป็นขาสัญญาณควบคุมการเปิด-ปิด ไฟ 220VAC OUT

2. พื้นที่เอนกประสงค์สำหรับต่อวงจรเพิ่มเติม
3. ขั้วต่อไฟเอาต์พุต 220VAC
4. ฟิวส์ (FUSE) สำหรับป้องกันไฟฟ้ารั่ววงจร
5. 220VAC Expand เป็นจุดต่อขยายของสัญญาณไฟฟ้า 220VAC สำหรับนำไปต่อพ่วงกับอุปกรณ์ภายนอกที่ต้องการ โดยไฟฟ้าที่จุดนี้จะต่อขนานมาจากขั้วต่อสัญญาณ 220VAC INPUT ดังรูป

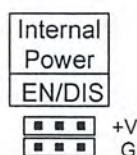


6. 220VAC INPUT เป็นจุดต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ 220VAC เข้ามายังบอร์ดซึ่งสัญญาณนี้จะเชื่อมต่อขนานกับขั้วต่อ 220VAC Expand สำหรับนำไปต่อพ่วงกับอุปกรณ์อื่นๆ ที่ต้องการ
7. Vout(5V) เป็นขั้วต่อแรงดันเอาต์พุตกระแสตรง 5 V ที่ได้มาจากวงจรเรกติไฟเออร์ (78L05) ภายในบอร์ด โดยสามารถนำไปต่อเลี้ยงอุปกรณ์ภายนอกได้ เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นต้น

Vout(5V)

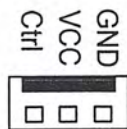


8. Power คือ หลอดไฟแสดงผล LED สำหรับแสดงสถานะของไฟฟ้าภายในบอร์ด
9. Internal Power EN/DIS คือ จัมเปอร์สำหรับเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 5 V และ GND



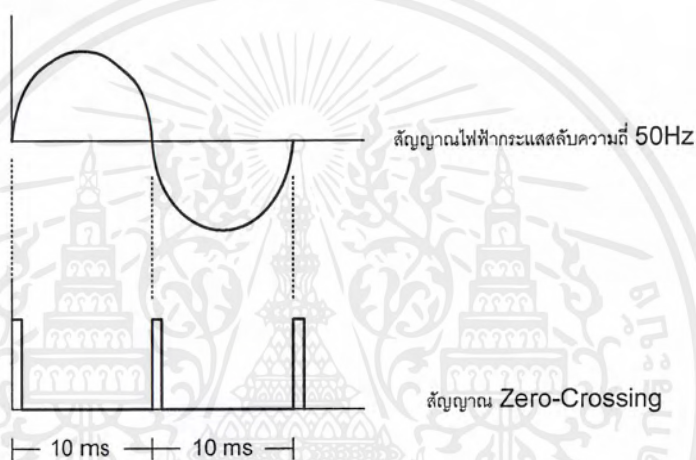
EN = ใช้ไฟจากวงจรเรกติไฟภายใน  
DIS = ใช้ไฟจากภายนอก  
(เพื่อความเข้าใจโปรดดูวงจรประกอบ)

10. Ctrl คือ ขั้วต่อสัญญาณควบคุมไฟฟ้าที่จุด 220VAC OUT ทำงานที่ลอจิก “0” (Active 0)

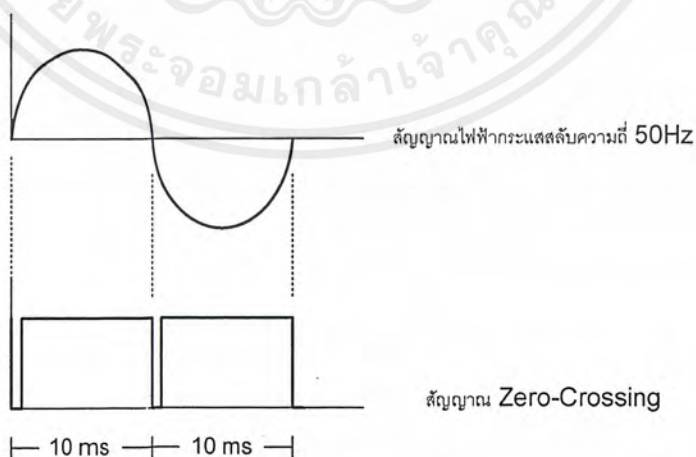


Ctrl = 0 ไตรแอกนำกระแส  
Ctrl = 1 ไตรแอกไม่นำกระแส

11. Up/Dw คือ จัมเปอร์สำหรับเลือกรูปแบบของสัญญาณ Zero-Crossing มีรูปแบบดังนี้  
Up = ให้สัญญาณที่มุมศูนย์กลางของสัญญาณเป็นลอจิก “1” ซึ่งมีลักษณะดังรูปต่อไปนี้



Dw = ให้สัญญาณที่มุมศูนย์กลางของสัญญาณเป็นลอจิก “0” ซึ่งมีลักษณะดังรูปต่อไปนี้



12. ขั้วต่อสัญญาณเอาต์พุต Zero-Crossing โดยจะมีรูปแบบสัญญาณตามข้อ 11

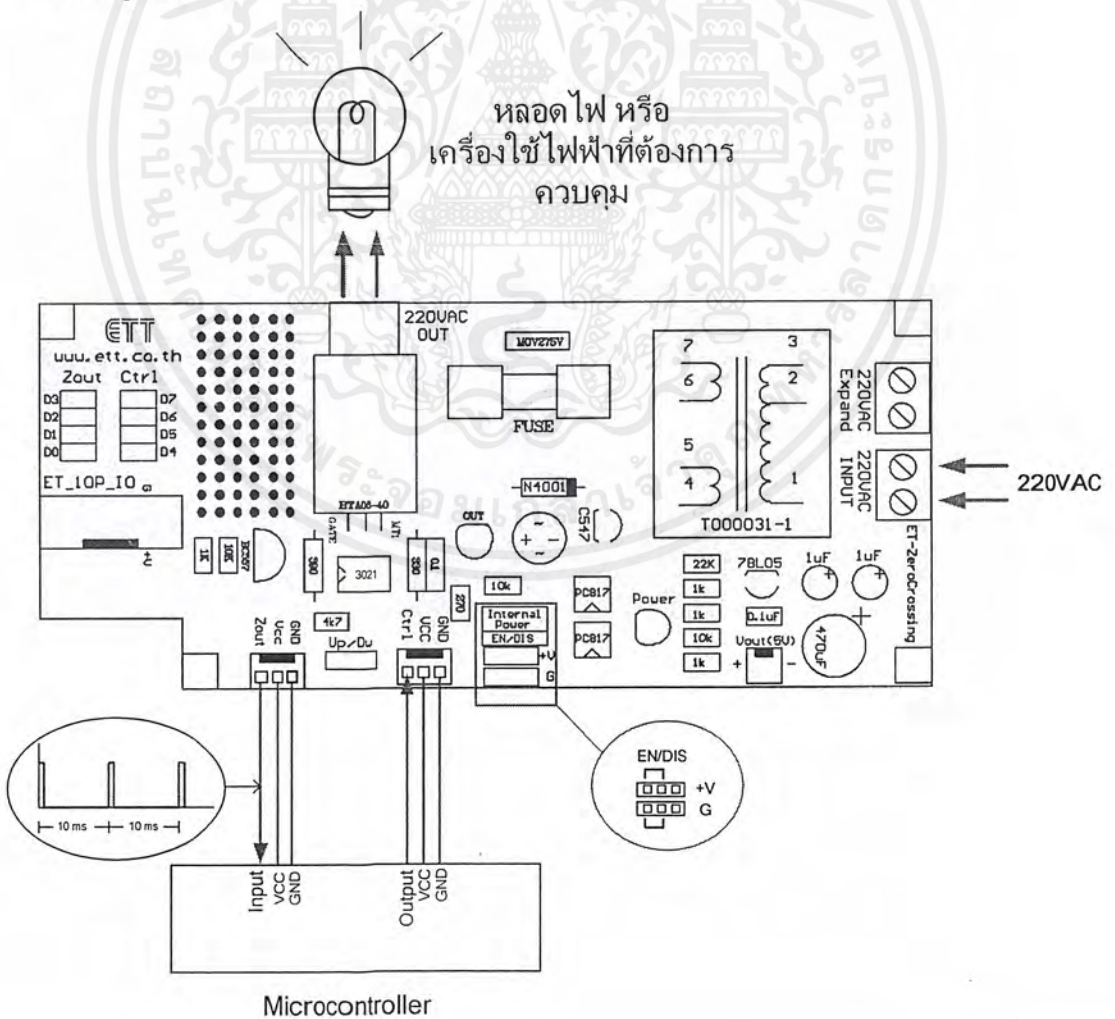
13. LED OUT เป็นหลอดไฟ LED ที่แสดงสถานะการทำงานของวงจรควบคุมไฟฟ้า AC 220V เอาต์พุต
- LED ติดสว่าง = มีลอจิกไปทริก หรือ จุดชนวนการทำงานของ TRIAC
  - LED ดับ = ไม่มี ลอจิกไปทริก หรือ จุดชนวนการทำงานของ TRIAC

**การต่อใช้งาน**

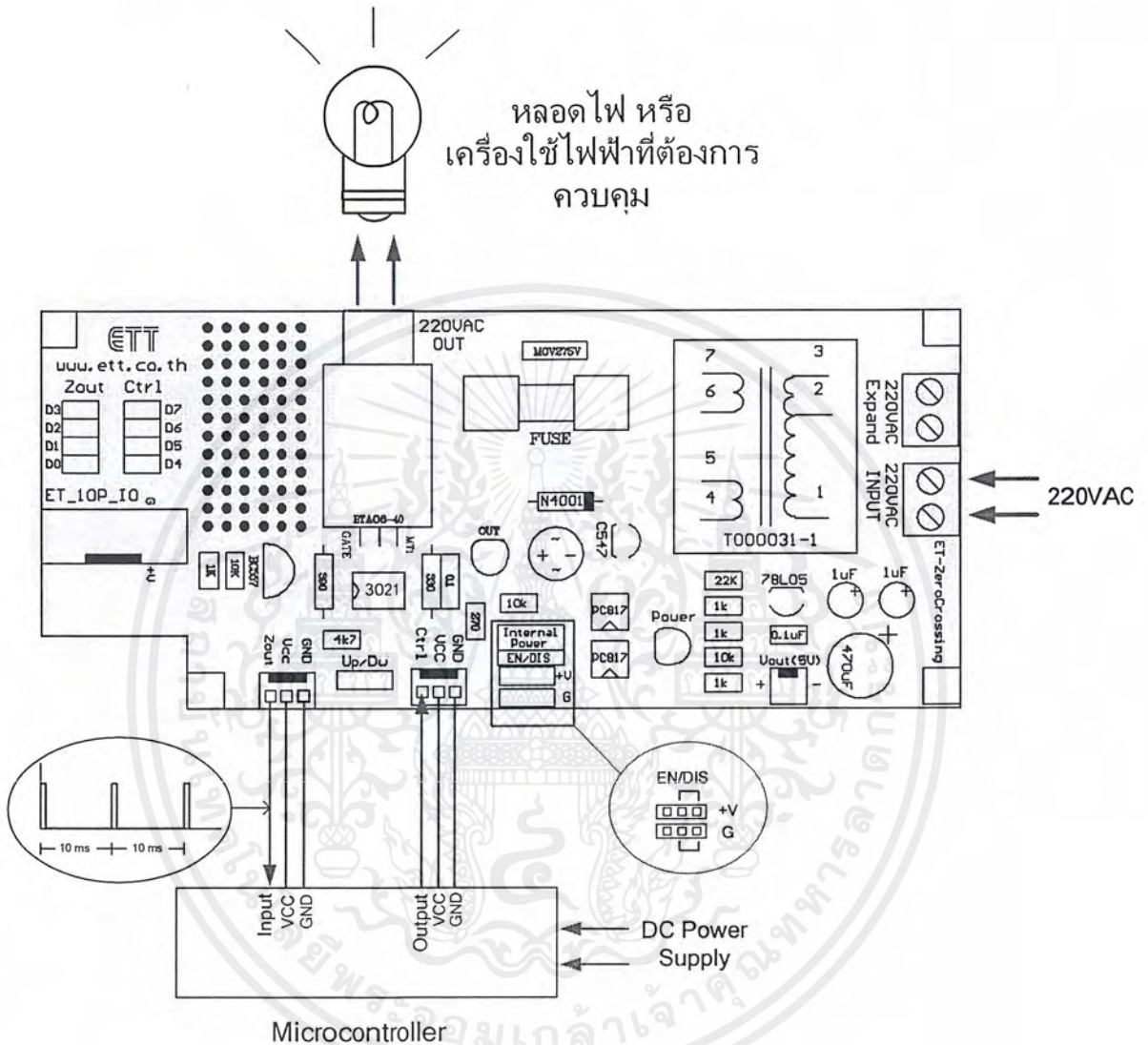
ET-AC Dimmer จำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงาน เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจะมีสัญญาณที่ต้องเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์อยู่ 3 ส่วน ดังนี้

- 1) สัญญาณ Zero-Crossing (Zout)
- 2) สัญญาณกระตุ้นขาเกต (Gate) ของไทรแอก (Ctrl)
- 3) แหล่งจ่ายไฟ (VCC,GND) ซึ่งสามารถใช้แหล่งจ่ายไฟจากภายในบอร์ด ET-AC Dimmer หรือ จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ภายนอกเองก็ได้ โดยการเลือกจัมป์เปอร์ (Internal Power)

■ การต่อแบบใช้ไฟเลี้ยงจากบอร์ด ET-AC Dimmer ให้เลือกจัมป์เปอร์ Internal Power มาที่ตำแหน่ง EN ดังรูปต่อไปนี้



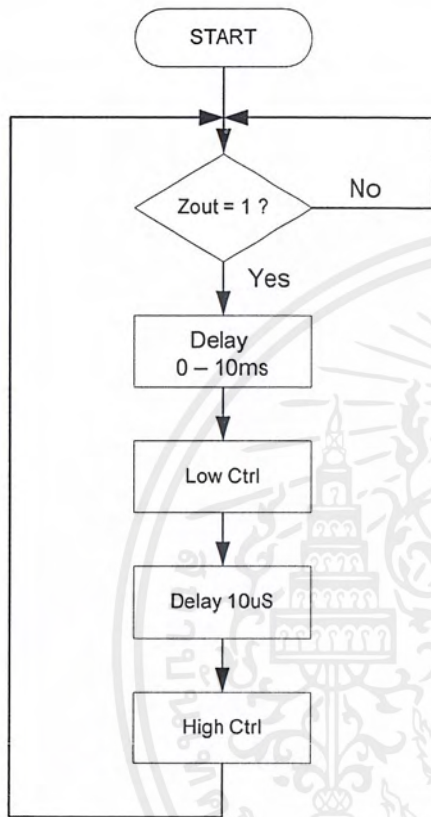
- การต่อแบบใช้ไฟเลี้ยงจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ กรณีที่ไมโครคอนโทรลเลอร์มีแหล่งจ่ายไฟอยู่แล้ว ให้เลือกจัมป์เปอร์ Internal Power มาที่ตำแหน่ง DIS ดังรูปต่อไปนี้



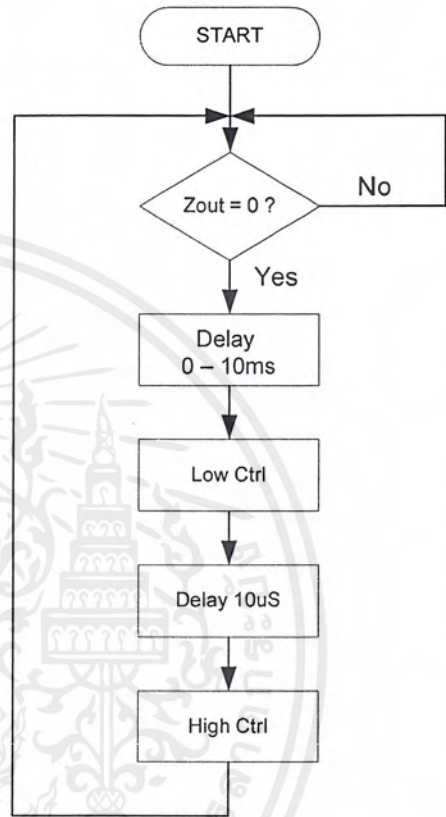
หมายเหตุ เราสามารถทำการเชื่อมต่อสัญญาณ Zout และ Ctrl ได้จากคอนเนคเตอร์ ET\_10P\_IO ได้เช่นกัน

รูปแบบการเขียนโปรแกรมควบคุมไฟ AC แบบง่าย ๆ

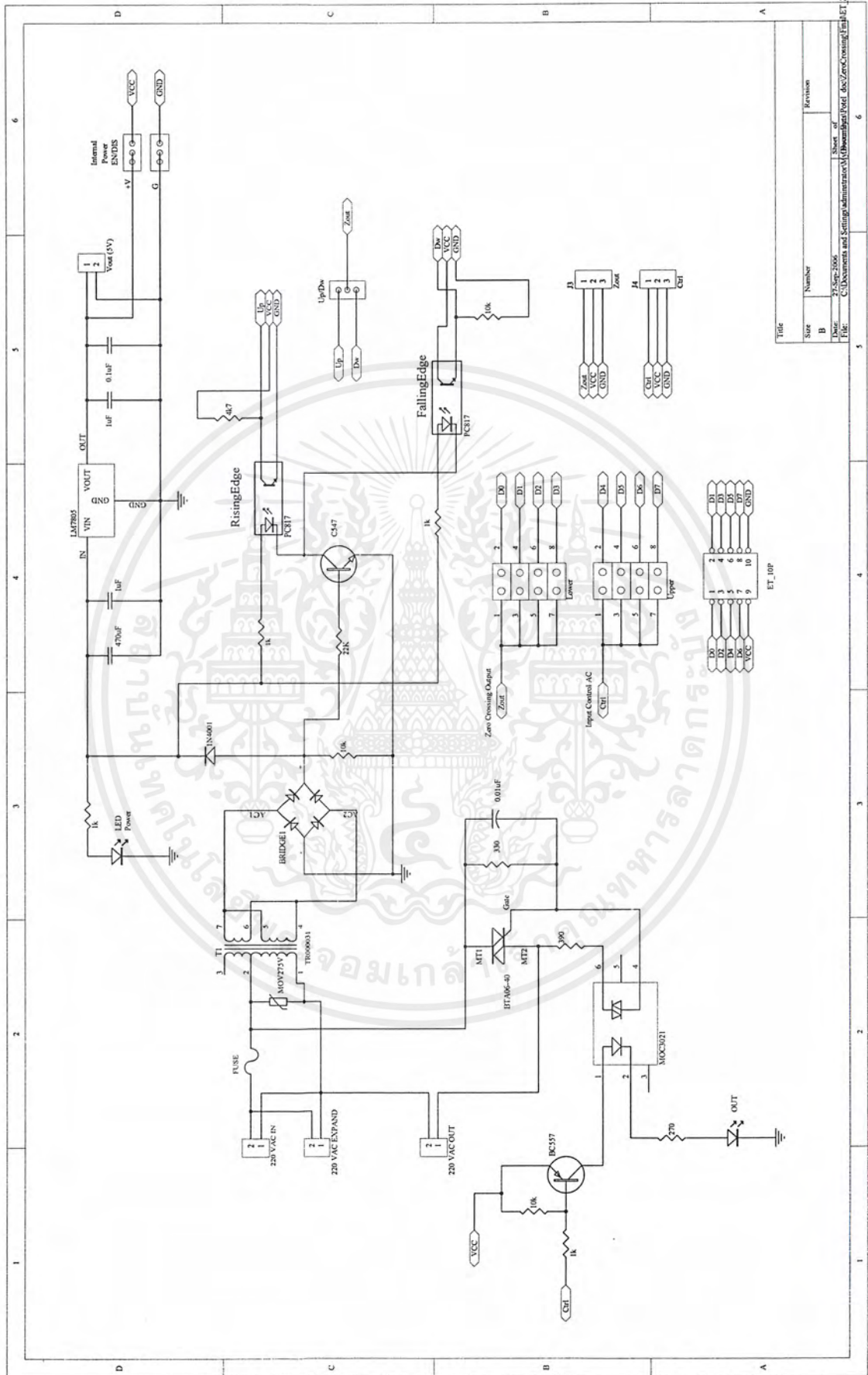
กรณีเลือกจัมเปอร์ Up/Dw เป็น Up



กรณีเลือกจัมเปอร์ Up/Dw เป็น Dw



ค่าหน่วงเวลา (0 - 10ms) จะมีผลต่อระดับแรงดันซึ่งแปรผันในช่วง 0 ถึง 220 volte และ จะต้องหน่วงเวลาให้คงที่ทุก ๆ รอบของการเกิด Zero Crossing ตั้งไฟวาร์ตด้านบน



Title	
Size	Number
B	B
Revision	
Date: 27-Sep-2006	
Sheet of 6	
File: C:\Documents and Settings\administrator\My Documents\ET1.doc\zrcCrossing\Emb\ET1_ZercCrossing_v1.DDB	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นางสาวเบญจวรรณ จิตรแจ้  
เกิดวันที่ 28 พฤษภาคม 2533  
ที่อยู่ 125 หมู่ 6 ถ.ห้วยยอด  
ต.นาตาล่วง อ.เมือง  
จ.ตรัง 92000  
โทรศัพท์ 08-7395-7495  
E-mail: nan\_v\_28@hotmail.com



นายปณิธาน พงษ์ศรีทธาสิน  
เกิดวันที่ 10 มกราคม 2534  
ที่อยู่ 14/59 หมู่ 4 ซ.เอกชัย30 ถ.เอกชัย  
แขวงบางขุนเทียน เขตจอมทอง  
กรุงเทพมหานคร 10150  
โทรศัพท์ 08-2790-1898  
E-mail: p.pongsatthasin@gmail.com



นายภาณุ วิจิตรเอกฉันท  
เกิดวันที่ 5 พฤศจิกายน 2533  
ที่อยู่ 290/11 หมู่ 11 ซ.สวนผัก17 ถ.สวนผัก  
แขวงตลิ่งชัน เขตตลิ่งชัน  
กรุงเทพมหานคร 10170  
โทรศัพท์ 08-7556-6762  
E-mail: panu.k@live.com



นายภาณุพงศ์ คัมภีรานนท์  
เกิดวันที่ 1 สิงหาคม 2533  
ที่อยู่ 106/28 ซ.21/1 ถ.ตลิ่งชัน-สุพรรณบุรี  
ต.บางรักพัฒนา อ.บางบัวทอง  
จ.นนทบุรี 11110  
โทรศัพท์ 08-5923-6188  
Email: kp.panupong@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ชุดการทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส PRACTICE EXPERIMENT OF WINDING FAULT WITHIN 1 PHASE TRANSFORMER

เบญจวรรณ จิตรีแจ่ม<sup>1</sup> ปณิธาน พงษ์ศรีทธานิน<sup>2</sup> ภาณุ วิจิตรเอกถันท์<sup>3</sup> และ ภาณุพงศ์ คัมภีรานนท์<sup>4</sup>  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ดลลวงกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8330

E-mail: nan\_v\_28@hotmail.com,<sup>1</sup> p.pongsatthasin@gmail.com,<sup>2</sup> panu.k@live.com,<sup>3</sup> kp.panupong@gmail.com<sup>4</sup>

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ศึกษาวิจัยชุดทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส แบบแห้ง (Conventional Dry Type) พิกัดขนาด 15 kVA พิกัดแรงดันไฟฟ้า 220/440 โวลต์ ที่ทำการแทนขดลวดด้านไฟฟ้าแรงดันสูงทุก ๆ 10% หรือทุก ๆ 44 โวลต์ ในการทดลองได้ทำการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ซึ่งประกอบด้วย การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด และการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ปริญญานิพนธ์นี้ได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งทางด้านปฐมภูมิทางด้านทุติยภูมิ และทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจร รวมไปถึงกระแสผลต่าง ซึ่งผลจากการทดลองแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมและความรุนแรงของการเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

คำสำคัญ: หม้อแปลงไฟฟ้า, การลัดวงจร

## Abstract

This thesis is focuses on an experimental test set of winding fault within conventional dry-type 1-phase transformer, rated at 15 kVA and Voltage of 220/440 V. This transformer has tap winding on the high voltage every 10% or every 44 V. For the experiment, the short-circuit within the single-phase transformer has been performed; it consists of short-circuit between the winding and short-circuit of the winding to ground. This thesis has demonstrated the effects on primary, secondary, secondary side that is short-circuited and differential current when winding fault occurs within the transformer. The results of the experiments show the behavior and the severity of the winding fault within transformer.

Keywords: transformer, short-circuit

## 1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากในระบบไฟฟ้า เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมโยงและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า และด้วยหม้อแปลงไฟฟ้ามีราคาค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ อีกทั้งจากผลการวิจัยพบว่า 70–80 % ของจำนวนหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดการเสียหายนั้น เกิดจากฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเสื่อมสภาพ ทำให้เกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า (Internal fault) เพราะฉะนั้นเมื่อเกิดความผิดปกติดังกล่าวจึงส่งผลให้เกิดการขาดความต่อเนื่องในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าทำให้เครื่องจักรต้องหยุดชะงัก และเกิดไฟดับในชุมชน ส่งผลเสียหายในด้านของเศรษฐกิจและความน่าเชื่อถือในระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมาก

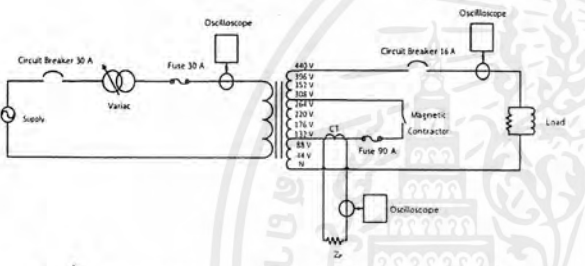
การศึกษารการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส มีการศึกษาและวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง โดยการใช้การจำลองการลัดวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่นใช้โปรแกรมแมทแลป โปรแกรม ATP ดังในงานวิจัยต่อไปนี้เป็นงานวิจัย แบบจำลองสถานะความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมแมทแลป [1], งานวิจัย แบบจำลองสถานะไม่เป็นเชิงเส้นและการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลง [2], งานวิจัย แบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสโดยใช้ FE Based [3] และงานวิจัย แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเกิดความผิดปกติ [4] ในขณะที่เดียวกันก็มีการวิจัยโดยทำการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ดังงานวิจัย ผลทดลองการลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย [5], งานวิจัย การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหาค่าความเสื่อมสภาพของหม้อแปลงระบบจำหน่าย [6] และงานวิจัย คุณลักษณะของปริมาณทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเกิดการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า [7]

จากงานวิจัยข้างต้น โดยส่วนใหญ่เป็นการทดลองโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และมีการทดลองโดยมหาวิทยาลัย Texas A&M ที่ทำการทดลองโดยการทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยเหตุนี้เองจึงเป็นแรงบันดาลใจให้ทำการสร้างชุดการทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยมีการควบคุมมุมเริ่มต้นในการลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การออกแบบชุดทดลองการลัดวงจร

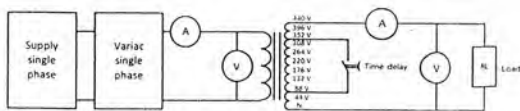
โดยชุดทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสจะรับแรงดันไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการ มาซึ่งหม้อแปลงแบบปรับค่าได้ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้แก่หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในการทดลองได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันคือ เซอร์คิตเบรกเกอร์ และ ฟิวส์ เพื่อป้องกันความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นได้ ในการบันทึกผลการทดลองทั้งแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ได้เก็บบันทึกผลจากออสซิลโลสโคป โดยทำการบันทึกผลทั้งทางด้านปฐมภูมิ ทางด้านทุติยภูมิ และทางด้านทุติยภูมิส่วนที่ทำการลัดวงจร โดยในการทำการลัดวงจรนั้นได้ใช้ชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุมเริ่มต้นการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้วงจร ซีโร-ครอสซิง เพื่อควบคุมมุมเริ่มต้นที่ 0, 45, 90 องศา หลังจากเกิดการลัดวงจรแล้วใช้ตัวตั้งเวลาในการสั่งให้แมคเนติกคอนแทคเตอร์ลัดวงจรออกภายในเวลา 2 วินาที เพื่อป้องกันเกิดการเกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



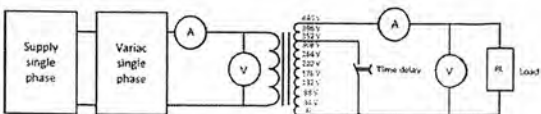
รูปที่ 1 วงจรการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

## 3. ผลการทดลอง

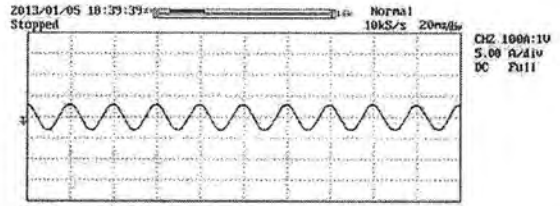
ผลการทดลองของชุดทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส โดยการทดลองมี 2 ลักษณะคือ การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด และ การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ เพื่อความชัดเจนของบทความนี้จะนำเสนอผลการทดลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด และการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน อย่างละ 1 กรณี โดยมีแรงดันไฟฟ้า 27.5/55 โวลต์ มุมเริ่มต้นที่ 0 องศา ช่างโพลต์ที่ 156 วัตต์ ระยะห่างระหว่างแท่งแรงดันเท่ากับ 10% ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4-17



รูปที่ 2 การจำลองการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด

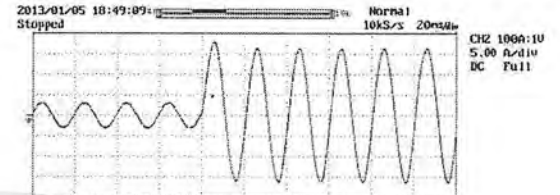


รูปที่ 3 การจำลองการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน



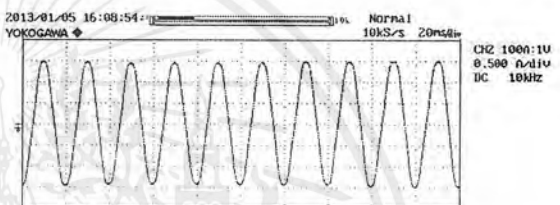
Max (C2) 3.12500A  
Rms (C2) 2.11271A

รูปที่ 4 กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิก่อนทำการลัดวงจร ตำแหน่ง 44-88



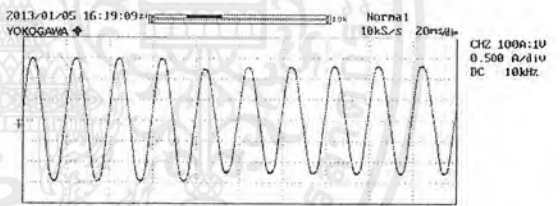
Max (C2) 17.9167A  
Rms (C2) 9.94889A

รูปที่ 5 กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิหลังทำการลัดวงจร ตำแหน่ง 44-88



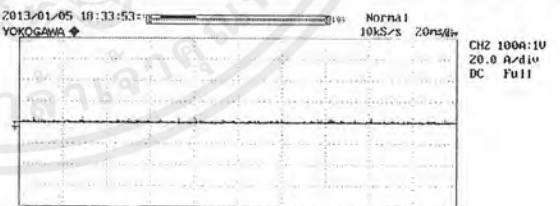
Max (C2) 1.52083A  
Rms (C2) 1.06510A

รูปที่ 6 กระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิก่อนทำการลัดวงจร ตำแหน่ง 44-88



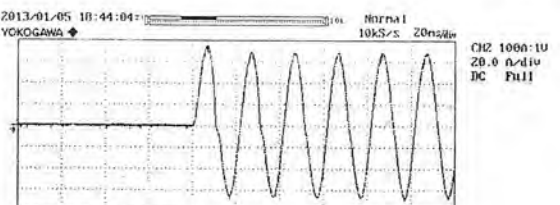
Max (C2) 1.52083A  
Rms (C2) 1.06510A

รูปที่ 7 กระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิหลังทำการลัดวงจร ตำแหน่ง 44-88



Max (C2) 5.00000A  
Rms (C2) 704.760mA

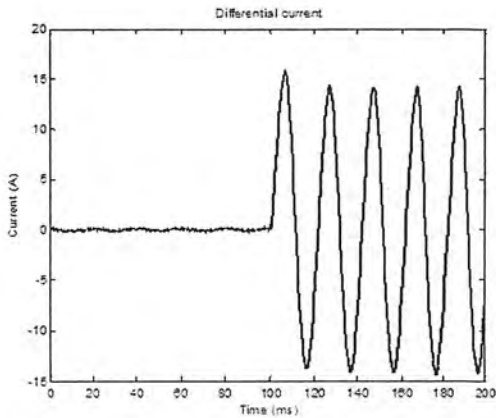
รูปที่ 8 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรก่อนทำการลัดวงจร ตำแหน่ง 44-88



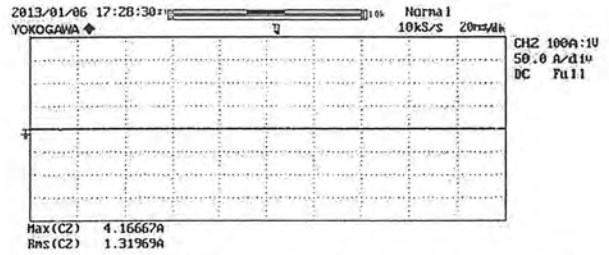
Max (C2) 70.0000A  
Rms (C2) 49.4457A

รูปที่ 9 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรก่อนทำการลัดวงจร ตำแหน่ง 44-88

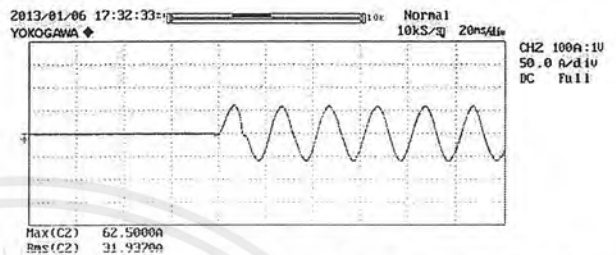
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



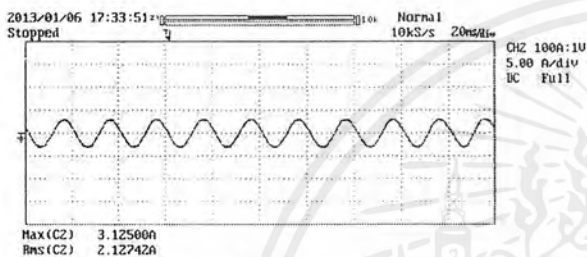
รูปที่ 10 กระแสผลต่างก่อนและหลังการลัดวงจร ตำแหน่ง 44-88



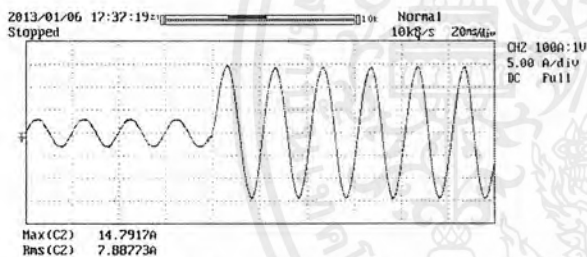
รูปที่ 15 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรก่อนทำการลัดวงจร ตำแหน่ง 44-คืน



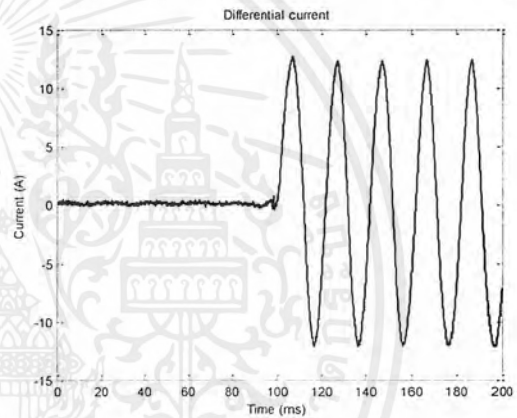
รูปที่ 16 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรหลังทำการลัดวงจร ตำแหน่ง 44-คืน



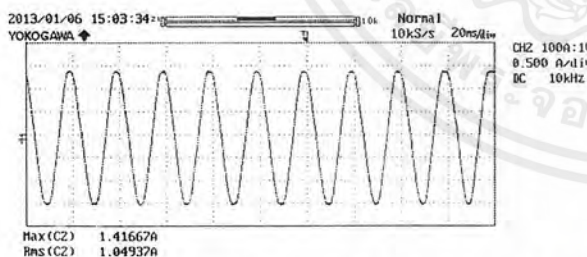
รูปที่ 11 กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิก่อนทำการลัดวงจร ตำแหน่ง 44-คืน



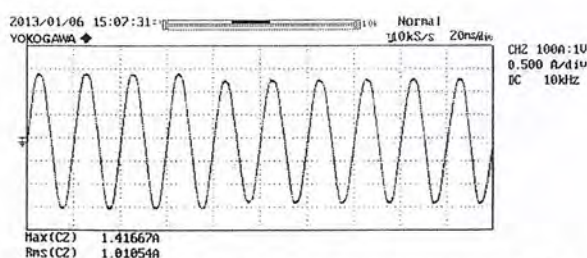
รูปที่ 12 กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิตั้งการลัดวงจร ตำแหน่ง 44-คืน



รูปที่ 17 กระแสผลต่างก่อนและหลังการลัดวงจร ตำแหน่ง 44-คืน



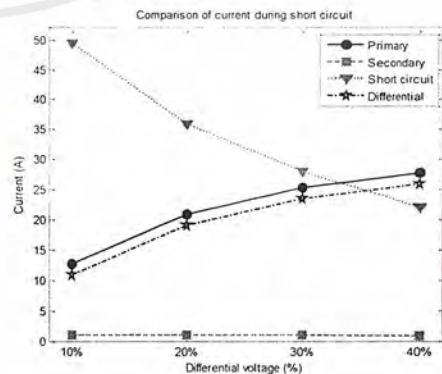
รูปที่ 13 กระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิก่อนทำการลัดวงจร ตำแหน่ง 44-คืน



รูปที่ 14 กระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิตั้งการลัดวงจร ตำแหน่ง 44-คืน

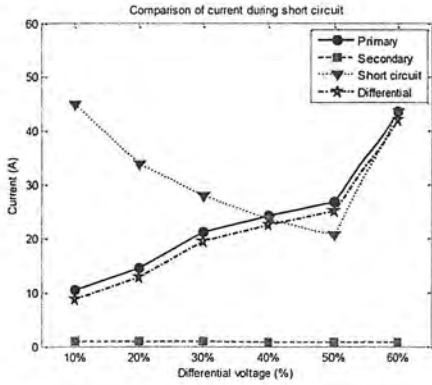
#### 4. สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งทางด้านปฐมภูมิ ทางด้านทุติยภูมิ ทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจร รวมไปถึงกระแสผลต่าง ดังแสดงในรูปที่ 18 และรูปที่ 19



รูปที่ 18 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V แทบขดลวดที่แรงดันต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 19 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดิน ที่ระดับแรงดัน 27.5/55 V แห่ขดลวดที่แรงดันต่างกัน

การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด เมื่อทำการเพิ่มตำแหน่งระหว่างขดลวดที่ทำการลัดวงจรให้ต่างกัน 10%, 20%, 30% และ 40% พบว่า กระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิมีแนวโน้มสูงขึ้น ทางด้านทุติยภูมิ มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรมีแนวโน้มลดลง และกระแสผลต่างหลังการลัดวงจรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

การลัดวงจรระหว่างขดลวดกับดินเมื่อทำการเพิ่มตำแหน่งระหว่างขดลวดกับดินที่ทำการลัดวงจรให้ต่างกัน 10%, 20%, 30%, 40%, 50% และ 60% พบว่า กระแสไฟฟ้าหลังการลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าที่ตำแหน่ง 50% ค่ากระแสไฟฟ้าจะมีแนวโน้มพุ่งขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว ทางด้านทุติยภูมิ มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ทางด้านทุติยภูมิในส่วนที่ลัดวงจรมีแนวโน้มลดลงจนถึงตำแหน่งที่ 50% แล้วจะมีค่าพุ่งขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว และกระแสผลต่างหลังการลัดวงจรมีแนวโน้มคล้ายกับทางด้านปฐมภูมิ

จากผลการทดลองทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของการเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า ความรุนแรงของกระแสลัดวงจร สามารถนำไปใช้ในการออกแบบजनวนของหม้อแปลงไฟฟ้า และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบป้องกันได้ต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

[1] Hesham B. Elrefaie, and Ashraf I. Megahed, "Modeling Transformer Internal Faults Using Matlab," **IEEE MELECON Electrotechnical Conference**, 2002, pp. 226-230.

[2] X.wang, M.Summer and D. W. P. Thomas, "Simulation of single-phase nonlinear and hysteretic transformer with internal faults," 2006.

[3] S. Liu, Z. Liu, and O. A. Mohammed, Fellow, IEEE, "FE-Based Modelling of Single-Phase Distribution Transformers With Winding Short Circuit Faults," **IEEE Transactions On Magnetics**, 2007, Vol. 43, No. 4.

[4] Peter Palmer-Buckle, Karen L. Butler, PE, N.D.E. Sarma, and Alvin Kopp, "Simulation of Incipient Transformer Faults," **Circuits and Systems, 1998 Midwest Symposium**, 1998, pp. 50-53.

[5] Karen L. Butler, Member, IEEE and Adedayo Kuforiji, Student Member, IEEE, "Experimental Results from Short-Circuit Faults on a Distribution Transformer," 2001, pp. 299-306.

[6] Karen L. Butler-Purry, Mustafa Bagriyanik, Mirrasoul J. Mousavi, and Peter Palmer-Buckle, "Experimental Investigation of Internal Short Circuit Faults Leading to Advanced Incipient Behavior and Failure of a Distribution Transformer," **IEEE Power Systems Conference and Exposition (PES)**, 2004, pp. 1407-1416.

[7] Peter Palmer-Buckle, Karen L. Butler, and N. D. R. Sarma, "Characteristics of Transformer Parameters During Internal Winding Faults Based on Experimental Measurements," **IEEE Transmission and Distribution Conference**, 1999, pp. 882-887.

### กิตติกรรมประกาศ

บทความวิชาการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการสนับสนุนจากอาจารย์หลายท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ที่ได้กรุณาให้ข้อแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด และขอขอบคุณบริษัทอีทีไทย จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าให้กับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

### ประวัติผู้เขียนบทความ



1.นางสาว เบนจาวรณ จิตร์แจ้ง  
ที่อยู่ 125 หมู่ 6 ถ.ห้วยยอด ต.นาตาล่วง  
อ.เมือง จ.ตรัง 92000  
08-7395-7495, nan\_v\_28@hotmail.com



2.นาย ปิธิธาน พงษ์ศรีธาสิน  
ที่อยู่ 14/59 หมู่ 4 ถ.เอกชัย แขวงบางขุนเทียน  
เขตจอมทอง กรุงเทพฯ 10150  
08-2790-1898, p.pongsathasin@gmail.com



3.นาย ภาณุ วิจิตรเอกกันท์  
ที่อยู่ 290/11 หมู่ 11 ถ.สวนผัก แขวงคลังชั้น  
เขตคลังชั้น กรุงเทพฯ 10170  
08-7556-6762, panu.k@live.com



4.นาย ภาณุพงศ์ คัมภีรานนท์  
ที่อยู่ 106/28 ซ.21/1 ถ.คลังชั้น-สุพรรณบุรี  
อ.บางบัวทอง จ.นนทบุรี 11110  
08-5923-6188, kp.panupong@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้