สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดขดลวดโรกอฟสกี้เพื่อวัดกระแส 3 เฟส

ROGOWSKI COIL FOR MEASURING THREE-PHASE CURRENT IN POWER SYSTEM

T117568

โดย

นางสาว ทัชริณ จันทน์วัฒนวงษ์
นางสาว นภัสวรรณ อนุรักษ์สินทวี
นางสาว นฤมล ประชา
นาย นัฐพงศ์ ตั้งปัญญาโชติ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 117568
วัน,เดือน,ปี - 5 ส.ค. 2554

b. 1234 ง.3
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2553

ชุดขดลวดโรกอฟสกี้เพื่อวัดกระแส 3 เฟส

ROGOWSKI COIL FOR MEASURING THREE-PHASE CURRENT IN POWER SYSTEM

โดย

นางสาว ทัชริณ จันทน์วัฒนวงษ์

นางสาว นภัสวรรณ อนุรักษ์สินทวี

นางสาว นฤมล ประชา

นาย นัฐพงศ์ ตั้งปัญญาโชติ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. เชาว์ ชมภูอินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดขดลวดโรกอฟสกี้เพื่อวัดกระแส 3 เฟส

ผู้จัดทำ

1. นางสาว ทัชริณ จันทน์วัฒนวงษ์
2. นางสาว นภัสวรรณ อนุรักษ์สินทวี
3. นางสาว นฤมล ประชา
4. นาย นัฐพงศ์ ตั้งปัญญาโชติ

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เชาว์ ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดขดลวดโรกอฟสกี้เพื่อวัดกระแส 3 เฟส

นางสาว ทัชริณ จันทน์วัฒนวงษ์
นางสาว นภัสวรรณ อนุรักษ์สินทวี
นางสาว นฤมล ประชา
นาย นัฐพงศ์ ตั้งปัญญาโชติ
ผศ.ดร. เชาว์ ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดขดลวดโรกอฟ สกี้เพื่อวัดกระแส 3 เฟส ในวงจรไฟฟ้ากำลัง ซึ่งวงจรการวัดโดยขดลวดโรกอฟสกี้จะต่อแยกออกจากวงจรทดสอบ ทำให้สามารถลดความเสี่ยงในการต่อเครื่องมือวัดกับวงจรทดสอบโดยตรง และรูปแบบสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกี้นั้น สามารถใช้ออสซิลโลสโคปเป็นตัวแสดงผล ในงานวิจัยได้เสนอหลักการออกแบบและการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของขดลวดโรกอฟสกี้ แบบตัวต้านทาน และเมื่อจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice พบว่าขดลวดโรกอฟสกี้แบบวงจรอินทิเกรทตัวต้านทานที่ออกแบบ มีการตอบสนองย่านความถี่และความถูกต้องของย่านการวัดอยู่ในระดับที่น่าพอใจ อุปกรณ์ที่ออกแบบมีพิกัดกระแส 40.39 A อัตราขยาย 0.02 (250/5) สามารถวัดกระแสที่มีขนาด 0.125 A ความถี่ 29.76 Hz ขึ้นไป จากผลการทดลองวัดขนาดและรูปคลื่นกระแส Linear load , Non-Linear load ,แหล่งจ่ายความถี่สูง เปรียบเทียบกับ current probe และ หม้อแปลงกระแสได้ค่าความผิดพลาดของการวัดกระแส ± 2.83 % ค่าความถี่ในช่วงการวัดกระแส อยู่ประมาณ 29.76-15 kHz และสามารถตรวจจับกระแสดิสชาร์จบางส่วนได้ ซึ่งผลงานวิจัยอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานตรวจวัดกระแสในระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ROGOWSKI COIL FOR MEASURING THREE-PHASE CURRENT IN POWER SYSTEM

Thatcharin Janwatthanawong
Napatsawon Anuruksinthawee
Narutmol Prachar
Natthapong Tungpanyachot
Asst.Prof.Dr.Chow Chompoo-inwai Supervisor

2010

ABSTRACT

This research presents the designing and creating of Rogowski Coil measuring currents in three-phase for electrical power system. Since the Rogowski separately connects to the test circuit, the risk from direct connecting to the measuring equipment and the test circuit can be decreased. In addition, the signal shown from the Rogowski coil measurement can be displayed on Oscilloscope. The research also presents the designing and calculating for parameters of Self-Integrating Rogowski Coil. Simulation by Pspice program showed that the frequency response and accuracy of the measurement is satisfactory. The Rogowski coil has current rate 40.39 A. The gain is 0.02. Ability in measuring minimum current is 0.125 A. Results from the experiment showed that amplitude and waveforms compared with the current probe and current transformer has an error of ± 3% measurement and frequency range is around 29.76 Hz-15 kHz. It can also detect the partial-discharge. This research is satisfactory and can be applied to measure current in power systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ประสบผลสำเร็จได้ด้วยคำแนะนำและความเอาใจใส่เป็นอย่างดี จาก ผศ.ดร. เชาว์ ชมภูอินไหว ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณบุญมี คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ที่คอยเอาใจใส่และช่วยเหลือในเบิกใช้อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการจนการดำเนินการทดลองในปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ พี่ๆทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา และ ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการทดลองตลอดจนให้กำลังใจในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนลงได้สำเร็จ

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ให้การสนับสนุนคณะผู้จัดทำในทุกๆด้าน และคอยให้กำลังใจในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ตลอดมา

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ I

ABSTRACT II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญภาพ VI

สารบัญตาราง X

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ 1

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน 1

1.4 แผนการดำเนินโครงงาน 2

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการโครงงาน 2

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 หลักการของขดลวดโรกอฟสกี้ 3

2.2 วงจรต่อด้านขาออกของขดลวดโรกอฟสกี้ 5

2.2.1 ขดลวดโรโกฟสกี้ชนิด Self integrator 5

2.2.2 ขดลวดโรโกฟสกี้ชนิด RC integrator 7

2.3 การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน 9

2.4 ผลกระทบของดิสชาร์จบางส่วน 10

2.5 การแสดงผลดิสชาร์จบางส่วน 10

2.6 การวัดดิสชาร์จบางส่วน (PD) 11

2.7 แกนเฟอร์ไรท์ 11

2.8 แกนอากาศ 11

บทที่ 3 การออกแบบและสร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้ 3 เฟส 12

3.1 การเลือกชนิดของวงจรอินทิเกรเตอร์ 13

3.1.1 Self integrator 14

3.1.2 RC integrator 15

3.2 การเลือกชนิดของแกน 18

3.3 การประกอบสร้าง 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การดำเนินการทดลองและผลการทดลอง 21
4.1 การทดลองหาค่าความผิดพลาดในการวัดกระแส 50 Hz 22
4.1.1 การทดลองวัดกระแส Linear load 22
4.1.1.1 ผลการทดลองวัดกระแสโหลดหลอดไฟ (R) 22
4.1.1.2 ผลการทดลองวัดกระแสโหลดตัวเหนียวนำ (L) 26
4.1.1.3 ผลการทดลองวัดกระแสโหลดเก็บประจุ (C) 30
4.1.1.4 ผลการทดลองวัดกระแสโหลด RLC 34
4.1.1.5 ผลการทดลองวัดกระแสโหลด Induction motor 38
4.1.1.6 ผลการทดลองหากระแส Minimum 42
4.1.1.7 ผลการทดลองหากระแส Maximum 43
4.1.2 ผลการทดลองวัดกระแส Non Linear load 45
4.1.2.1 ผลการทดลองวัดกระแสของ Ballast Electronic 45
4.1.2.2 ผลการทดลองวัดกระแสของ DC Convertor 47
4.2 ทดลองหาความถี่จำกัดของขดลวด A, B, C 52
4.2.1 ผลการทดลองหาความถี่จำกัดขอบบน 53
4.2.2 ผลการทดลองหาความถี่จำกัดขอบล่าง 54
4.3 การทดลองวัดกระแสดิสชาร์จบางส่วน 56
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ 59
5.1 สรุปผลการดำเนินการทดลอง 59
5.2 อุปสรรค์และวิธีการแก้ไข 60
5.3 ข้อเสนอแนะ 60
บรรณานุกรม 61
ภาคผนวก 62
ประวัติผู้เขียน 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ขดลวดโรกอฟสกี้คล้องตัวนำที่มีกระแสไหล i_p	3
2.2	ขดลวดโรโกฟสกี้ชนิด Self Integrator	5
2.3	ผลตอบสนองทางความถี่ของขดลวดโรกอฟสกี้ชนิด Self integrator	7
2.4	ขดลวดโรกอฟสกี้ชนิด RC Integrator	7
2.5	ผลการตอบสนองทางความถี่ของขดลวดโรโกฟสกี้ชนิด RC Integrator	9
2.6	การเกิดดิสชาร์จบางส่วน	9
2.7	การแสดงผลของ PD	10
3.1	ขั้นตอนในการออกแบบ	12
3.2	มิติของแกนขดลวด	12
3.3	วงจรสมมูลย์โรกอฟสกี้คอยล์ชนิด Self Integrator	14
3.4	วงจรสมมูลย์ขดลวดโรกอฟสกี้ชนิด RC Integrator	15
3.5	วงจรจำลองการทำงานของวงจรอินทิเกรเตอร์ชนิด Self Integrator	16
3.6	วงจรจำลองการทำงานของวงจรอินทิเกรเตอร์ชนิด RC Integrator	17
3.7	การตอบสนองแรงดัน sine ของขดลวดโรกอฟกี้ชนิด self ที่ความถี่ 1kHZ	17
3.8	การตอบสนองแรงดัน sine ของขดลวดโรกอฟกี้ชนิด RC ที่ความถี่ 1kHZ	17
3.9	การตอบสนองรูปคลื่นหน้าชันของขดลวดโรกอฟกี้ชนิด self Integrator	17
3.10	การตอบสนองรูปคลื่นหน้าคลื่นชัน ของขดลวดโรกอฟกี้ชนิด RC Integrator	17
3.11	ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C	20
4.1	ขั้นตอนดำเนินการทดลอง	21
4.2	ก. วงจรการทดลองวัดกระแส Linear load	22
	ข. วงจรในการทดลองจริงเพื่อวัดกระแส Linear load	22
4.3	กระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับ Current probe โหลด R a, b, c ที่ขนาดกระแส 0.834 A d, e, f ที่ขนาดกระแส 1.684 A g, h, i ที่ขนาดกระแส 2.430 A	23
4.4	กระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับ Current probe โหลด R a, b, c ที่ขนาดกระแส 3.26 A d, e, f ที่ขนาดกระแส 4.06 A g, h, i ที่ขนาดกระแส 4.88 A	24
4.5	กระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับ Current probe โหลด R a, b, c ที่ขนาดกระแส 5.66 A d, e, f ที่ขนาดกระแส 6.47 A	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.6 กระแสจาก Current probe และกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด L a, b, c ที่ขนาดกระแส 0.820 A d, e, f ที่ขนาดกระแส 1.622 A g, h,i ที่ขนาดกระแส 2.420 A 27

4.7 กระแสจาก Current probe และกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด L a, b, c ที่ขนาดกระแส 3.22 A d, e, f ที่ขนาดกระแส 4.03 A g, h, i ที่ขนาดกระแส 4.81 A 28

4.8 กระแสจาก Current probe และกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด L a, b, c ที่ขนาดกระแส 5.61 A 29

4.9 กระแสจาก Current probe และกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด C a, b, c ที่ขนาดกระแส 0.835 A d, e, f ที่ขนาดกระแส 1.639 A g, h,i ที่ขนาดกระแส 2.450 A 31

4.10 กระแสจาก Current probe และกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด C a, b, c ที่ขนาดกระแส 3.27 A d, e, f ที่ขนาดกระแส 4.07 A g, h, i ที่ขนาดกระแส 4.86 A 32

4.11 กระแสจาก Current probe และกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด C a, b, c ที่ขนาดกระแส 5.67 A 33

4.12 . กระแสจาก Current probe และกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด RLC a, b, c ที่ขนาดกระแส 0.820 A d, e, f ที่ขนาดกระแส 1.618 A g, h,i ที่ขนาดกระแส 2.420 A 35

4.13 กระแสจาก Current probe และกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด RLC a, b, c ที่ขนาดกระแส 3.22 A d, e, f ที่ขนาดกระแส 4.04 A g, h, i ที่ขนาดกระแส 4.81 A 36

4.14 กระแสจาก Current probe และกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด RLC a, b, c ที่ขนาดกระแส 5.63 A 37

4.15 การวัดกระแสของ Induction motor โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C และ CT 38

4.16 รูปคลื่นและขนาดกระแสจากโปรแกรม LAB View ที่ขนาดแรงดัน Input 30 V_{phase} ... 39

4.17 รูปคลื่นและขนาดกระแสจากโปรแกรม LAB View ที่ขนาดแรงดัน Input 35 V_{phase} ... 39

4.18 รูปคลื่นและขนาดกระแสจากโปรแกรม LAB View ที่ขนาดแรงดัน Input 40 V_{phase} ... 40

4.19 รูปคลื่นและขนาดกระแสจากโปรแกรม LAB View ที่ขนาดแรงดัน Input 45 V_{phase} ... 40

4.20 รูปคลื่นและขนาดกระแสจากโปรแกรม LAB View ที่ขนาดแรงดัน Input 50 V_{phase} ... 41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.21 การทดลองหาค่ากระแสสูงสุดโดยชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C และ Current Probe 43

4.22 a, b, c รูปคลื่นกระแสแสดงมุมต่างเฟสของชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เทียบกับ Current probe 44

4.23 รูปคลื่นกระแสแสดงค่ามุมต่างเฟสของชุดขดลวดโรกอฟสกี้ เทียบกับ Current probe ที่มีค่ามุมต่างเฟส 7.2° 44

4.24 ก. วงจรวัดกระแส Non-Linear load (1-phase) 45

ข. การทดลองวัดกระแส DC Convertor (3-phase)....45

4.25 กระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A เปรียบเทียบ Current probe ที่โหลด Ballast Electronic0.86 A 45

4.26 กระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ B เปรียบเทียบ Current probe ที่โหลด Ballast Electronic 0.86 A 46

4.27 กระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ C เปรียบเทียบ Current probe ที่โหลด Ballast Electronic 0.86 A....46

4.28 การทดลองวัดกระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter 47

4.29 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter (No load) โดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับหม้อแปลงกระแส (CT).....47

4.30 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter (10% load) โดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับหม้อแปลงกระแส (CT).....48

4.31 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter (20% load) โดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับหม้อแปลงกระแส (CT).....48

4.32 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter (30% load) โดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับหม้อแปลงกระแส (CT).....49

4.33 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter (50% load) โดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับหม้อแปลงกระแส (CT).....49

4.34 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter (80% load) โดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับหม้อแปลงกระแส (CT).....50

4.35 กระแส3 เฟส ของ DC Convertor โดยชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เทียบกับหม้อแปลงกระแสแสดงผลโดยใช้ โปรแกรม MATLAB 51

4.36 ก. วงจรที่ใช้ในการทดลองวัดกระแสเพื่อหาช่วงความถี่จำกัดขอบล่างและขอบบน....52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ข. การทดลองวัดกระแสเพื่อหาช่วงความถี่จำกัดขอบล่างและขอบบน.....52

4.37 a, b,c รูปกระแสความถี่ 15kHz จาก Function generator วัดโดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B,C เทียบกับ แรงดันคร่อมตัวต้านทาน 0.017 Ω 53

4.38 a, b, c รูปกระแสความถี่ 29.76Hz จาก Function generator วัดโดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B,C เทียบกับ แรงดันคร่อมตัวต้านทาน 0.017 Ω 54

4.39 การทดลองวัดกระแสดิสชาร์จบางส่วน.....56

4.40 กระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ก่อนเกิดดิสชาร์จบางส่วน 56

4.41 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จด้านแรงดันสูงด้านจาก M Tonix.....57

4.42 เกิดโคโรนาดิจชาร์จด้านจากแรงดันสูงจาก ขดลวดโรกอฟสกี้ 57

4.43 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จด้านแรงดันต่ำด้านจาก M Tonix.....57

4.44 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จแรงดันต่ำจาก ขดลวดโรกอฟสกี้.....57

4.45 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จภายในจาก M Tonix.....57

4.46 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จภายในจากขดลวดโรกอฟสกี้ 57

4.47 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จตามผิวจาก M Tonix.....58

4.48 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จตามผิวจากขดลวดโรกอฟสกี้.....58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ค่าพารามิเตอร์ตามชนิดวงจรอินทิเกรทของขดลวดโรกอฟสกี้.....16

3.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรอินทิเกรท.....18

3.3 ค่าพารามิเตอร์ของแกนเฟอร์ไรต์และแกนอากาศ.....19

3.4 ตารางสรุปค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบขดลวดโรกอฟสกี้.....20

4.1 ผลการทดลองวัดกระแสโหลดหลอดไฟ (R).....26

4.2 ผลการทดลองวัดกระแสโหลด L.....30

4.3 ผลการทดลองวัดกระแสโหลด C.....34

4,4 ผลการทดลองวัดกระแสโหลด RLC.....38

4.5 ผลการทดลองหากระแส minimum.....42

4.6 ผลการทดลองหากระแส maximum.....43

4.7 ช่วงความถี่ในการวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี้ A,B,C.....55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การวัดกระแสในห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงด้วยเครื่องมือวัดกระแสแบบดั้งเดิม มีการติดตั้งแบบถาวรยากต่อการเคลื่อนย้าย และต่อเครื่องมือวัดอนุกรมเข้ากับระบบวงจรทดสอบโดยผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อก่อนเข้าเครื่องมือวัด เพื่อลดระดับแรงดันลงให้สามารถเชื่อมต่อกับเครื่องมือวัดได้ ซึ่งไม่สะดวกในการใช้งาน มีขนาดใหญ่ตามพิกัดกระแส ส่งผลให้เครื่องมือวัดมีราคาสูง และมีช่วงความถี่ในการวัดแคบ เพื่อช่วยลดข้อจำกัดของเครื่องมือวัดดังที่กล่าวมาแล้ว

โครงงานนี้จึงนำเสนอการออกแบบสร้างเครื่องมือวัดโดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้แบบวงจรอินทิเกรทตัวตานทาน 3 เฟส อัตราขยาย 250/5 ที่มีย่านการวัด 0.125-40.39 A สามารถวัดกระแสอยู่ในช่วงความถี่ 29.76 Hz -15 kHz ได้ มีขนาดเล็ก,ราคาถูก ไม่เชื่อมต่อกับวงจรทดสอบโดยตรงและการพันขดลวดแบบโรกอฟสกี้จะสามารถช่วยลดผลกระทบจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่เข้ามารบกวนการวัด ซึ่งทำให้ผลการวัดผิดพลาดได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีและวิธีการออกแบบสร้างขดลวดโรกอฟสกี้และวงจรอินทิเกรทที่สามารถใช้วัดกระแส 3 เฟสและวัดกระแสที่มีความถี่สูงในระบบไฟฟ้า
2. เพื่อประกอบสร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้และวงจรอินทิเกรท
3. เพื่อนำชุดขดลวดโรกอฟสกี้ไปใช้วัดกระแส 3 เฟสในระบบไฟฟ้า และวัดกระแสที่มีความถี่สูง เช่น การวัดกระแสดิสชาร์จบางส่วน (PD)

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการของขดลวดโรกอฟสกี้และวงจรอินทิเกรท
2. ออกแบบและจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice เพื่อเลือกชนิดวงจรอินทิเกรทและชนิดแกนที่ใช้สร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้และวงจรอินทิเกรท
3. ประกอบสร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้และวงจรอินทิเกรท
4. ทดสอบ เก็บผล วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง
5. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 แผนการดำเนินโครงงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ.2553							พ.ศ.2554	
	มิ.ย.	ก.ค	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ
1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการของขดลวดโรกอฟสกี้และวงจรอินทิเกรท	↔	↔							
2.ออกแบบและจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice เพื่อเลือกชนิดวงจรอินทิเกรท และชนิดแกนที่ใช้สร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้และวงจรอินทิเกรท		↔	↔						
3. ประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกี้ต้นแบบและทดสอบ			↔	↔	↔	↔			
4.ประกอบสร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้เพื่อใช้วัดกระแส 3 เฟส A ,B และ C						↔	↔		
5.ทดสอบ เก็บผล วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง						↔	↔	↔	↔
6.จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์								↔	↔
↔ การวางแผน ↔ การดำเนินงานจริง									

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. มีความรู้ความเข้าใจคุณสมบัติ และหลักการทำงานของขดลวดโรกอฟสกี้ และวงจรอินทิเกรท

2. สามารถออกแบบและประกอบสร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้ เพื่อใช้วัดกระแส 3 เฟสในระบบไฟฟ้าได้จริง และวัดกระแสที่มีความถี่สูงในระบบไฟฟ้า เช่น การวัดกระแสดิสชาร์จบางส่วน (PD) และยังสามารถนำไปเป็นแนวทางในการสร้างชุดขดลวดโรกอฟกี้ต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

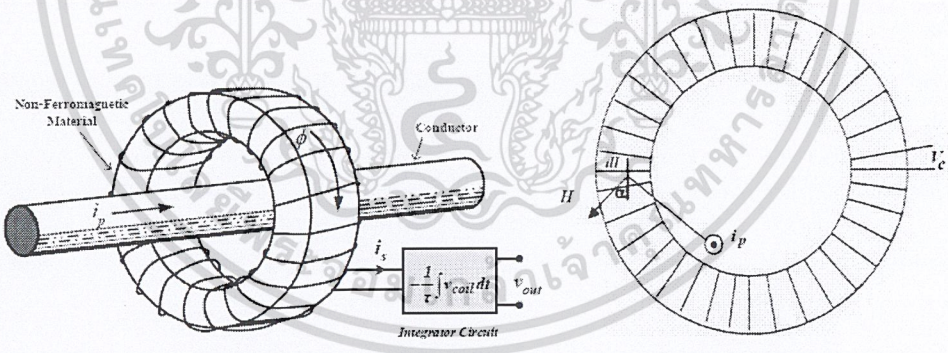
2.1 หลักการของขดลวดโรกอฟสกี้

ขดลวดโรกอฟสกี้เป็นอุปกรณ์วัดกระแสที่มี การเปลี่ยนแปลงทางเวลาอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กคล้องผ่านขดลวดที่พันแกน ที่ไม่เป็นแม่เหล็กของขดลวดโรกอฟสกี้ ผลจากสนามแม่เหล็กที่ เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะไปคาบเกี่ยวกับ ขดลวดซึ่งวางอยู่เป็นวงรอบตัวเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันที่ปลายของขดลวด เมื่อนำแรงดันดังกล่าวไปผ่านตัวอินทิเกรทที่เหมาะสมก็จะได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัดอย่างถูกต้อง แสดงดังรูปที่ 2.1 (a) และรูป (b) แสดงหลักการวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี้ โดยมีขดลวด รอบต่อตารางเมตร และพื้นที่หน้าตัด A วางอยู่รอบตัวนำที่มีกระแส i_p ไหล พิจารณาในช่วงความยาว dl จะได้จำนวนรอบ ndl และเส้นแรงแม่เหล็ก $d\phi$ ที่มาคล้องในช่วง dl ดังสมการที่ (2.1)

$$d\phi = \mu_0 \cdot H \cdot A \cdot n \cdot dl \cdot \cos\alpha \tag{2.1}$$

เมื่อ integrate รอบขดลวดจะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่มาคล้องขดลวดทั้งหมด

$$\phi = \int d\phi = \mu_0 \cdot n \cdot A \cdot \int H \cdot \cos\alpha dl \tag{2.2}$$



(a) วิธีการวัด **(b)** หลักการวัด

รูปที่ 2.1 ขดลวดโรกอฟสกี้คล้องตัวนำที่มีกระแสไหล i_p

จากรูปที่2.1(a) เมื่อใช้กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.3

$$i_p = \oint H \cdot \cos\alpha dl \tag{2.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าขดลวดมีจำนวนรอบเป็น N รอบต่อเมตร และมีพื้นที่หน้าตัดเป็น A วางอยู่ล้อมรอบตัวนำที่มีกระแส i_p ไหลผ่าน เมื่อพิจารณาในช่วงความยาว dl จะได้จำนวนรอบเท่ากับ Ndl และจะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านในช่วงความยาว dl เป็น $d\varphi$ ซึ่งมีค่าเป็น

$$d\varphi = \mu_0 HAndl\cos\alpha \tag{2.4}$$

โดยที่ α คือ มุมระหว่างสนามแม่เหล็ก (H) กับช่วงความยาว dl ของขดลวด เมื่ออินทิเกรทตลอดความยาวครบรอบขดลวด (Loop) เราจะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านขดลวดทั้งหมดเป็นดังสมการที่ 2.5 นั่นคือ

$$\varphi = \mu_0 NA\int H\cos\alpha dl = \mu_0 NAi_p \tag{2.5}$$

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force) ที่เกิดขึ้นที่ปลายของขดลวด (v_{coil}) เป็นดังสมการที่ 2.6 นั่นคือ

$$v_{coil} = -\frac{d\varphi}{dt} = \mu_0 NA\frac{di_p}{dt} \tag{2.6}$$

ถ้ากำหนดให้ M = μ_0NA ดังนั้นกระแส i_p ที่ต้องการวัดจะมีค่าเท่ากับ

$$i_p = -M\int_0^{\infty} v_{coil}\,dt + C \tag{2.7}$$

จากสมการที่ 2.7 จะเห็นว่าการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยเทคนิคขดลวดโรกอฟกี้นั้นต้องอาศัยการอินทิเกรทแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนขดลวด ในทางปฏิบัติจึงจำเป็นต้องมีวงจรอินทิเกรท (Integrator) ด้วยเสมอ ดังนั้นคุณสมบัติของระบบวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี้แบบทั่วไปจึงขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจรอินทิเกรทที่เหมาะสม ซึ่งขนาดของแรงดันที่จะทำการอินทิเกรทจะถูกกำหนดโดยค่าเวลาคงตัว (τ) ของวงจรอินทิเกรท นั้นคือ

$$V_{out} = -\frac{1}{t}v_{coil}dt + C \tag{2.8}$$

โดยที่ความไว (Sensitivity) ของระบบวัดจะอยู่ในเทอมของ V/I มีค่าเท่ากับ

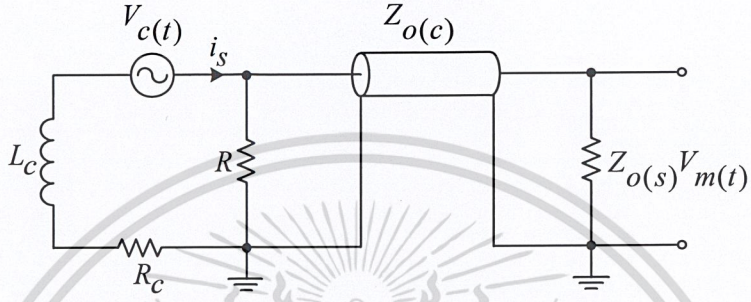
$$S = \frac{v_{coil}}{i_p} = \frac{M}{\tau} \tag{2.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 วงจรต่อด้านขาออกของขดลวดโรกอฟสกี้

แรงดันขาออกของโรกอฟสกี้คอยล์ขึ้นกับอิมพิแด๊นซ์ขาออก ที่นำมาต่อเข้ากับโรกอฟสกี้คอยล์ซึ่งเป็นวงจรอินทิเกรทที่เป็นพาสซีฟ ในทางปฏิบัติที่ใช้กันอยู่มีดังต่อไปนี้

2.2.1 ขดลวดโรโกฟสกี้ชนิด Self integrator วงจร Self integrator คือ วงจรที่ต่อด้านขาออกของขดลวดโรกอฟสกี้ด้วยตัวความต้านทานค่าต่ำ เมื่อเทียบกับค่าเสิร์จอิมพิแด๊นซ์ของเคเบิลวัด ดังรูปที่ 2.2 โดยมีเงื่อนไข คือ $\omega L >> (R + R_c)$



รูปที่ 2.2 ขดลวดโรโกฟสกี้ชนิด Self Integrator

โดยที่

V_c	คือ	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
L_c	คือ	ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรโกฟสกี้
R_c	คือ	ความต้านทานของขดลวดโรโกฟสกี้
R	คือ	ความต้านทานโหลด
$Z_{o(c)}$	คือ	เสิร์จอิมพิแดนซ์ของสายวัด
$Z_{o(s)}$	คือ	แมทชิ่งอิมพิแดนซ์ (ต้องปรับตั้งค่าให้เท่ากับค่า $Z_{o(c)}$)
V_m	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้

ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของกระแส i_s (t) ที่ต้องการวัดกับแรงดัน $V_m(t)$ ที่วัดได้ ดังนี้

$$V_c = M\frac{di_p}{dt} = L_c\frac{di_s}{dt} + i_s(R + R_c) \qquad (2.10)$$

เนื่องจากเทอม $L_c\frac{di_s}{dt} >> i_s(R + R_c)$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$V_c(t) = L_c\frac{di_s}{dt} \qquad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการ Integrated จะได้กระแสในขดลวด i_s (t) เป็น

$$i_s(t) = \frac{1}{L_c} \int V_c(t)dt \tag{2.12}$$

และแรงดันที่วัดได้คือ

$$V_m(t) = i_s(t)R\ (t) \tag{2.13}$$

แทน i_s (t) จาก 2.13 ลงใน 2.12 จะได้ว่า

$$V_m(t) = \frac{R}{L_c} \int V_c(t)dt \tag{2.14}$$

แทนค่า V_c (t) จาก 2.10 ลงใน 2.14 จะได้ว่า

$$V_m(t) = \frac{R}{L_c} Mi_p(t) \tag{2.15}$$

จากสมการที่ 2.14 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้ V_m(t) กับกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัด i_s (t) โดยผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรสามารถหาได้จากการแปลงลาปาซสมการที่ 2.10 ได้เป็น

$$M_s I_p(s) = I_s(s)[sL_c + R_c + R] \tag{2.16}$$

จัดสมการรูปใหม่จะได้

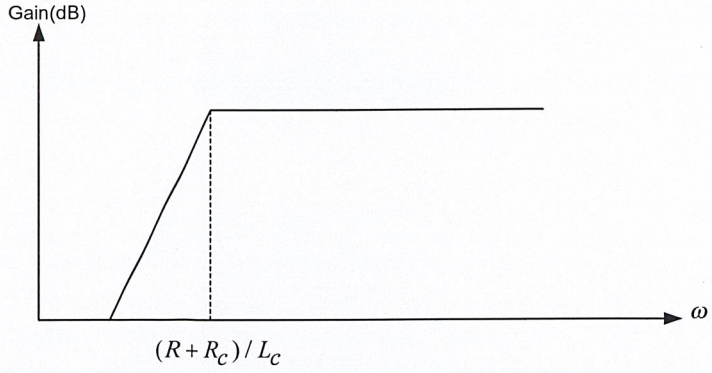
$$\frac{I_s(s)}{I_p(s)} = \frac{Ms}{sL_c + R_c + R} \tag{2.17}$$

จากสมการที่ (2.13) จะได้ว่า $V_m(s) = I_s(s)R$ นั่นคือ

$$\frac{V_m(s)}{I_p(s)} = \frac{RMs}{R + R_c + L_c s} = \frac{((RM)/L_c)s}{s + (R + R_c)/L_c} \tag{2.18}$$

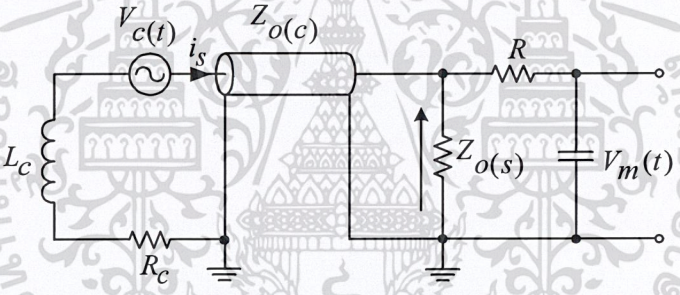
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรจะเป็นแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่าน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองทางความถี่ของขดลวดโรกอฟสกี้ชนิด Self integrator

2.2.2 ขดลวดโรโกฟสกี้ชนิด RC Integrator วงจร RC Integrator คือวงจรที่ต่อความต้านทานค่าสูง ($R >> Z_o$) อนุกรมกับตัวเก็บประจุแล้ววัดแรงดันขาออกแสดงดังรูปที่ 2.10 โดยมีเงื่อนไข $\omega_u \cdot L_c << Z_o$ และด้านความถี่ต่ำ $1/(\omega_l \cdot C) << R$



รูปที่ 2.4 ขดลวดโรกอฟสกี้ชนิด RC Integrator

จากรูปที่ 2.4 จะได้ความสัมพันธ์ของกระแส กับ แรงดัน

$$V_c = M \cdot \frac{di_p}{dt} = L_c \cdot \frac{di_s}{dt} + i_s \cdot Z_0 + V_0 \qquad (2.19)$$

จากเงื่อนไข $\omega_U \cdot L_c << Z_o$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.21) จะได้

$$V_c = M \cdot \frac{di_p}{dt} = i_s \cdot Z_0 + V_0 \qquad (2.20)$$

ทางด้าน RC จะได้

$$V_o = i_s \cdot (R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}) \qquad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเงื่อนไข $\frac{1}{\omega \cdot C} << R$ จะได้

$$V_o = i_s \cdot R \tag{2.22}$$

แทนสมการที่ 2.22 ลงในสมการที่ 2.20 จะได้

$$V_c = M \cdot \frac{di_p}{dt} = i_s \cdot Z_0 + i_s \cdot R \tag{2.23}$$

เนื่องจากค่า $R >> Z_0$ ก็จะได้

$$M \cdot \frac{di_p}{dt} = i_s \cdot R \tag{2.24}$$

แทน $i_s = C \cdot \frac{dV_m}{dt}$ ในสมการ 2.23 จะได้

$$V_m(t) = \frac{M}{RC} \cdot i_p(t) \tag{2.25}$$

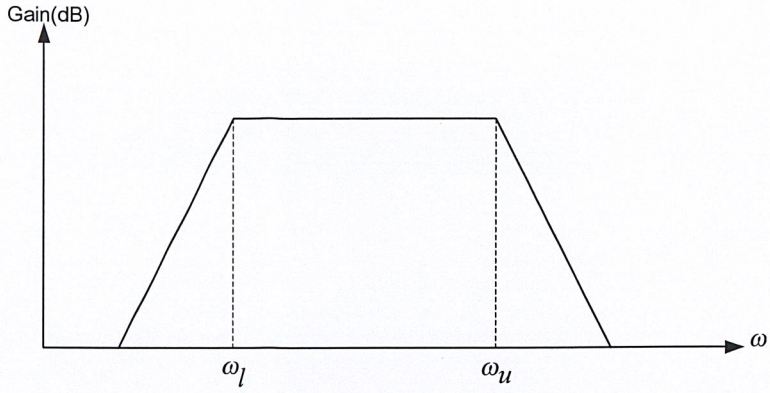
สามารถเขียนผลการตอบสนองทางความถี่ได้เป็นวงจรกรองความถี่แถบผ่านดังแสดงในรูปที่ 2.5 ที่มีความถี่จำกัดด้านความถี่สูง (ω_u)และความถี่จำกัดด้านความถี่ต่ำ (ω_l) ดังนี้

$$\omega_U << Z_0 / L_c \tag{2.26}$$

และ

$$\omega_l >> 1/R \cdot C \tag{2.27}$$

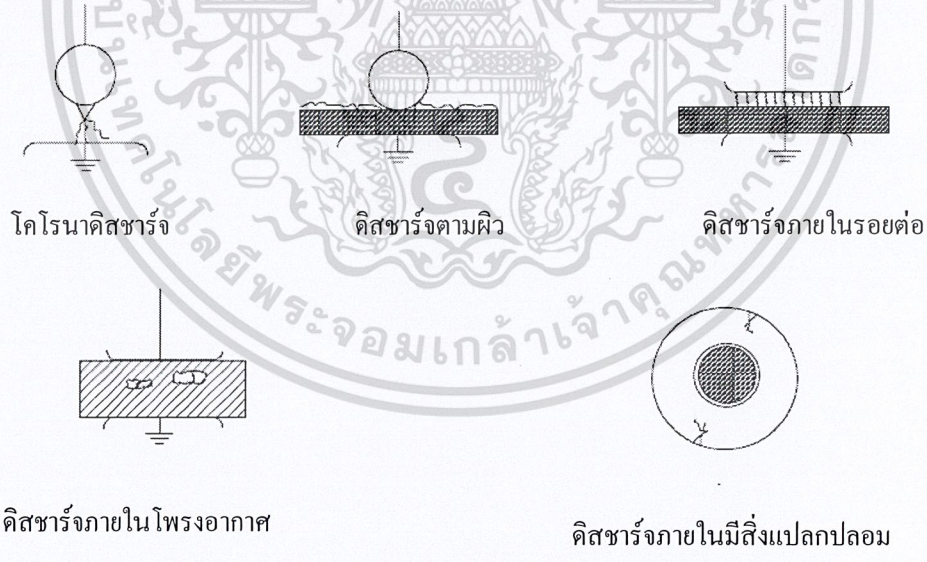
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ผลการตอบสนองทางความถี่ของขดลวดโรโกฟสกี้ชนิด RC Integrator

2.3 การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge, PD) คือการเกิดการเสียสภาพการเป็นฉนวนเพียงบางส่วนของระบบการฉนวน เป็นการเกิดเบรกดาวน์หรือดิสชาร์จที่ไม่ได้เชื่อมโยงถึงกันระหว่าง อิเลคโตรด ไม่ได้เป็นการเสียสภาพการเป็นฉนวนสมบูรณ์ทั้งระบบ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต ดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ 1) โคโรนาดิสชาร์จ 2)ดิสชาร์จตามผิวและ 3) ดิสชาร์จบางส่วนแบบภายใน แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิดดิสชาร์จบางส่วน

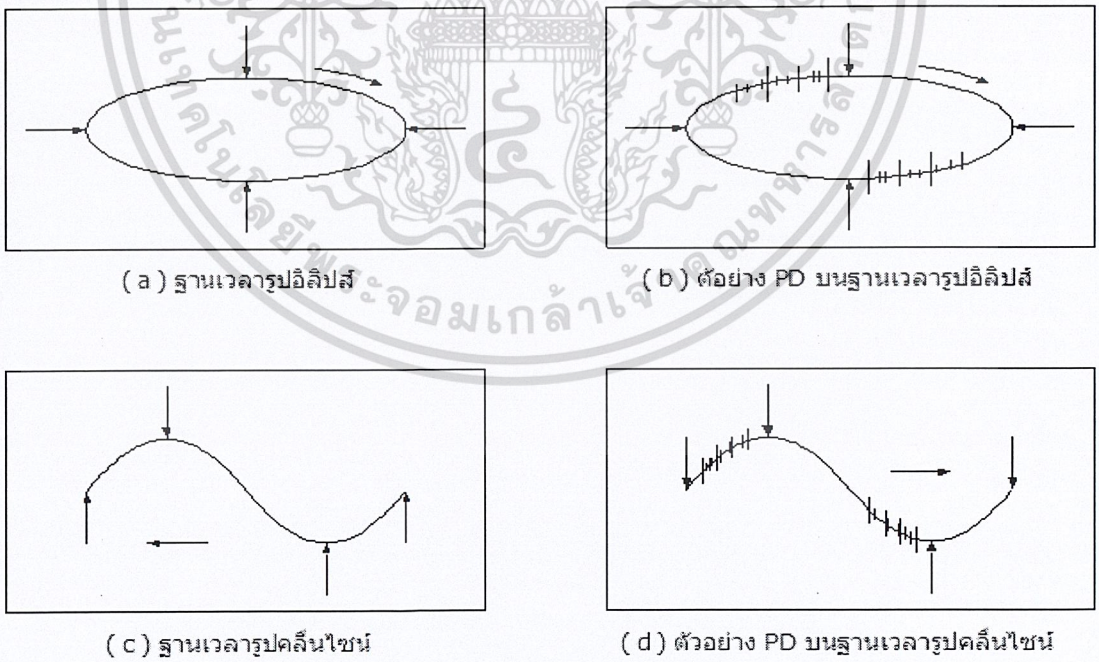
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ผลกระทบของดิสชาร์จบางส่วน

ดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวนในลักษณะชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆและเกิดความผิดพร่องขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลงการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนสายแรงสูงแบบขึงอากาศ เรียกว่า
โคโรนา ย่อมหมายถึงการเกิดพลังงานสูญเสียตลอดเวลา และยิ่งกว่านั้นการเกิดโคโรนาพัลส์ดังกล่าว ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสารย่านความถี่วิทยุ (Radio interferent voltage; RIV) เรียกว่า คลื่นรบกวนวิทยุ

2.5การแสดงผลดิสชาร์จบางส่วน

การวัดค่า PD อาจวัดได้ด้วยมิเตอร์ความถี่สูงออกมาเป็น micro – volts (μV) pico – coulomb (pC) ได้แต่จะทราบเพียงขนาดของ PD เท่านั้น วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันสำหรับแสดงผลของ PD คือ การแสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป ซึ่งอาจแสดงได้ 2 แบบ คือ ให้รูปคลื่นพัลส์ของ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปอิลิปส์ ซึ่งมีเครื่องหมายแสดงตำแหน่งยอดบวกและลบ และตำแหน่งศูนย์ของรูปคลื่นแรงดันทดสอบดังรูป (a) , (b) หรือแสดงรูปคลื่นพัลส์ในฐานเวลาดังรูป (c) , (d) ในรูปที่ 2.7



(a) ฐานเวลารูปอิลิปส์ (b) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์

(c) ฐานเวลารูปคลื่นไซน์ (d) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

รูปที่ 2.7 การแสดงผลของ PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแสดง PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์มีผลดีที่วัดขนาดได้ถูกต้อง และสังเกตตำแหน่งที่เกิดขึ้นได้แน่นอน การแสดงบนฐานเวลารูปอิลิปส์มีข้อดี คือ แยกได้ว่า PD เกิดจากสาเหตุอะไร

2.6 การวัดดิสชาร์จบางส่วน (PD)

ในสมัยเริ่มแรกที่มีการทดสอบวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้ามักจะใช้วิธีวัดความต้านทานแฟคเตอร์พลังงานสูญเปล่า tan δ และทดสอบหาค่าแรงดันเบรคดาวน์ พบว่าค่า tan δ นั้นขึ้นอยู่กับขนาดแรงดัน จึงใช้เป็นเงื่อนไขในการกำหนดคุณภาพของการฉนวน การค้นคว้าวิจัยต่อมาพบว่า โพรงรอยร้าว รอยแตก หรือการฉนวนที่ไม่สมบูรณ์ภายในจะทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้น (PD) ดิสชาร์จบางส่วนอาจทำให้เกิดผลได้หลายอย่าง เช่น แสง เสียง รังสี ปฏิกิริยาเคมี และผลทางไฟฟ้า เป็นต้น ผลของดิสชาร์จทำให้เกิดพลังงานสูญเปล่าและยังก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบการฉนวน ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพเร็ว อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง และนำไปสู่การเบรคดาวน์ในที่สุด ฉะนั้นวิศวกรผู้ออกแบบการออกแบบฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จึงถือเอา PD เป็นแฟกเตอร์สำคัญที่บอกถึงคุณภาพของอุปกรณ์ จึงพยายามหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิด PD ขึ้น โดยออกแบบลักษณะอิเลคโตรดที่ปราศจากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าขีดความคงทนของฉนวน อย่างไรก็ตามการฉนวนอุปกรณ์แรงสูงมากๆ มีความยุ่งยากซับซ้อน PD อาจเกิดขึ้นโดยมิได้ตั้งใจ หรืออาจมีความบกพร่องในกระบวนการผลิต หรือคุณภาพของฉนวนไม่ได้ตามที่กำหนด จึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัด การเกิด PD อาจมีสาเหตุได้หลายรูปแบบ การทราบสาเหตุและตำแหน่งที่เกิดขึ้นแน่นอนจะช่วยให้แก้ไขปรับปรุงการฉนวนได้ถูกต้องรวดเร็ว

2.7 แกนเฟอร์ไรท์

แกนเฟอร์ไรท์เป็นวัสดุที่มีส่วนผสมของแม่เหล็กทำให้มีความเข้ม สนามแม่เหล็กมากกว่าเหล็กและมีความต้านทานสูง จึงช่วยลดการสูญเสียบนแกนเหล็ก หรือลดความร้อนจากการเกิดกระแสไหลวนที่ความถี่สูง

2.8 แกนอากาศ

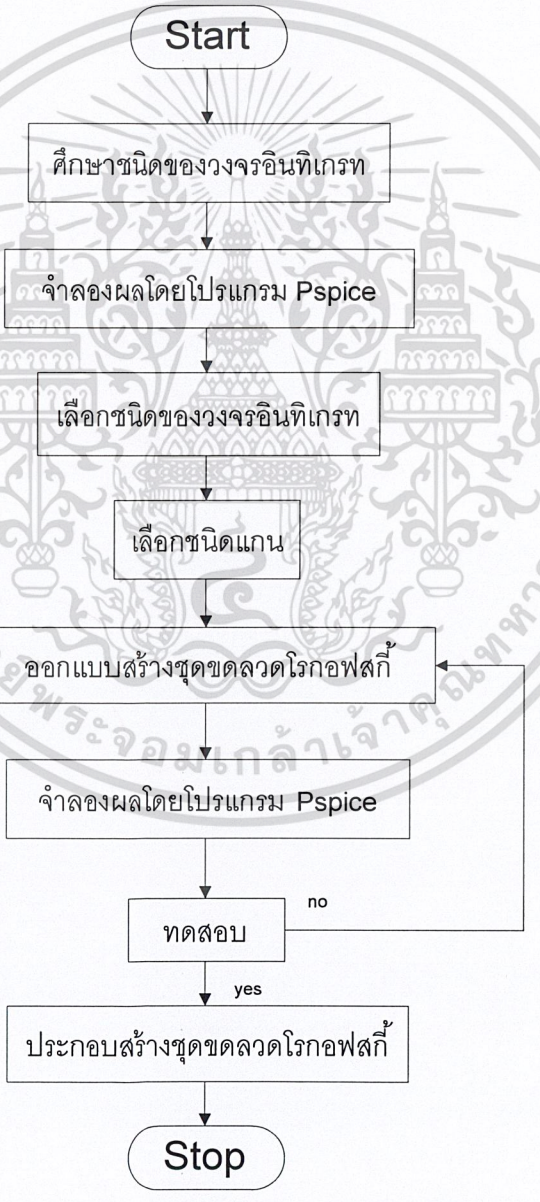
แกนอากาศเป็นแกนหรือฐานรองทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวน เช่น คาร์บอน พลาสติก ไฟเบอร์ และ PVC เป็นต้นหรืออาจพันลอยๆ ไว้โดยไม่มีอะไรรองรับ แกนประเภทนี้นิยมนำไปใช้งานกับพวกความถี่สูงๆ หรือความถี่วิทยุ (RF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกี้ 3 เฟส

การออกแบบขดลวดโรกอฟสกี้ 3 เฟส คือการจำลองวงจรการทำงานของขดลวดโรกอฟสกี้ 3 เฟสขึ้นตามลักษณะการใช้งานและคุณสมบัติที่ต้องการ โดยการออกแบบขดลวดโรกอฟสกี้นั้นได้ทำการคำนวณและจำลองผลทางโปรแกรม PSpice เพื่อนำผลมาเป็นข้อมูลในการพิจารณาผลให้สอดคล้องกับความต้องการ เมื่อได้ผลตามความต้องการ จึงทำการสร้างและทดสอบจริงตามลำดับ

ในการออกแบบสามารถแบ่งลำดับขั้นตอนในการออกแบบดังรูปที่ 3.1

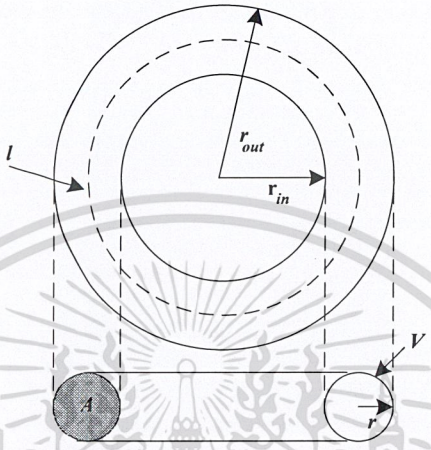


รูปที่ 3.1 รูปขั้นตอนการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การเลือกชนิดของวงจรอินทิเกรเตอร์

จากหลักการทำงานของขดลวดโรกอฟสกี้ จะเห็นได้ว่าการวัดกระแสของโรกอฟสกี้นั้น ต้องทำการผ่านวงจรอินทิเกรเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปวัดค่ากระแสที่ถูกต้อง ในโครงงานวิจัยได้ทำการศึกษาวงจรอินทิเกรเตอร์ 2 ชนิดคือ Self Integrator และ และRC Integrator โดยพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 มิติของแกนขดลวด

โดย

r_{in} = รัศมีวงในแกน(m) , A = พื้นที่หน้าตัดแกน(m), r_{out} = รัศมีวงนอกแกน(m)

v = เส้นรอบวงพื้นที่หน้าตัดแกน(m), r = รัศมีพื้นที่หน้าตัด(m), y = ความต้านทานขดลวด(Ω / m) l = ความยาวเฉลี่ยแกน (m)

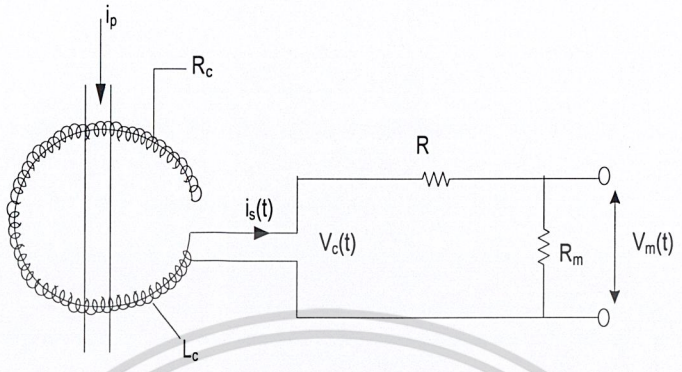
สามารถหาความยาวเฉลี่ยแกนได้จากสมการ

$$l = 2\pi \left[\frac{(r_{out} - r_{in})}{2} + r_{in} \right] \qquad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 การคำนวณและออกแบบวงอินทิเกรททั้ง 2 ชนิดสามารถหาค่าพารามิเตอร์ดังสมการต่อไปนี้

Self Integrator



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลย์โรกอฟสกี้คอยล์ชนิด Self Integrator

R_c คือ ความต้านทานขดลวด $i_p(t)$ คือ กระแสที่ต้องการวัด

R_m คือ ความต้านทานแมทชิ่ง $i_s(t)$ คือ กระแสเหนี่ยวนำ

R คือ ความต้านทานอินทิเกรเตอร์ $V_m(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้

L_c คือ ความเหนี่ยวนำขดลวด $V_c(t)$ คือ แรงดันเหนี่ยวนำ

โดยที่มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

จำนวนรอบ $$N = \frac{\tau.v.y(23r+25l)}{r^2} \quad (3.2)$$

ค่าความเหนี่ยวนำร่วม $$M = \mu_o \mu_r .n.A \quad (3.3)$$

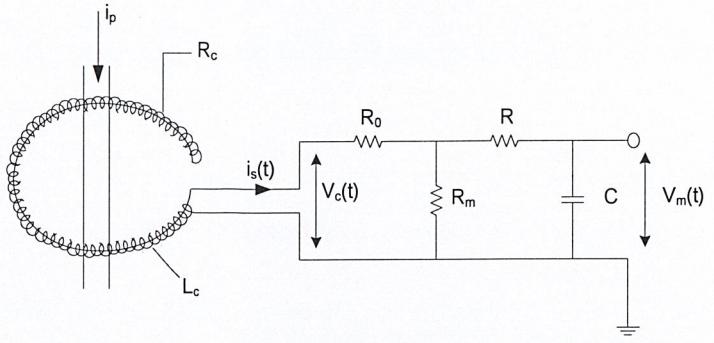
ค่าความเหนี่ยวนำ $$L = \frac{r^2 N^2}{(23r+25l)} \quad (3.4)$$

หาความถี่ตอบสนอง $$f = \frac{\left(\frac{R+R_c}{L}\right)}{2\pi} \quad (3.5)$$

ค่าความต้านทานของอินทิเกรท $$R = \frac{V_m.L}{M.i_p} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RC Integrator



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลย์ขดลวดโรกอฟสกี้ชนิด RC Integrator

C คือ ตัวเก็บประจุ $V_c(t)$ คือ แรงดันเหนี่ยวนำ

R_c คือ ความต้านทานขดลวด $i_p(t)$ คือ กระแสที่ต้องการวัด

R_o คือ ความต้านทานเคเบิล $i_s(t)$ คือ กระแสเหนี่ยวนำ

R_m คือ ความต้านทานแมทชิ่ง $V_m(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้

R คือ ความต้านทานอินทิเกรเตอร์ L_c คือ ความเหนี่ยวนำขดลวด

โดยที่มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

จำนวนรอบ $$N = \frac{|G|.R.C.l}{\mu_o.\mu_r.A} \quad (3.7)$$

ค่าความเหนี่ยวนำร่วม $$M = \frac{\mu_o\mu_r.N.A}{l} \quad (3.8)$$

ค่าความเหนี่ยวนำ $$L = M.N \quad (3.9)$$

หาค่าความถี่ตอบสนอง $$f = \frac{1}{2\pi.R.C}.\left(1+\frac{1}{R}\right) \quad (3.10)$$

ค่าความต้านทานของอินทิเกรท $$R = \frac{1}{f.C} \quad (3.11)$$

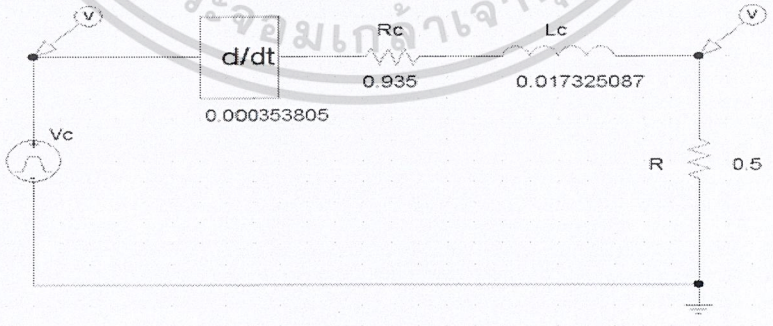
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ใช้ในการคำนวณข้างต้น กำหนดให้ขนาดแกนเฟอไรต์ที่ใช้ในการคำนวณมีขนาดเท่ากัน สามารถสรุปผลการคำนวณได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ตามชนิดวงจรอินทิเกรตของขดลวดโรกอฟสกี้ ที่นำไปใช้ในการจำลองผลการตอบสนอง

parameter	Self Integrator	RC Integrator
Gain	0.010	0.082
Number of turn	49	22
Coil resistance (Ω)	0.935	0.422
Integrator Resistance (Ω)	0.489	3980
Inductance (H)	0.0173	0.0035
Lower boundary frequency (Hz)	82	82
Upper boundary frequency (Hz)	-	2 k

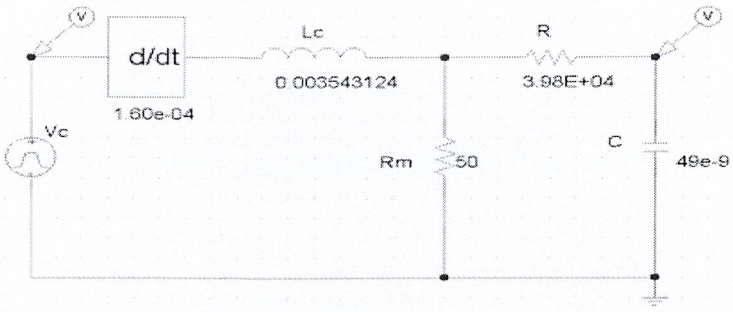
3.1.2 การจำลองทางPSpice ในการออกแบบสร้างขดลวดโรกอฟสกี้ จำเป็นต้องทราบลักษณะการตอบสนองต่อรูปคลื่นแรงดัน เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการกำหนดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของขดลวดโรกอฟสกี้ให้มีความสอดคล้องกับรูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัด โดยทำการจำลองการตอบสนองของรูปคลื่นแรงดันของขดลวดโรกอฟสกี้ของวงจรอินทิเกรเตอร์ทั้ง 2 ชนิด จากการจำลองทางโปรแกรม PSpice ตามวงจรจำลองการทำงานดังรูปที่ 3.5 และ3.6 ซึ่งได้ผลการจำลองดังรูปที่ 3.7 และ3.8 ตามลำดับ



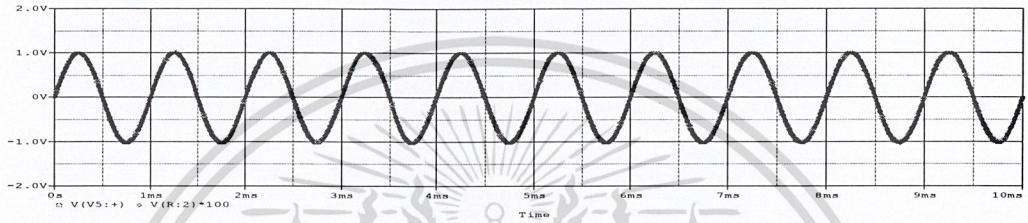
รูปที่ 3.5 วงจรจำลองการทำงานของวงจรอินทิเกรเตอร์ชนิด Self Integrator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

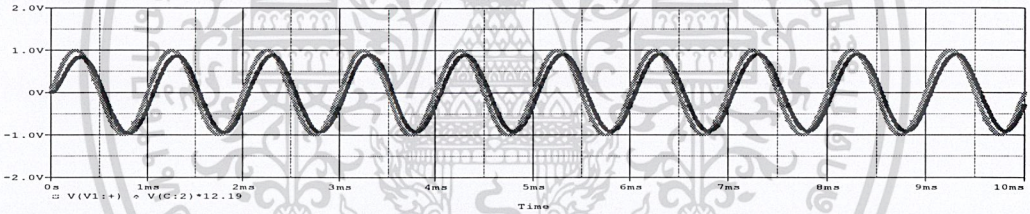
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



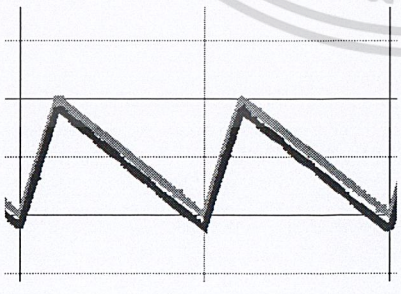
รูปที่ 3.6 วงจรจำลองการทำงานของวงจรอินทิเกรเตอร์ชนิดRC Integrator



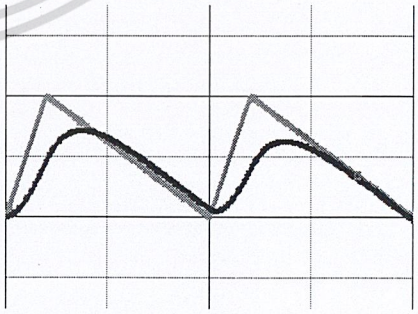
รูปที่ 3.7 การตอบสนองแรงดัน sine ของขดลวดโรกอฟกี้ชนิด self ที่ความถี่ 1kHZ



รูปที่ 3.8 การตอบสนองแรงดัน sine ของขดลวดโรกอฟกี้ชนิด RC ที่ความถี่ 1kHZ



รูปที่ 3.9 การตอบสนองรูปคลื่นหน้าชัน ของขดลวดโรกอฟกี้ชนิด self Integrator



รูปที่ 3.10 การตอบสนองรูปคลื่นหน้าคลื่นชัน ของขดลวดโรกอฟกี้ชนิด RC Integrator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

117568

จากรูปที่ 3.7, 3.8, 3.9 และ 3.10 เป็นรูปที่ได้จากการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice แสดงผลการตอบสนองต่อรูปคลื่นอ้างอิงของวงจรอินทิเกรทชนิด self และวงจรอินทิเกรทชนิด RC ซึ่งวงจรอินทิเกรทชนิด self integrator ได้ผลของรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นอ้างอิง และการตอบสนองรูปคลื่นชัน จะมีการตอบสนองในช่วงเวลาหน้าคลื่นได้ดี ลักษณะยอดเช่นเดียวกับแรงดันอ้างอิง ส่วนวงจรอินทิเกรทชนิด RC Integrator การตอบสนองแรงดันจะมีการล้าหลังแรงดันอ้างอิง การตอบสนองรูปคลื่นชันจะมีการตอบสนองในช่วงเวลาหลังคลื่นได้ดี แต่ลักษณะยอดคลื่นแตกต่างจากแรงดันอ้างอิง ซึ่งรูปคลื่นที่ได้จะเป็นคลื่นยอดตัด การตอบสนองสัญญาณรูปคลื่นแรงดันของ Self Integrator และ RC Integrator สามารถสรุปคุณสมบัติได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรอินทิเกรต

คุณสมบัติ	**Self Integrator**	**RC Integrator**
Bandwidth	กว้าง	แคบ
Lower boundary frequency	ต่ำ	สูง
อัตราขยาย	ต่ำ	สูง
การตอบสนองรูปคลื่น	ช่วงเวลาหน้าคลื่น	ช่วงเวลาหลังคลื่น
เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ steady state	ช้า	เร็ว

จากตารางคุณสมบัติจึงเลือกใช้วงจรอินทิเกรเตอร์ชนิด Self Integrator เนื่องจากให้ความถี่ขอบล่างต่ำซึ่งจะให้ช่วงความถี่ในการทำงานที่กว้าง และคลอบคลุมกระแสที่ต้องการวัด ลักษณะรูปคลื่นที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากแรงดันอ้างอิง แต่อัตราขยายที่ต่ำสามารถแก้ไขได้ด้วยการออกแบบชนิดแกน

3.2 การเลือกชนิดของแกน

การออกแบบแกน เพื่อสามารถเลือกชนิดและขนาดแกนของขดลวดโรกอฟสกี้ การเลือกชนิดของแกนจะเลือกตามพิกัดกระแสและความถี่ที่ต้องการวัดโดยแกนที่นิยมใช้ คือ แกนอากาศ เหมาะสำหรับการวัดกระแสที่มีความถี่สูง ขนาดกระแสสูง ส่วนแกนเฟอร์ไรท์เหมาะสำหรับการวัดกระแสที่มีความถี่ต่ำ ขนาดกระแสต่ำ

จากสมการการคำนวณในหัวข้อที่ 3.1.1 สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของแกนอากาศและแกนเฟอร์ไรท์ ได้ดังตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของแกนเฟอร์ไรต์และแกนอากาศ

คุณสมบัติ	แกนเฟอร์ไรท์		แกนอากาศ	
Resistance per Length (Ω/m)	0.382	0.9695	0.382	0.9695
Gain	0.0100	0.0300	0.01	0.005
Number of turn	48.9678	124.2783	49	125
Inductance (H)	0.0173	0.1116	2.22117E-06	1.4307E-05
Coil Resistance (Ω)	0.9353	6.0244	0.9353	6.0244
Integrator Resistance (Ω)	0.4897	3.7283	0.4897	0.6214
Lower boundary frequency (Hz)	82.2486	87.3941	641,539	464,510

จากตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าที่ Resistance per Length 0.9695 Ω/m จะให้อัตราขยายที่สูง แต่เนื่องจาก Resistance per Length จะแปรผกผันกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวด($R=\frac{\rho l}{A}$)Resistance per Length 0.9695 Ω/m จะมีขนาดของขดลวดเล็กมาก ทำให้เกิดความยุ่งยากในการพัน รวมถึงไม่มีความแข็งแรงทนทานอีกด้วย ดังนั้นเมื่อพิจารณา Resistance per Length ที่ 0.382 Ω/m ทั้งสองชนิดแกนจะให้อัตราขยายที่เท่ากัน แต่แกนเฟอร์ไรต์จะมีความถี่จำกัดล่างต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องตามคุณสมบัติที่ต้องการคือ การวัดกระแสที่มีช่วงความถี่ในการทำงานกว้าง ในโครงงานนี้เลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์

3.3 การประกอบสร้าง

จากการออกแบบที่กล่าวมาข้างต้นในหัวข้อ 3.1 และ 3.2 สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบได้ดังตารางที่ 3.4 และ นำค่าที่ได้จากการออกแบบมาประกอบได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.11 นำตัวชิ้นงานมาทดสอบจริง ผลที่ได้จากการทดลองจริงมีการตอบสนองในช่วงกระแสที่น้อย หรือกล่าวได้ว่ามีอัตราขยายต่ำ จึงได้ทำการเพิ่มอัตราขยายให้มากขึ้น เพื่อให้ได้ช่วงในการวัดกระแสที่กว้างขึ้น โดยเพิ่มอัตราขยายจาก 0.01 เป็น 0.02 ซึ่งหลักการคำนวณค่าพารามิเตอร์ใช้หลักการเดียวกันในหลักการที่ได้กล่าวมาข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ตารางสรุปค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบขดลวดโรกอฟสกี้

Parameters	Rogowski A	Rogowski B	Rogowski C
Gain (อัตราขยาย)	0.02	0.02	0.02
Area coil (m^2)	$252x10^{-6}$	$252x10^{-6}$	$252x10^{-6}$
Length of coil (m)	0.258	0.258	0.258
permeability	4750	6050	5112
turn of Number	246	227	239
Inductance (H)	0.353	0.384	0.385
Resistance of coil (Ω)	8.90	8.50	8.91
Integrator Resistance(Ω)	4.92	4.54	4.78
Boundary lower frequency (Hz)	39.0	34.0	38.2

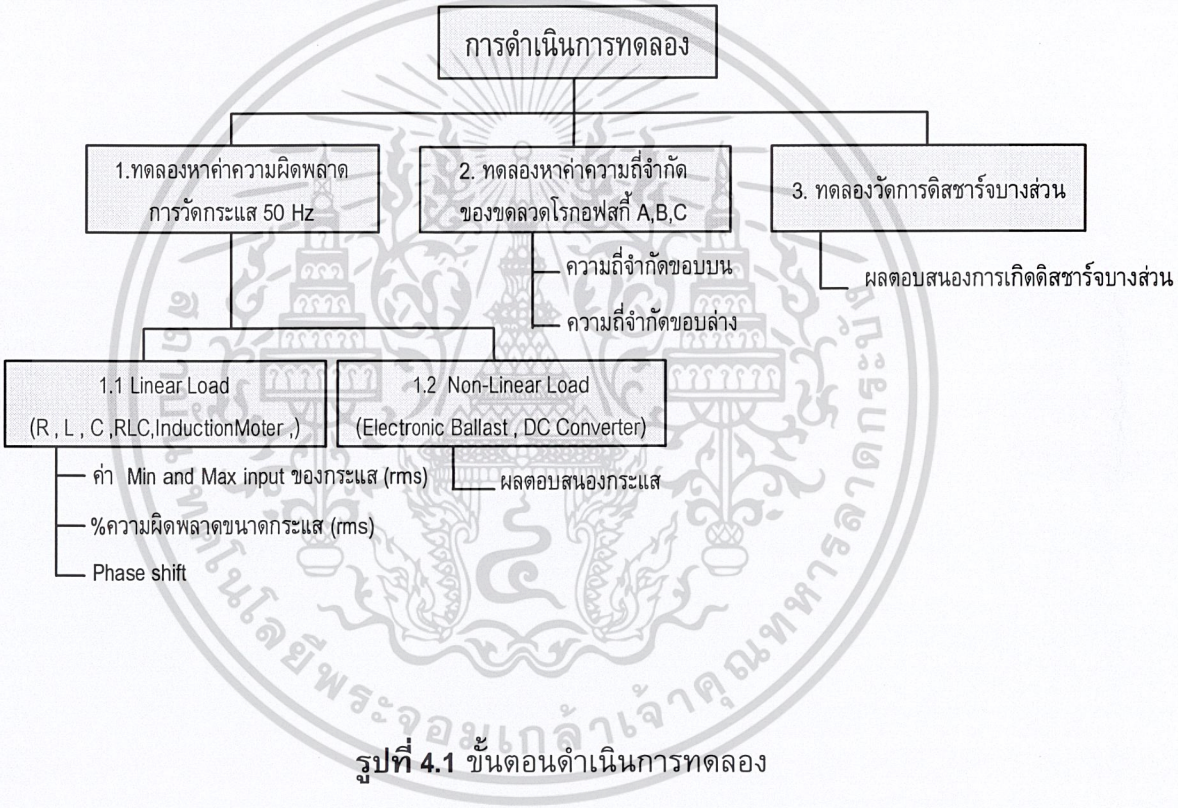


รูปที่ 3.11 ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การดำเนินการทดลองและผลการทดลอง

จากการออกแบบและประกอบสร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C แล้ว เพื่อเป็นการทดสอบการทำงาน จึงได้ทำการทดลองวัดกระแสโดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับ Current probe และ หม้อแปลงกระแส โดยใช้โปรแกรม Lab view ในการดำเนินการทดลองสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอน ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินการทดลองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

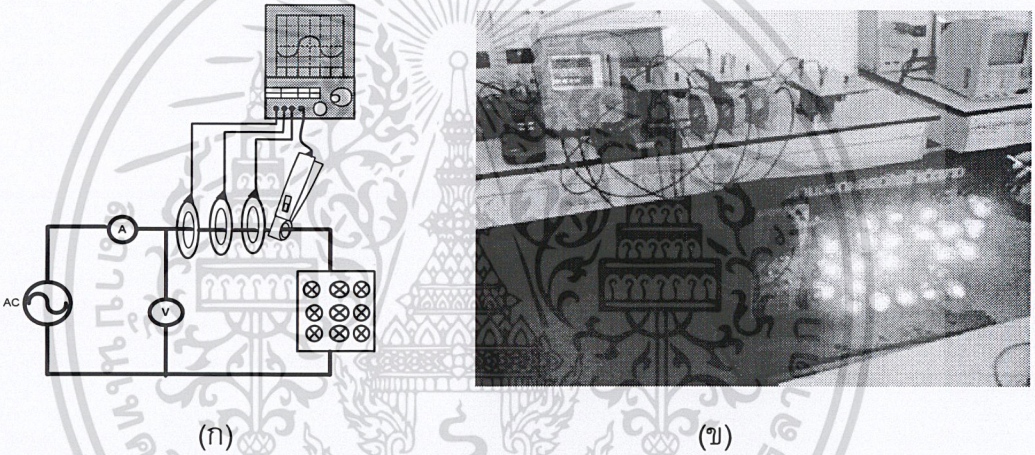
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การทดลองหาค่าความผิดพลาดในการวัดกระแส 50 Hz

ในการทดลองนี้สามารถแบ่งการทดลองใช้ขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C วัดกระแสที่มีความถี่ 50 Hz ได้เป็น 2 การทดลองคือ การวัดกระแสที่โหลดมีกระแสแปรผันตามแรงดัน (Linear load) และการวัดกระแสที่โหลดมีกระแสไม่แปรผันตามแรงดัน (Non Linear load) ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

4.1.1 การทดลองวัดกระแส Linear load

การทดลองในหัวข้อนี้ คือการนำชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ไปวัดกระแส Linear load โดยทดลองกับโหลด R, L, C, RLC, Induction Motor เพื่อหากระแสต่ำสุดและกระแสสูงสุด (rms), เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดขนาดกระแส (rms) และมุมต่างเฟสของกระแส Linear load โดยเปรียบเทียบกระแสที่วัดได้กับหม้อแปลงกระแสและ Current Probe ซึ่งมีลักษณะวงจรที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 4.2



(ก) (ข)

รูปที่ 4.2 (ก) วงจรการทดลองวัดกระแส Linear load
(ข) วงจรในการทดลองจริงเพื่อวัดกระแส Linear load

จากการดำเนินการทดลองตามหัวข้อที่ 4.1.1 ได้ผลการทดลองรูปคลื่นกระแส Linear Load และตารางบันทึกค่ากระแส (rms) ซึ่งมีการทดลองต่างๆดังต่อไปนี้

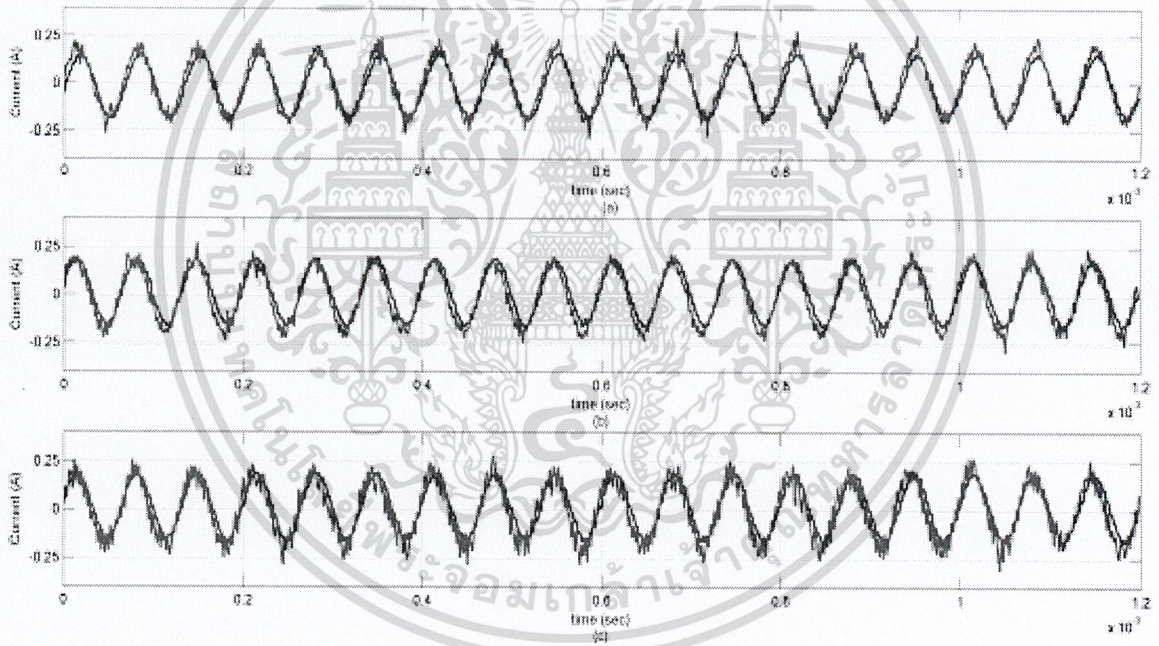
4.1.1.1 ผลการทดลองวัดกระแสโหลดหลอดไฟ (R)

การทดลองในหัวข้อนี้ ใช้ขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับ Current probe วัดกระแสที่โหลดหลอดไฟ เพื่อสังเกตความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสและค่ากระแสที่ได้จากการทดลองโดยบันทึกผลการทดลองด้วยออสซิลโลสโคปและนำข้อมูลที่บันทึกได้มาแสดงผลในโปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ผลของรูปคลื่นกระแสที่ขนาดกระแสต่าง ๆ ดังนี้

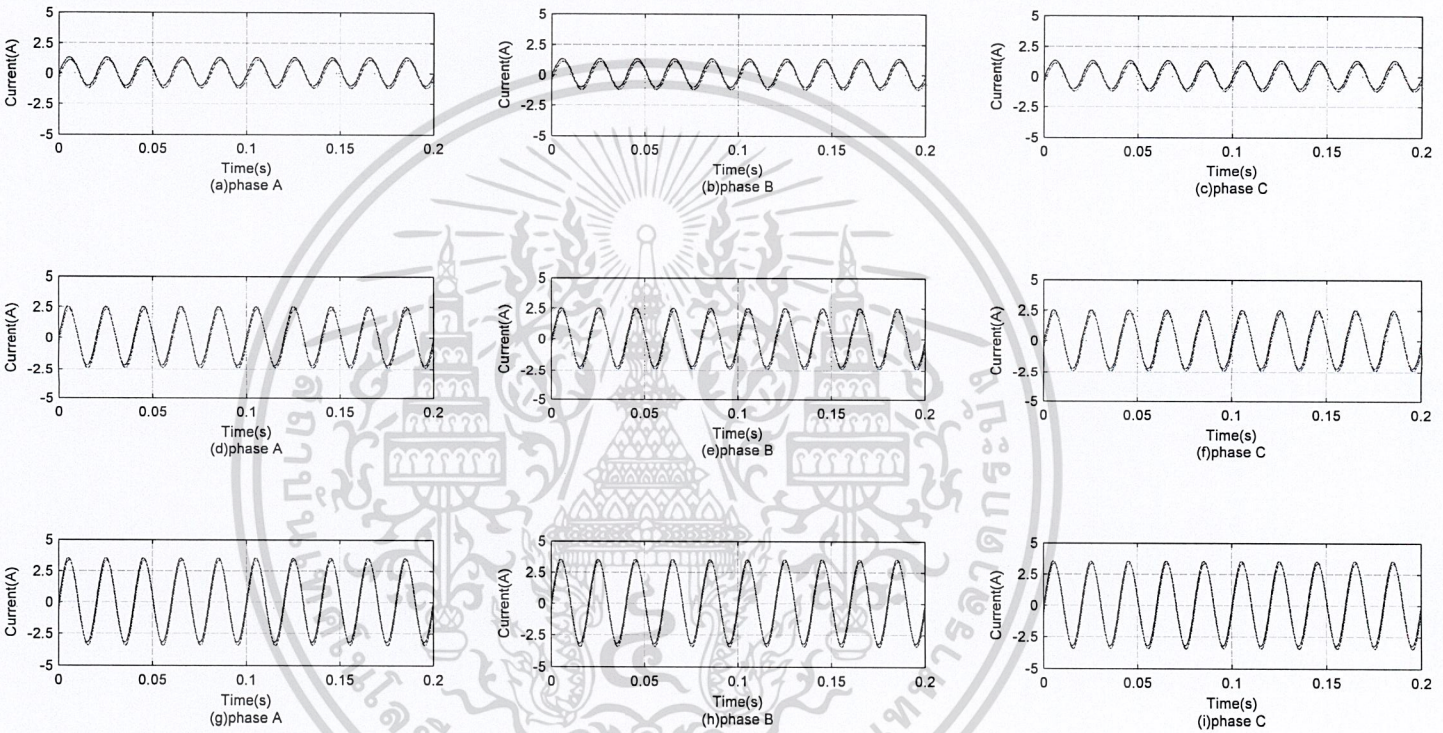
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ผลการทดลองหาความถี่จำกัดขอบบน

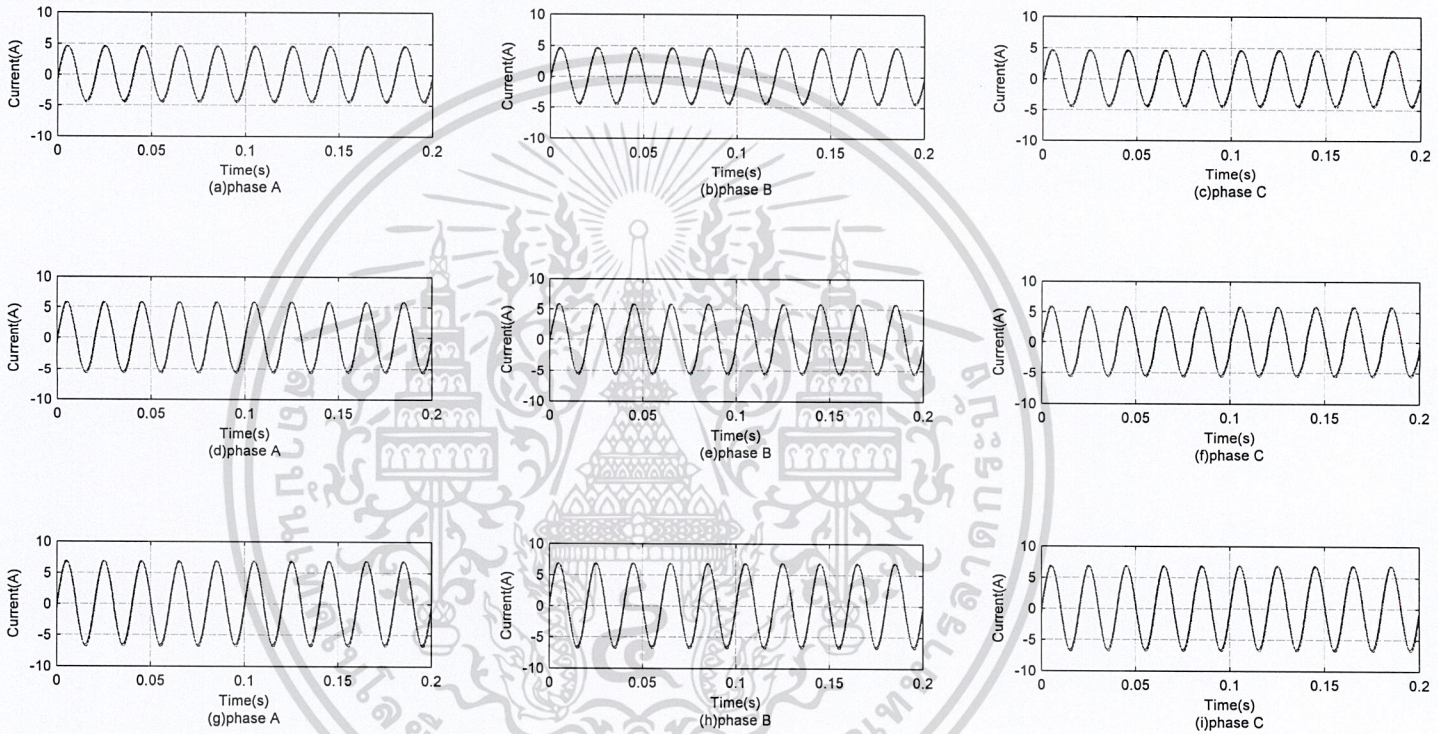
ในการทดลองนี้ที่ค่าความถี่ 15 kHz รูปคลื่นกระแสที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดเกิน 3% และมีค่ามุมต่างเฟสเกิน 7.2° แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ที่สูงเกินกว่า 15 kHz ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C จะวัดค่ากระแสมีความผิดพลาดสูง



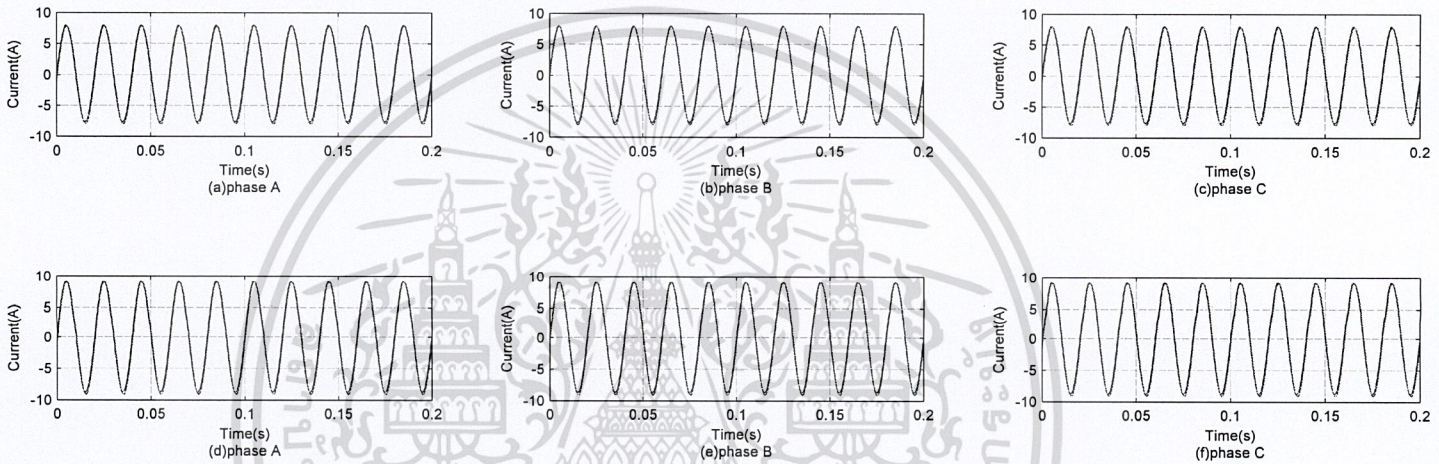
รูปที่ 4.37 a, b,c รูปกระแสความถี่ 15kHz จาก Function generator วัดโดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B,C เทียบกับ แรงดันคร่อมตัวต้านทาน 0.017 Ω



รูปที่ 4.3 a, b, c คือ รูปคลื่นกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับ Current probe โหลด R ที่ขนาดกระแส 0.834 A
d, e, f คือ รูปคลื่นกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับ Current probe โหลด R ที่ขนาดกระแส 1.684 A
g, h, i คือ รูปคลื่นกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับ Current probe โหลด R ที่ขนาดกระแส 2.430 A



รูปที่ 4.4 a, b, c คือ รูปคลื่นกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับ Current probe โหลด R ที่ขนาดกระแส 3.26 A
d, e, f คือ รูปคลื่นกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับ Current probe โหลด R ที่ขนาดกระแส 4.06 A
g, h, i คือ รูปคลื่นกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับ Current probe โหลด R ที่ขนาดกระแส 4.88 A



รูปที่ 4.5 a, b, c คือ รูปคลื่นกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับ Current probe โหลด R ที่ขนาดกระแส 5.66 A

d, e, f คือ รูปคลื่นกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ตามลำดับ เทียบกับ Current probe โหลด R ที่ขนาดกระแส 6.47 A

จากรูปคลื่นกระแสการทดลองใช้ขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับ Current probe วัดรูปคลื่นกระแสที่โหลดหลอดไฟที่ค่ากระแส 0.834-6.470 A สามารถบันทึกขนาดของกระแส (rms) ที่วัดได้และหาค่าความผิดพลาดในการวัดกระแส (%Error) ของขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับ Current probe ได้ดังตารางที่ 4.1

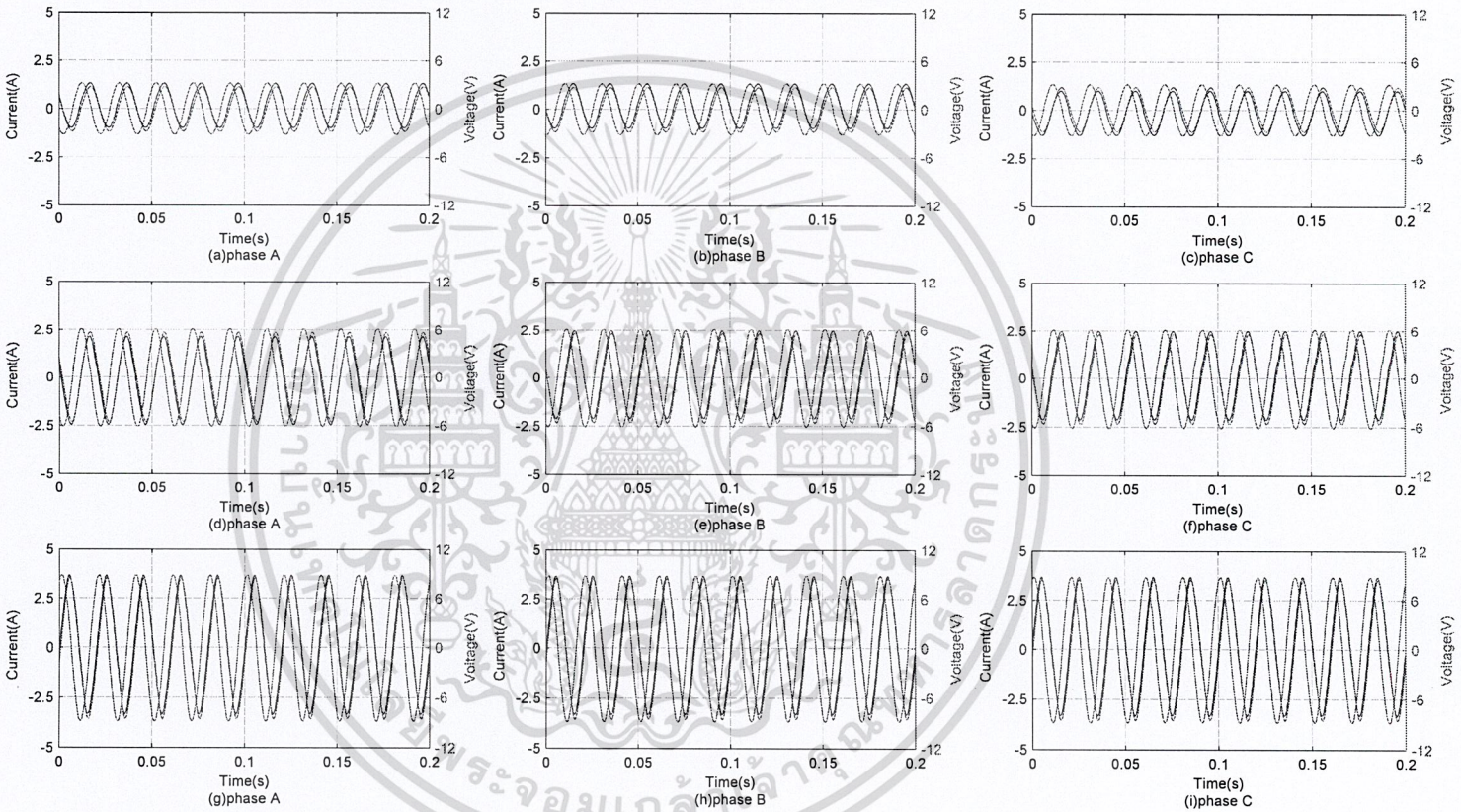
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวัดกระแสโหลดหลอดไฟ (R)

Test No.	I_Probe	I_Rokowski			Error I Probe& I Rokowski		
		Rog A	Rog B	Rog C	Rog A	Rog B	Rog C
	A	A			%		
1	0.81	0.840	0.84	0.84	-3.614	-4.046	-3.923
2	1.65	1.651	1.65	1.66	0.121	0.091	-0.242
3	2.40	2.378	2.38	2.39	0.751	0.563	0.209
4	3.22	3.183	3.19	3.19	1.042	0.871	0.669
5	4.01	3.966	3.97	3.98	1.208	1.221	0.884
6	4.82	4.756	4.75	4.77	1.420	1.513	1.150
7	5.61	5.515	5.51	5.54	1.606	1.695	1.249
8	6.41	6.305	6.30	6.32	1.623	1.779	1.467

4.1.1.2 ผลการทดลองวัดกระแสโหลดตัวเหนี่ยวนำ (L)

การทดลองในหัวข้อนี้ ใช้ขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับ Current probe วัดกระแสที่โหลด L เพื่อสังเกตความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสและค่ากระแสที่ได้จากการทดลอง โดยบันทึกผลการทดลองด้วยออสซิลโลสโคปและนำข้อมูลที่บันทึกได้มาแสดงผลในโปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ผลของรูปคลื่นกระแสและแรงดันเปรียบเทียบกันที่ขนาดกระแสต่างๆ ดังนี้

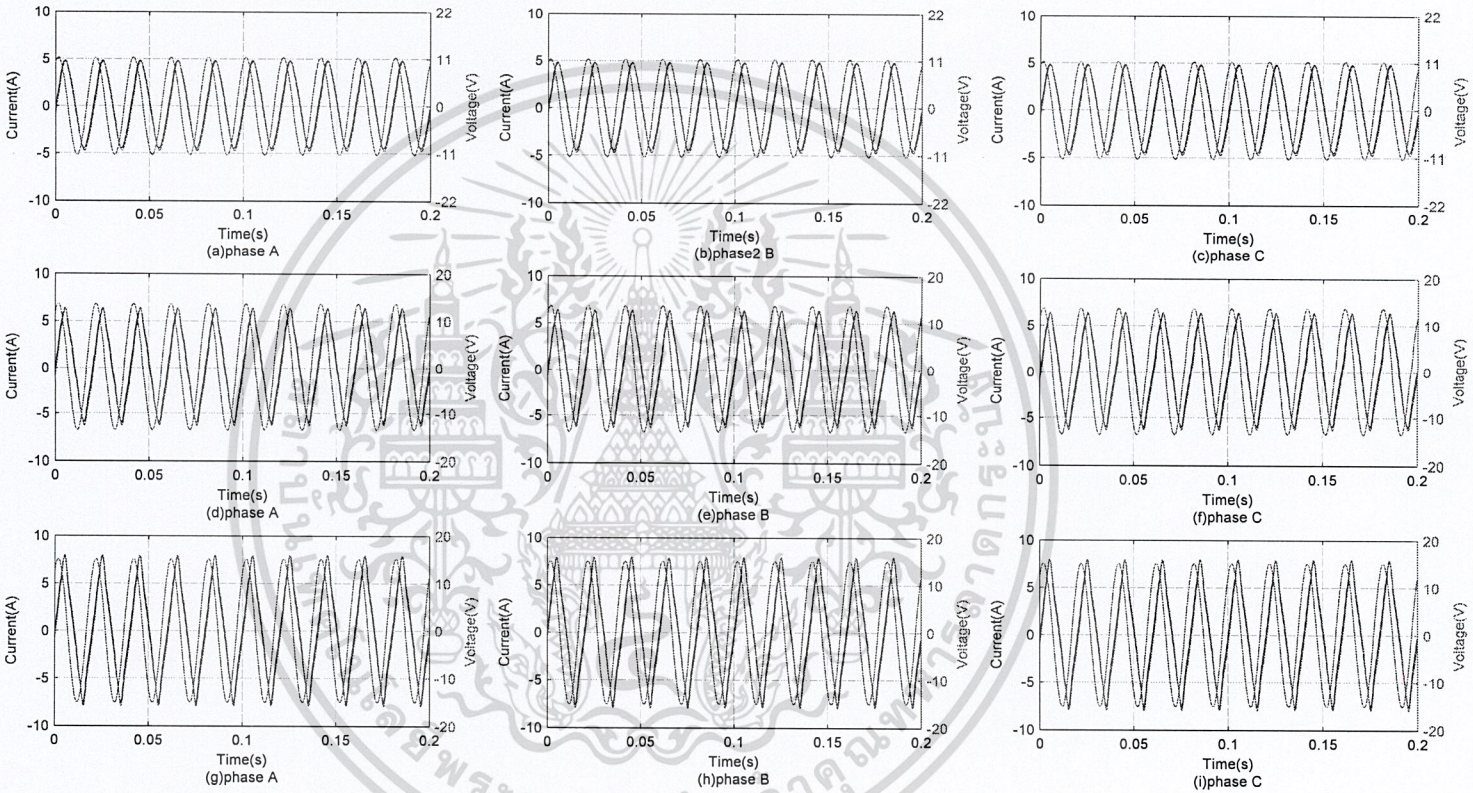
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



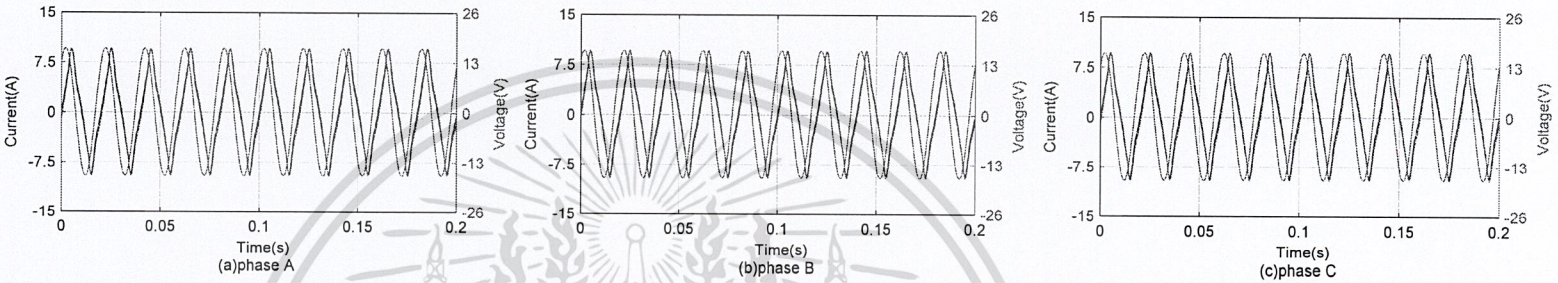
รูปที่ 4.6 a, b, c รูปคลื่น กระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด L ที่ขนาดกระแส 0.820 A

d, e, f รูปคลื่น กระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด L ที่ขนาดกระแส 1.622 A

g, h, i รูปคลื่น กระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด L ที่ขนาดกระแส 2.420 A



รูปที่ 4.7 a, b, c รูปคลื่น กระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด L ที่ขนาดกระแส 3.22 A
d, e, f รูปคลื่น กระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด L ที่ขนาดกระแส 4.03 A
g, h, i รูปคลื่น กระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด L ที่ขนาดกระแส 4.81 A



รูปที่ 4.8 a, b, c รูปคลื่น กระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด L ที่ขนาดกระแส 5.61 A

จากการทดลองใช้ขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C และ Current probe วัดรูปคลื่นกระแสที่โหลดตัวเหนียวนำ (L) ที่ค่ากระแส 0.820-5.61 A เปรียบเทียบกับแรงดันคร่อมโหลด L สามารถบันทึกผลของขนาดกระแส (rms) ที่วัดได้และหาค่าความผิดพลาดในการวัดกระแส (%Error) ของขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับ Current probe ได้ดังตารางที่ 4.2

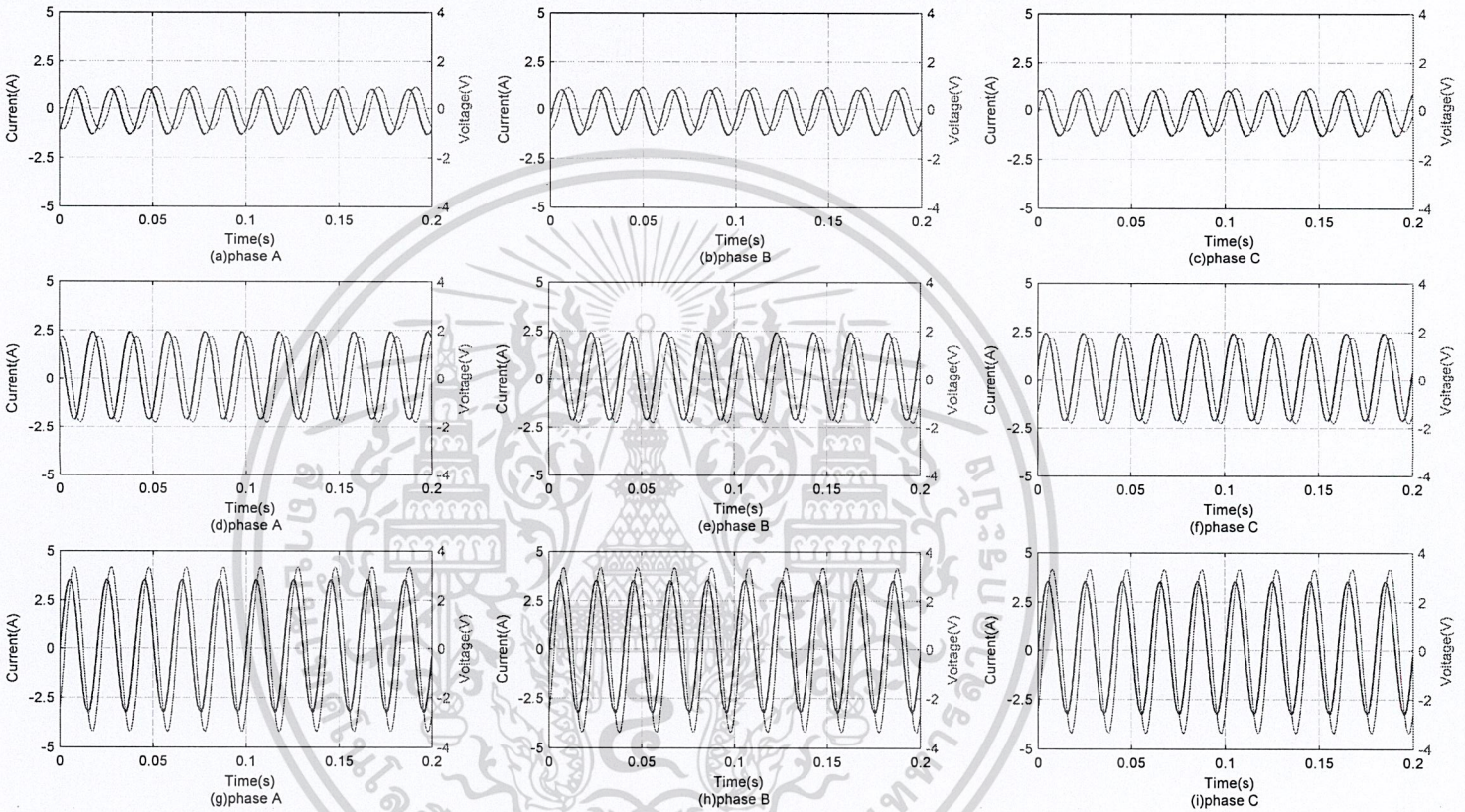
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองวัดกระแสโหลด L

Test No.	I_Probe	I_Rokowski			Error I Probe& I Rokowski		
		Rog A	Rog B	Rog C	Rog A	Rog B	Rog C
	A	A			%		
1	0.81	0.840	0.84	0.84	-3.614	-4.046	-3.923
2	1.65	1.651	1.65	1.66	0.121	0.091	-0.242
3	2.40	2.378	2.38	2.39	0.751	0.563	0.209
4	3.22	3.183	3.19	3.19	1.042	0.871	0.669
5	4.01	3.966	3.97	3.98	1.208	1.221	0.884
6	4.82	4.756	4.75	4.77	1.420	1.513	1.150
7	5.61	5.515	5.51	5.54	1.606	1.695	1.249
8	6.41	6.305	6.30	6.32	1.623	1.779	1.467

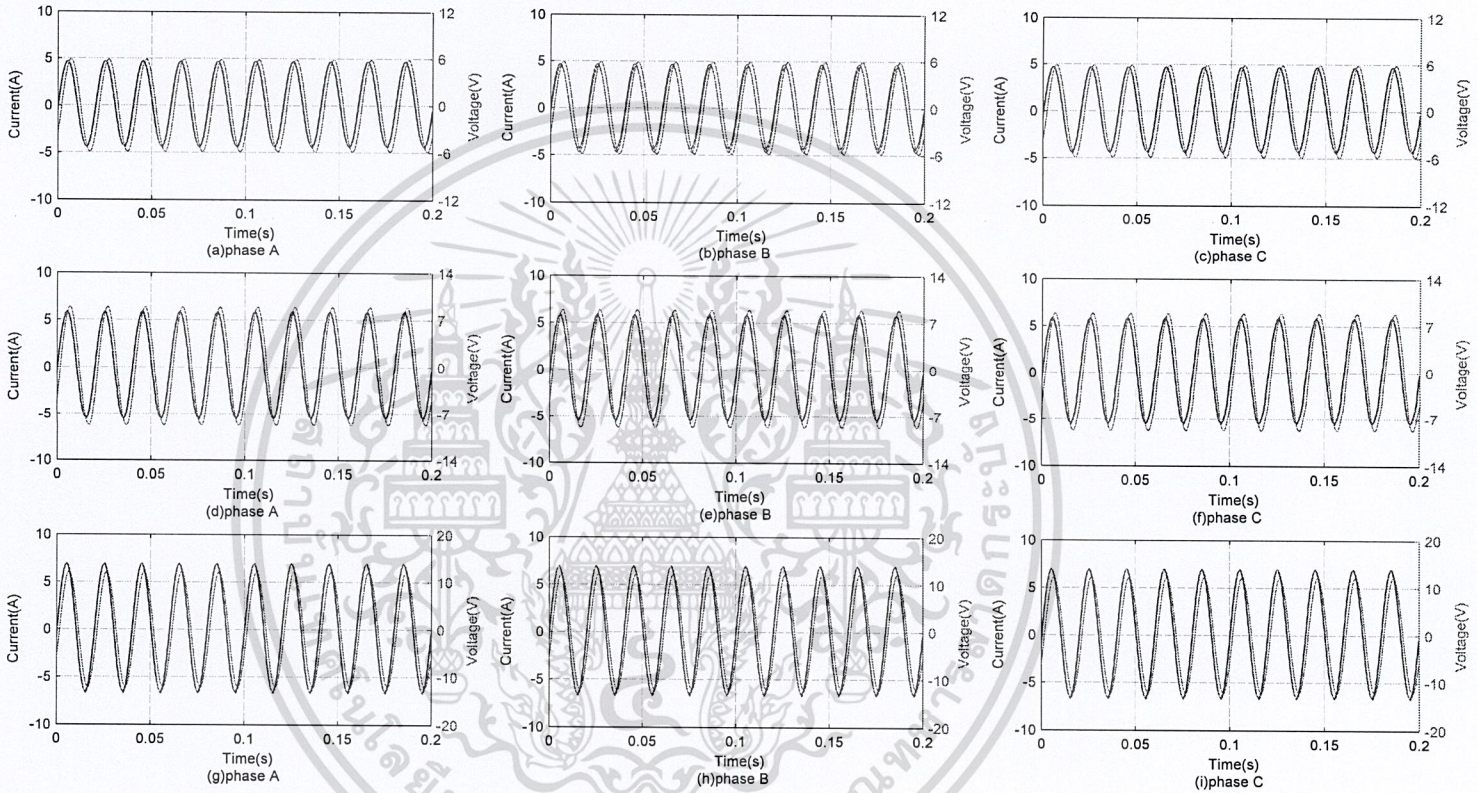
4.1.1.3 ผลการทดลองวัดกระแสโหลดตัวเก็บประจุ (C)

การทดลองในหัวข้อนี้ ใช้ขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C และ Current probe วัดกระแสที่โหลดตัวเก็บประจุ (C) และเทียบกับแรงดันคร่อมโหลด เพื่อสังเกตความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสและค่ากระแสที่ได้จากการทดลองโดยบันทึกผลการทดลองด้วยออสซิลโลสโคปและนำข้อมูลที่บันทึกได้มาแสดงผลในโปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ผลของรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ขนาดกระแสต่างๆ ดังนี้

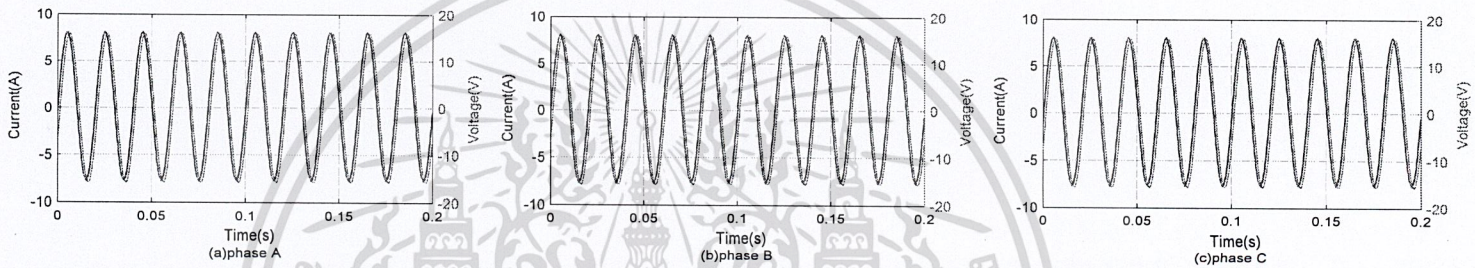
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 a, b, c รูปคลื่นกระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A , B ,C เทียบกับ แรงดัน โหลด C ที่ขนาดกระแส 0.835 A
d, e, f รูปคลื่นกระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B ,C เทียบกับ แรงดัน โหลด C ที่ขนาดกระแส 1.639 A
g, h, i รูปคลื่นกระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B ,C เทียบกับ แรงดัน โหลด C ที่ขนาดกระแส 2.450 A



รูปที่ 4.10 a, b, c รูปคลื่นกระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A , B ,C เทียบกับ แรงดัน โหลด C ที่ขนาดกระแส 3.27 A
d, e, f รูปคลื่นกระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B ,C เทียบกับ แรงดัน โหลด C ที่ขนาดกระแส 4.07 A
g, h, i รูปคลื่นกระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B ,C เทียบกับ แรงดัน โหลด C ที่ขนาดกระแส 4.86 A



รูปที่ 4.11 a, b, c รูปคลื่นกระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A , B ,C เทียบกับ แรงดัน โหลด C ที่ขนาดกระแส 5.67 A

จากการทดลองใช้ขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับ Current probe วัดกระแสที่โหลดตัวเก็บประจุ (C) ที่ค่ากระแส 0.820-5.61 A เทียบกับแรงดันคร่อมโหลด สามารถบันทึกผลของขนาดกระแส (rms) ที่วัดได้และหาค่าความผิดพลาดในการวัดกระแส (%Error) ของขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับ Current probe ได้ดังตารางที่ 4.3

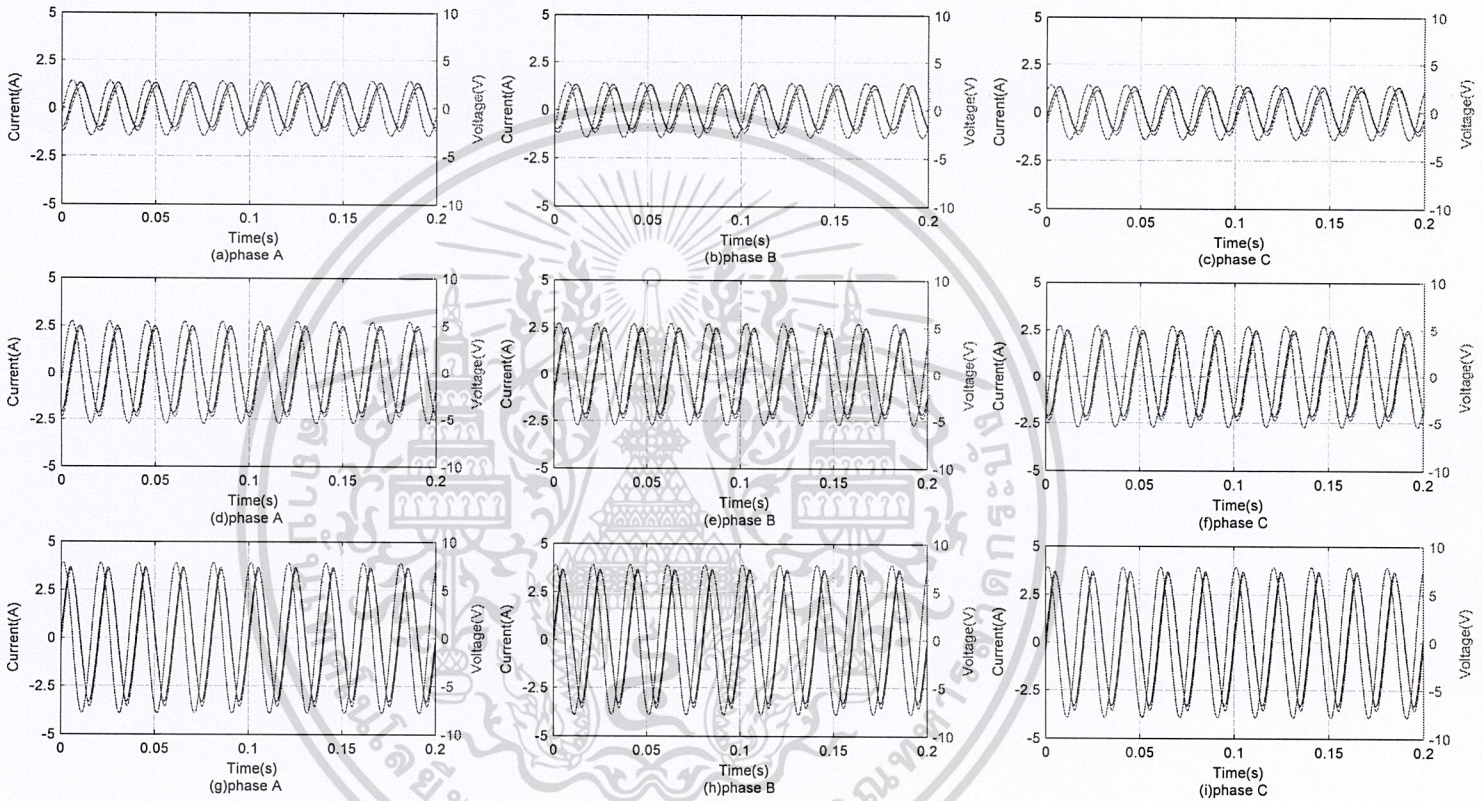
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองวัดกระแสโหลด C

Test No.	I_Probe	I_Rokowski			Error I Probe& I Rokowski		
		Rog A	Rog B	Rog C	Rog A	Rog B	Rog C
	A	A			%		
1	0.82	0.840	0.84	0.85	-2.41	-2.658	-3.146
2	1.61	1.616	1.62	1.62	-0.53	-0.685	-0.871
3	2.40	2.400	2.40	2.40	0.02	0.021	-0.146
4	3.22	3.203	3.19	3.20	0.54	0.870	0.497
5	4.02	3.983	3.97	3.99	0.90	1.132	0.697
6	4.81	4.753	4.74	4.76	1.15	1.425	0.998
7	5.60	5.535	5.51	5.54	1.23	1.677	1.142

4.1.1.4 ผลการทดลองวัดกระแสโหลด RLC

การทดลองในหัวข้อนี้ ใช้ขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C และ Current probe วัดกระแสที่โหลด RLC และเทียบกับแรงดันคร่อมโหลด เพื่อสังเกตความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสและค่ากระแสที่ได้จากการทดลองโดยบันทึกผลการทดลองด้วยออสซิลโลสโคปและนำข้อมูลที่บันทึกได้มาแสดงผลในโปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ผลของรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ขนาดกระแสต่างๆ ดังนี้

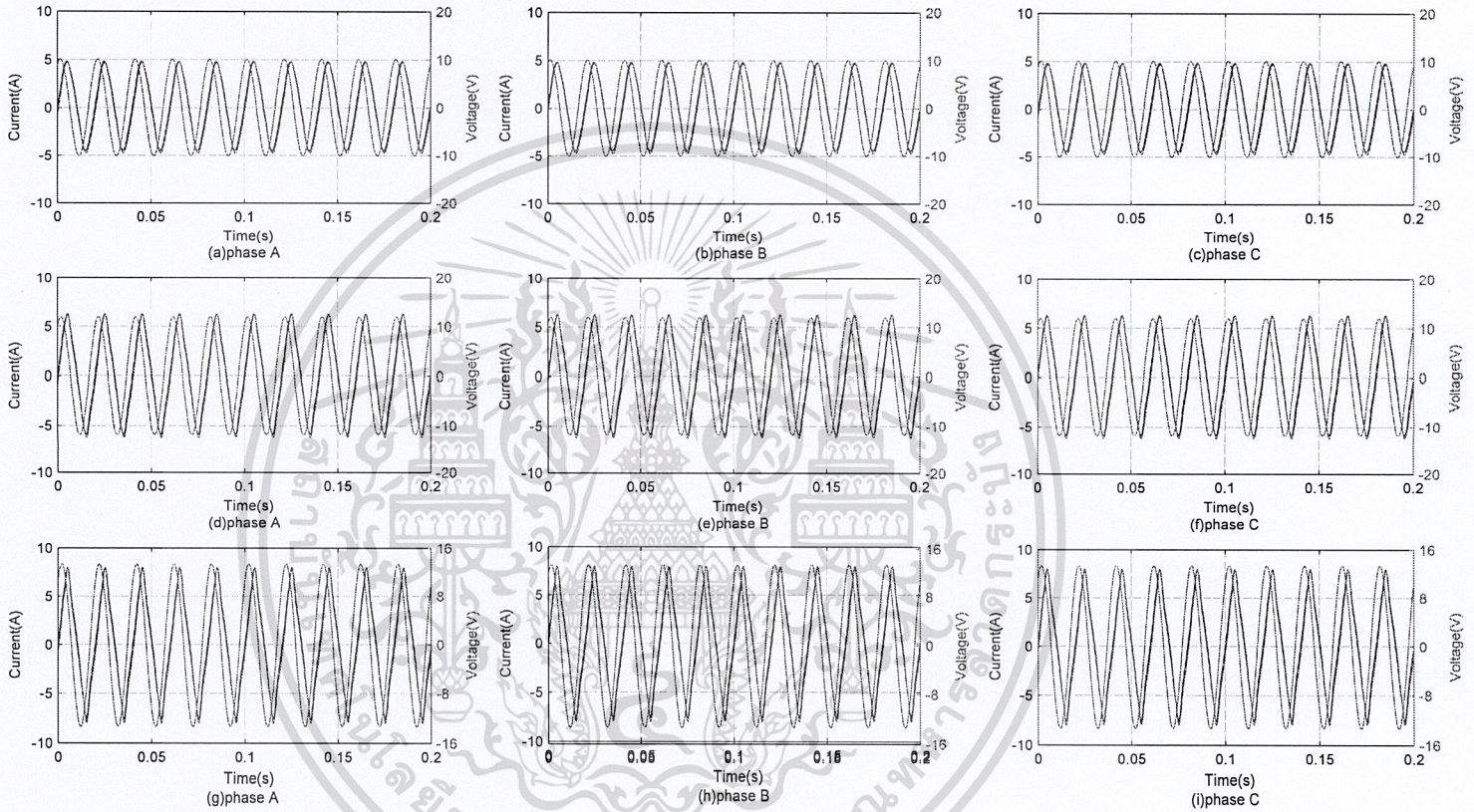
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 a, b, c รูปคลื่นกระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A , B ,C เทียบกับ แรงดัน โหลด RLC ที่ขนาดกระแส 0.82 A

d, e, f รูปคลื่นกระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B ,C เทียบกับ แรงดัน โหลด RLC ที่ขนาดกระแส 1.618 A

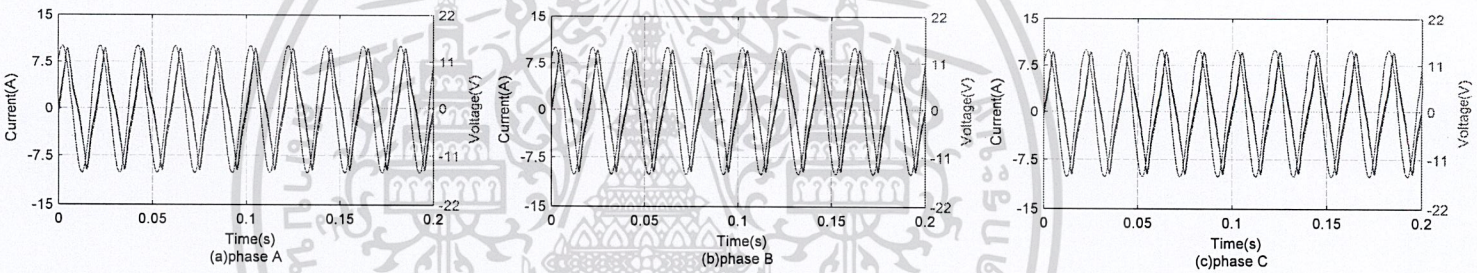
g, h, i รูปคลื่นกระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B ,C เทียบกับ แรงดัน โหลด RLC ที่ขนาดกระแส 2.42 A



รูปที่ 4.13 a, b, c รูปคลื่นกระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A , B ,C เทียบกับ แรงดัน โหลด RLC ที่ขนาดกระแส 3.22 A

d, e, f รูปคลื่นกระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B ,C เทียบกับ แรงดัน โหลด RLC ที่ขนาดกระแส 4.04 A

g, h, i รูปคลื่นกระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B ,C เทียบกับ แรงดัน โหลด RLC ที่ขนาดกระแส 4.81 A



รูปที่ 4.14 a, b, c รูปคลื่นกระแสจาก Current probe และกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A , B ,C เทียบกับ แรงดัน โหลด RLC ที่ขนาดกระแส 5.63 A

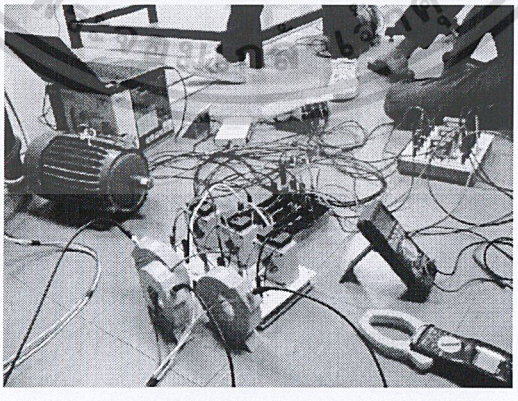
จากรูปคลื่นการทดลองใช้ขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับ Current probe วัดกระแสที่โหลด RLC ที่ค่ากระแส 0.820-5.63 A สามารถบันทึกผลของขนาดกระแส (rms) ที่วัดได้และหาค่าความผิดพลาดในการวัดกระแส (%Error) ของขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับ Current probe ได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองวัดกระแสโหลด RLC

Test No.	I_Probe	I_Rogowski			Error I Probe& I Rogowski		
		Rog A	Rog B	Rog C	Rog A	Rog B	Rog C
	A	A			%		
1	0.81	0.8295	0.83	0.83	-3.043	-2.981	-3.106
2	1.60	1.5985	1.60	1.60	0.343	0.281	0.405
3	2.41	2.3745	2.37	2.38	1.350	1.475	1.184
4	3.20	3.148	3.14	3.15	1.748	1.998	1.670
5	4.03	3.9485	3.94	3.95	2.047	2.220	1.947
6	4.81	4.7035	4.69	4.71	2.295	2.482	2.129
7	5.63	5.495	5.49	5.51	2.398	2.575	2.220

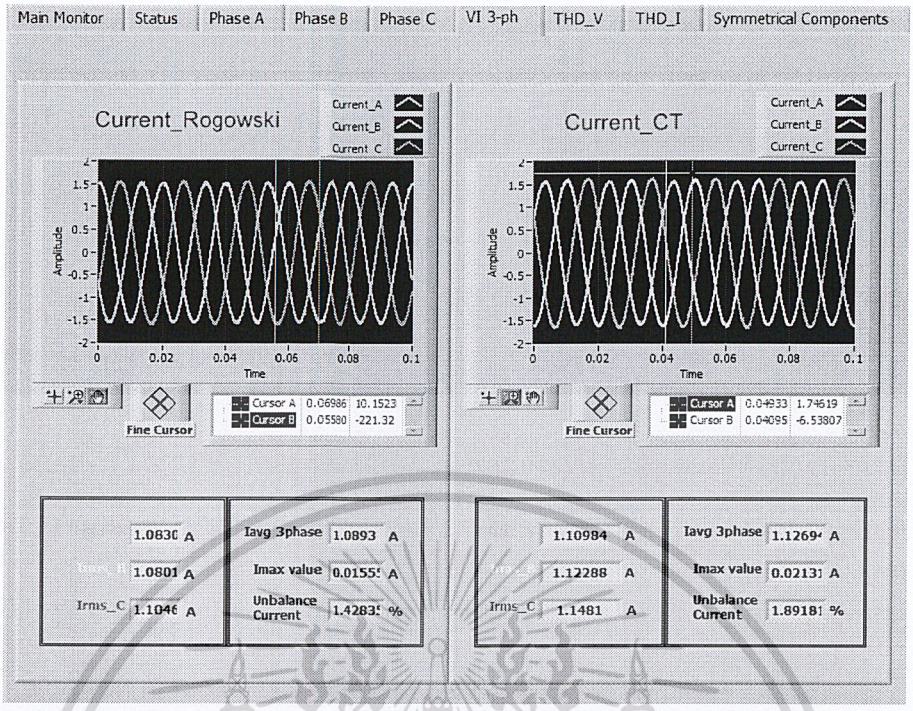
4.1.1.5 ผลการทดลองวัดกระแสโหลด Induction motor

การทดลองในหัวข้อนี้ ใช้ขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C และ หม้อแปลงกระแส (CT) วัดกระแสที่โหลด Induction motor ชนิด 3 เฟส เพื่อสังเกตความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสและขนาดกระแสที่ได้จากการทดลอง โดยในการทดลองนี้จะบันทึกผลการทดลองด้วยโปรแกรม LAB View ซึ่งได้ผลของรูปคลื่นกระแสที่ขนาดแรงดันต่าง ๆ ดังนี้

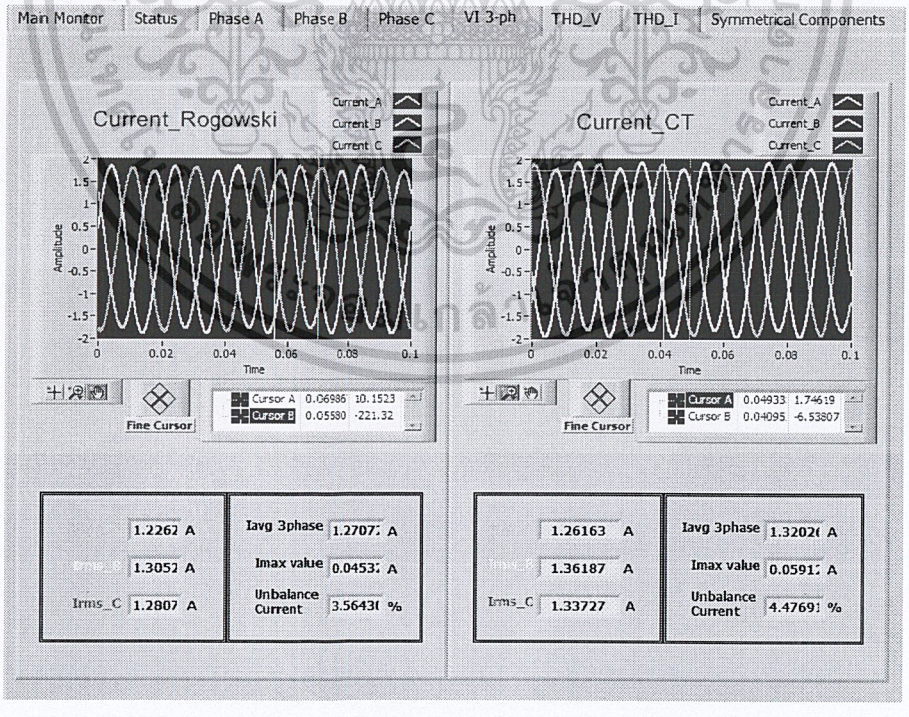


รูปที่ 4.15 การวัดกระแสของ Induction motor โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C และ CT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

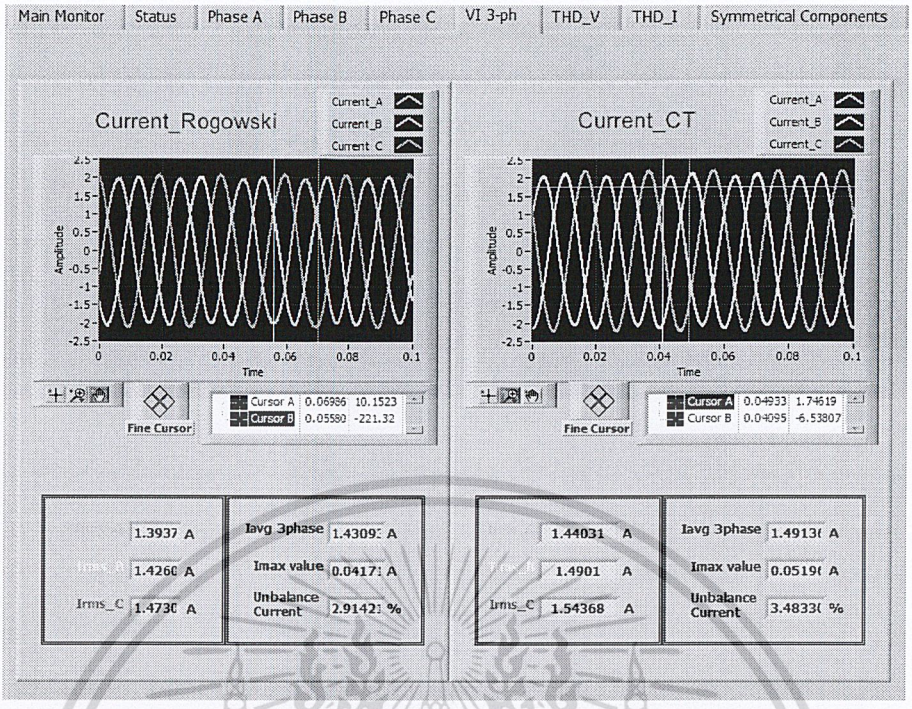


รูปที่ 4.16 รูปคลื่นและขนาดกระแสจากโปรแกรม LAB View ที่ขนาดแรงดัน Input 30 V_{phase}

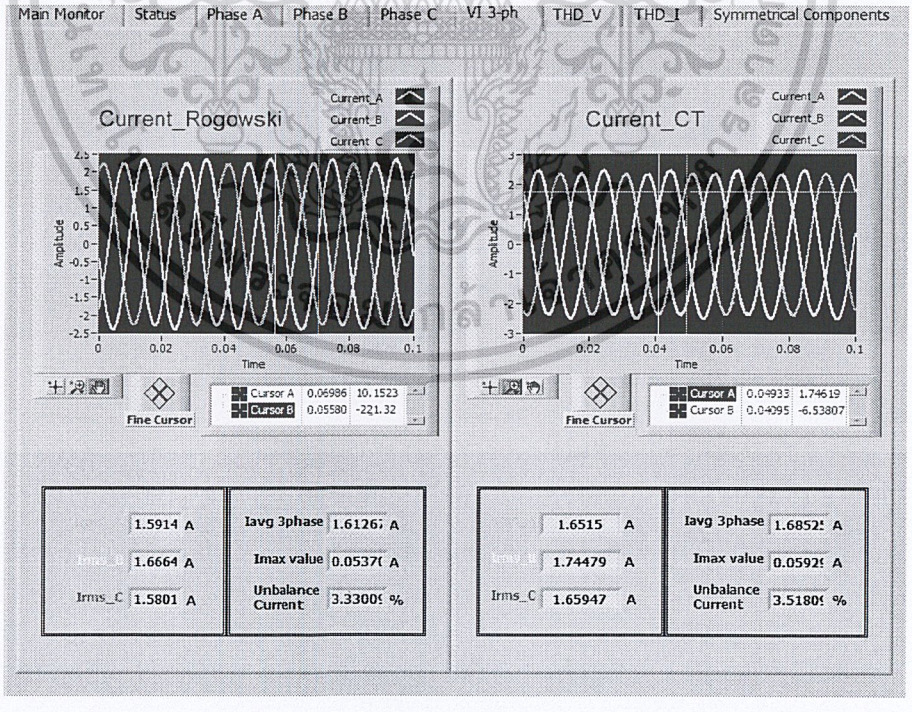


รูปที่ 4.17 รูปคลื่นและขนาดกระแสจากโปรแกรม LAB View ที่ขนาดแรงดัน Input 35 V_{phase}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

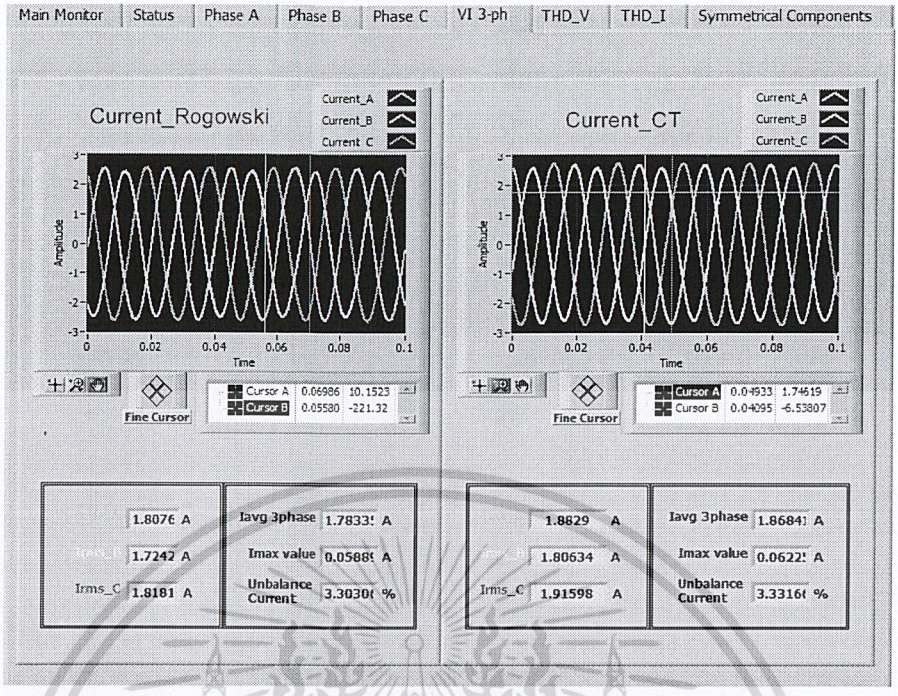


รูปที่ 4.18 รูปคลื่นและขนาดกระแสจากโปรแกรม LAB View ที่ขนาดแรงดัน Input 40 V_{phase}



รูปที่ 4.19 รูปคลื่นและขนาดกระแสจากโปรแกรม LAB View ที่ขนาดแรงดัน Input 45 V_{phase}

เอกสารนี้ [illegible] ให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 รูปคลื่นและขนาดกระแสจากโปรแกรม LAB View ที่ขนาดแรงดัน Input 50 V_{phase}

จากรูปที่ 4.16-4.20 แสดงให้เห็นว่าชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C สามารถใช้วัดกระแสแทนหม้อแปลงกระแส (CT) ที่ค่ากระแสต่าง ๆ ได้ โดยชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C สามารถแสดงรูปคลื่นกระแสและขนาดกระแสในโปรแกรม LAB View และรูปคลื่นกระแสและขนาดกระแสได้จากชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C (Burden 1 VA) เทียบกับหม้อแปลงกระแส (CT: CT Burden 5 VA) มีความใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.6 ผลการทดลองหากระแส minimum

ทดลองนี้ทำการทดลองเพื่อหากระแสน้อยที่สุด ที่ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C สามารถวัดได้ค่ากระแสผิดพลาดไม่เกินกว่า 3% โดยเทียบกับ Current Probe โดยทดลองจ่ายกระแสค่าต่ำๆ ที่โหลด R แล้วบันทึกค่ากระแสที่ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C โดยเทียบกับ Current Probe ที่ค่าความผิดพลาดไม่เกินกว่า 3% ซึ่งได้ตารางบันทึกผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองหากระแส minimum

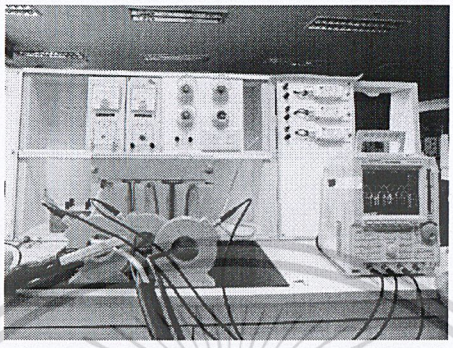
Test No.	I_Probe	I_Rogowski			Error I Probe& I Rogowski		
		Rog A	Rog B	Rog C	Rog A	Rog B	Rog C
	A	A			%		
1	0.047	0.032	0.035	0.037	33.192	26.744	20.930
2	0.072	0.063	0.064	0.065	13.194	11.111	9.722
3	0.095	0.088	0.089	0.091	7.660	6.611	5.037
4	0.125	0.122	0.122	0.122	2.800	2.800	2.800
5	0.159	0.155	0.155	0.155	2.830	2.830	2.830
6	0.189	0.185	0.185	0.185	2.116	2.116	2.116
7	0.220	0.215	0.216	0.216	2.273	1.818	1.818

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นค่ากระแสขนาด 0.125 A คือ Minimum input (rms) ที่ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C สามารถวัดค่าความผิดพลาด (%Error) < ±2.83%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.7 ผลการทดลองหากระแส maximum

ทดลองนี้ทำการทดลองเพื่อหากระแสมากที่สุด ที่ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C สามารถวัดได้ค่ากระแสผิดพลาดไม่เกินกว่า 3% โดยเทียบกับ Current Probe โดยทดลองจ่ายกระแสค่าสูงๆ ที่โหลด L แล้วบันทึกค่ากระแสที่ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C โดยเทียบกับ Current Probe ที่ค่าความผิดพลาดไม่เกินกว่า 3% ซึ่งได้ตารางบันทึกผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.21 การทดลองหาค่ากระแสสูงสุดโดยชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C และ Current Probe

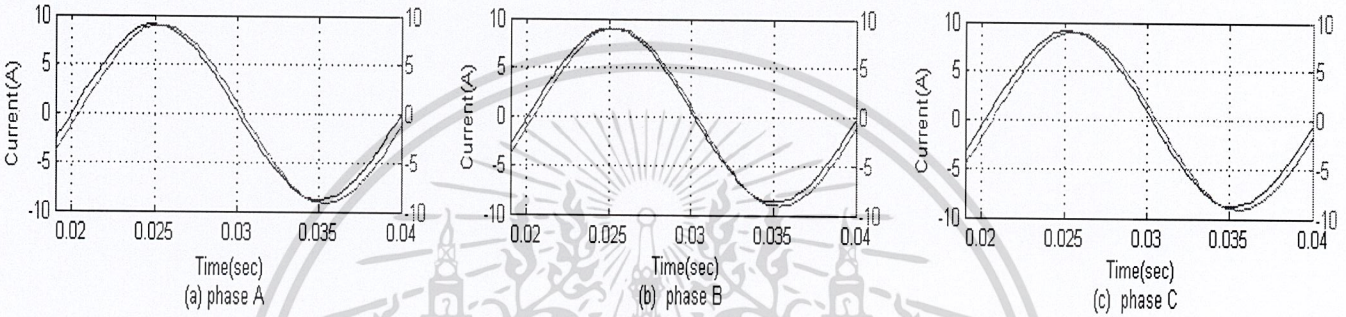
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองหากระแส maximum

Test No.	I_Probe			I Rogowski			Error I Probe& I Rogowski		
	A	B	C	Rog A	Rog B	Rog C	Rog A	Rog B	Rog C
	A			A			%		
1	5.130	5.200	5.300	5.185	5.205	5.275	-1.072	-0.096	0.471
2	9.970	10.010	10.020	9.895	9.775	9.765	0.752	2.347	2.544
3	15.040	15.130	15.390	14.73	14.750	15.110	2.061	2.511	1.819
4	19.700	20.100	20.300	19.23	19.720	20.005	2.385	1.890	1.453
5	24.700	25.010	25.600	24.2	24.865	25.010	2.024	0.579	2.304
6	30.050	30.340	30.410	29.22	29.600	29.700	2.762	2.439	2.334
7	34.760	34.860	34.910	33.98	34.050	34.175	2.243	2.323	2.105
8	40.350	40.390	40.600	39.4	39.265	39.550	2.354	2.785	2.586
9	45.870	45.900	46.010	44.35	44.100	44.200	3.313	3.921	3.933

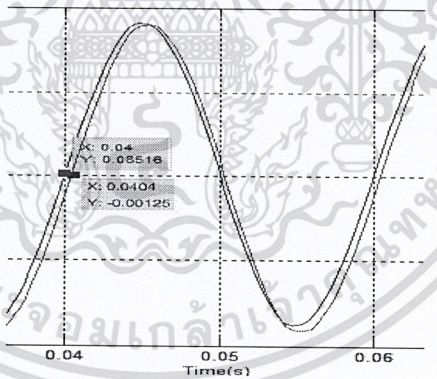
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นค่ากระแสขนาด 40.39 A คือ Maximum input (rms) ที่ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C สามารถวัดค่าความผิดพลาด (%Error) < ±2.83%

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถหาค่ามุมต่างเฟสของขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เทียบกับ Current probe ได้รูปที่ 4.22 และ 4.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



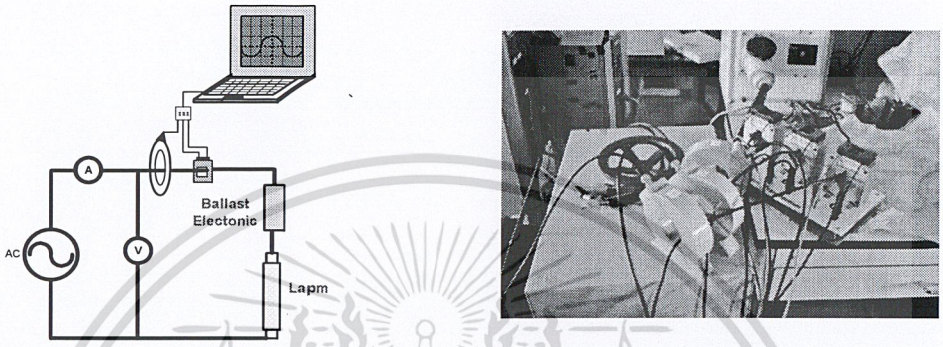
รูปที่ 4.22 a, b, c รูปคลื่นกระแสแสดงมุมต่างเฟสของชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เทียบกับ Current probe



รูปที่ 4.23 รูปคลื่นกระแสแสดงค่ามุมต่างเฟสของชุดขดลวดโรกอฟสกี้ เทียบกับ Current probe ที่มีค่ามุมต่างเฟส 7.2°

4.1.2 การทดลองวัดกระแส Non-Linear load

การทดลองในหัวข้อนี้ คือการนำชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ไปวัดกระแส Non-Linear load (DC Convertor, Ballast Electronic) เพื่อหาความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสที่ได้จากชุดขดลวดโรกอฟสกี้เทียบกับ หม้อแปลงกระแส (CT) โดยทำการวัดกระแสของ DC Convertor โดยใช้โปรแกรม LAB View และทดลองวัดรูปคลื่นกระแสของ Ballast Electronic เทียบกับ Current probe ซึ่งมีลักษณะวงจรที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 4.24



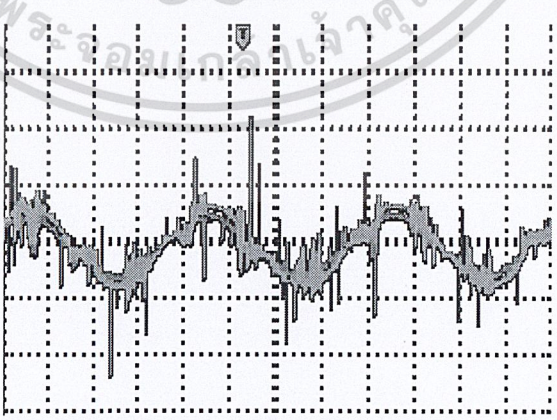
(ก) (ข)

รูปที่ 4.24 ก. วงจรวัดกระแส Non-Linear load (1-phase)
ข. การทดลองวัดกระแส DC Convertor (3-phase)

การทดลองตามหัวข้อที่ 4.1.2 สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองดังต่อไปนี้

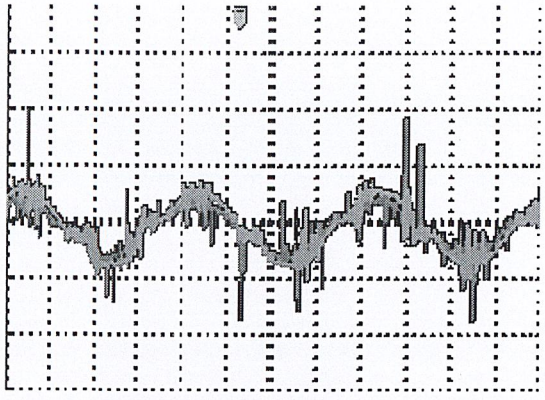
4.1.2.1 ผลการทดลองวัดกระแสของ Ballast Electronic

การทดลองในหัวข้อนี้ ใช้ขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับ Current probe วัดกระแสของ Ballast Electronic (1 phase) เพื่อสังเกตความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสที่ได้จากการทดลองโดยบันทึกผลการทดลองด้วยออสซิลโลสโคป ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

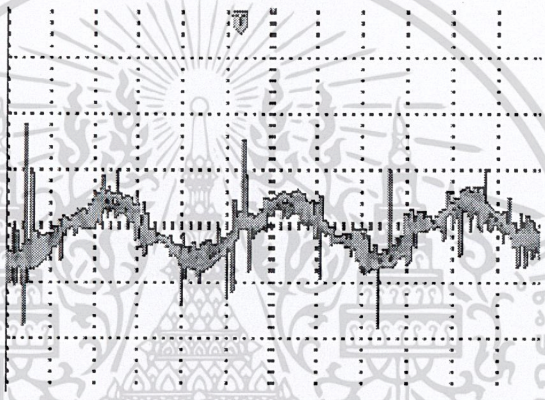


รูปที่ 4.25 กระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ A เปรียบเทียบ Current probe ที่โหลด Ballast Electronic0.86 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 กระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ B เปรียบเทียบ Current probe ที่โหลด Ballast Electronic 0.86 A



รูปที่ 4.27 กระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ C เปรียบเทียบ Current probe ที่โหลด Ballast Electronic 0.86 A

จากผลการทดลองได้รูปคลื่นกระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ เปรียบเทียบกับ Current probe แสดงให้เห็นว่าชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C สามารถตอบสนองต่อกระแส Non-Linear load ที่โหลด Ballast Electronic ได้โดยรูปคลื่นกระแสที่ได้มีความใกล้เคียงกับกระแสที่ได้จาก Current probe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

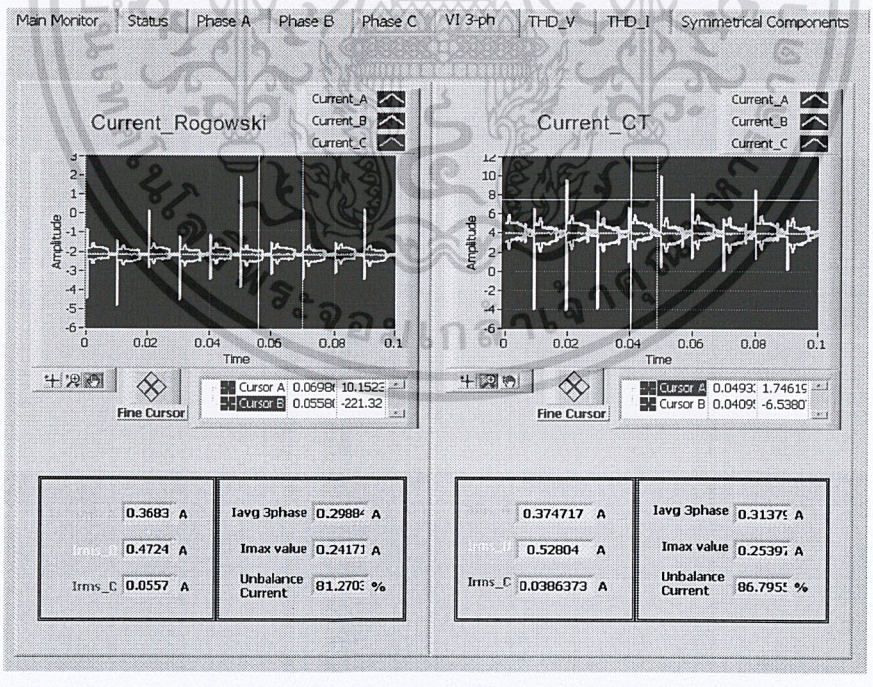
4.1.2.2 ผลการทดลองวัดกระแสของ DC Convertor

จากการทดลองวัดกระแสทั้ง 3 เฟส ของ DC Convertor ซึ่งขับโหลด DC moter ซึ่งวัดกระแสโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกี้เปรียบเทียบกับหม้อแปลงกระแส (CT) แสดงผลการทดลองด้วยโปรแกรม Lab view



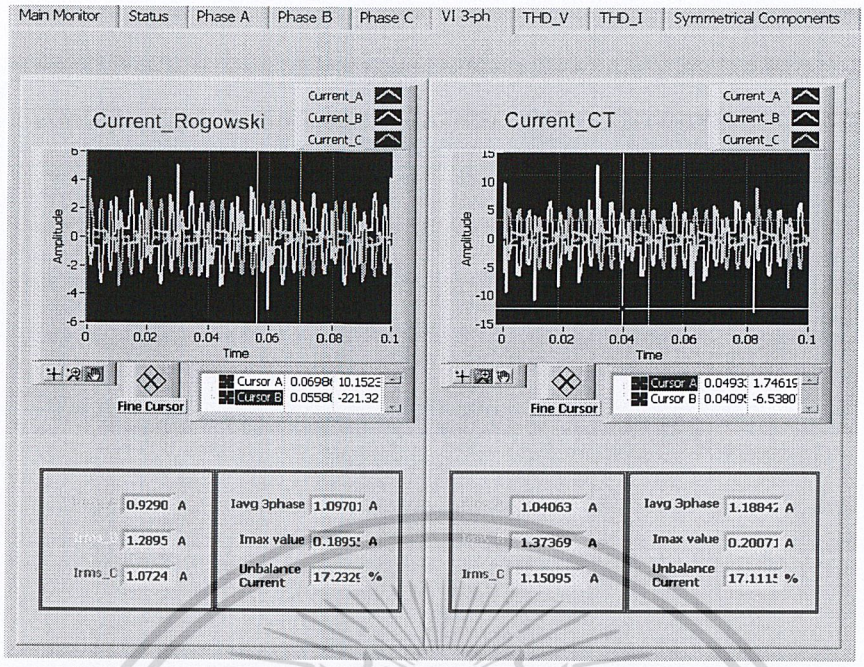
รูปที่ 4.28 การทดลองวัดกระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter

จากการดำเนินการทดลองซึ่งมีผลการทดลองที่กระแสโหลดต่าง ๆ ดังนี้

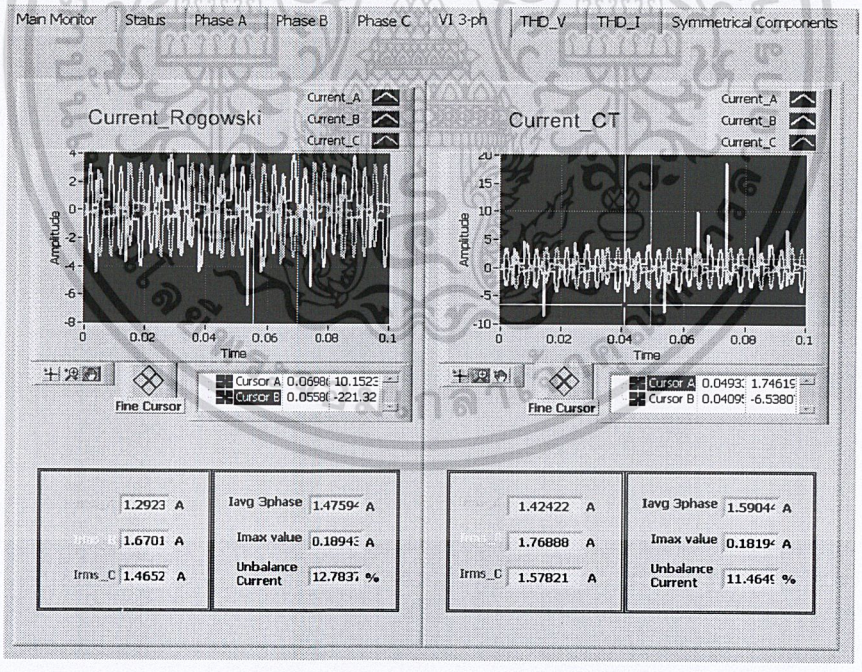


รูปที่ 4.29 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter (No load) โดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับหม้อแปลงกระแส (CT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

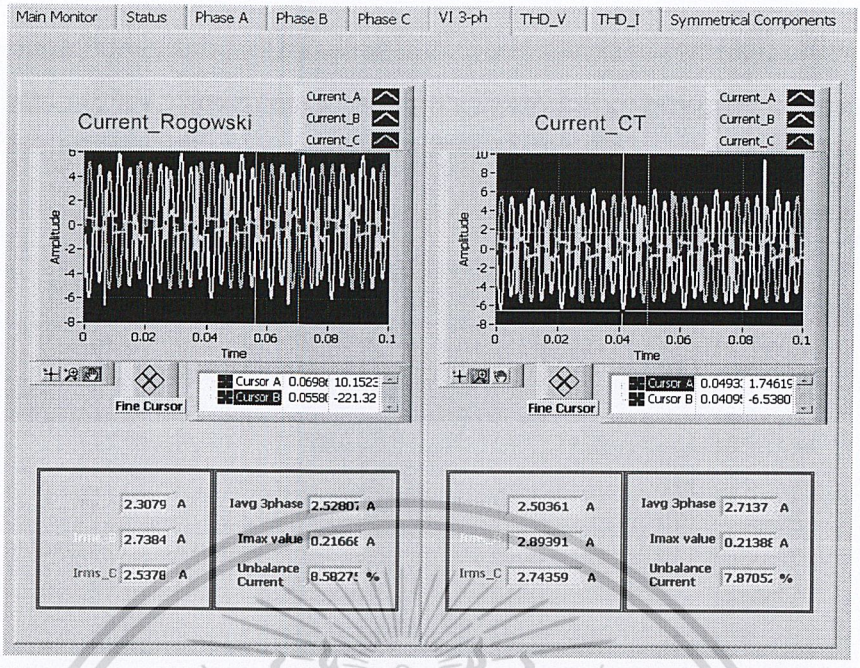


รูปที่ 4.30 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter (10% load) โดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับหม้อแปลงกระแส (CT)

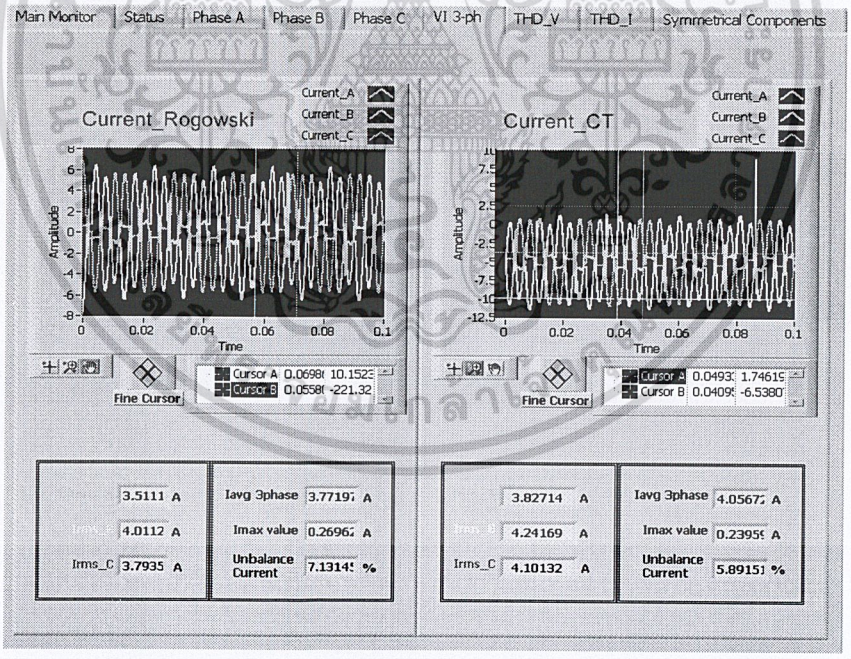


รูปที่ 4.31 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter (20%load) โดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับหม้อแปลงกระแส (CT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

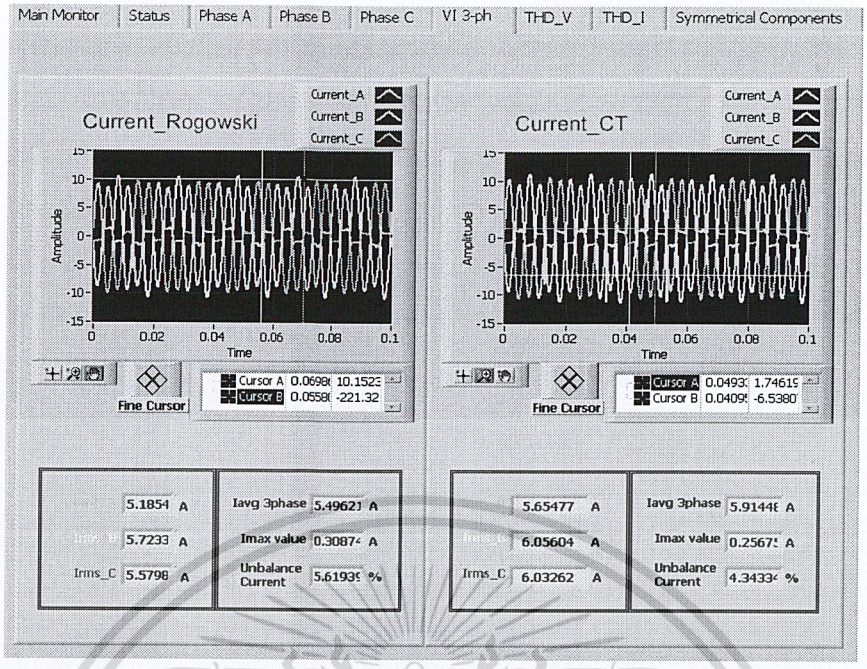


รูปที่ 4.32 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter (30%load) โดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับหม้อแปลงกระแส (CT)



รูปที่ 4.33 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter (50%load) โดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับหม้อแปลงกระแส (CT)

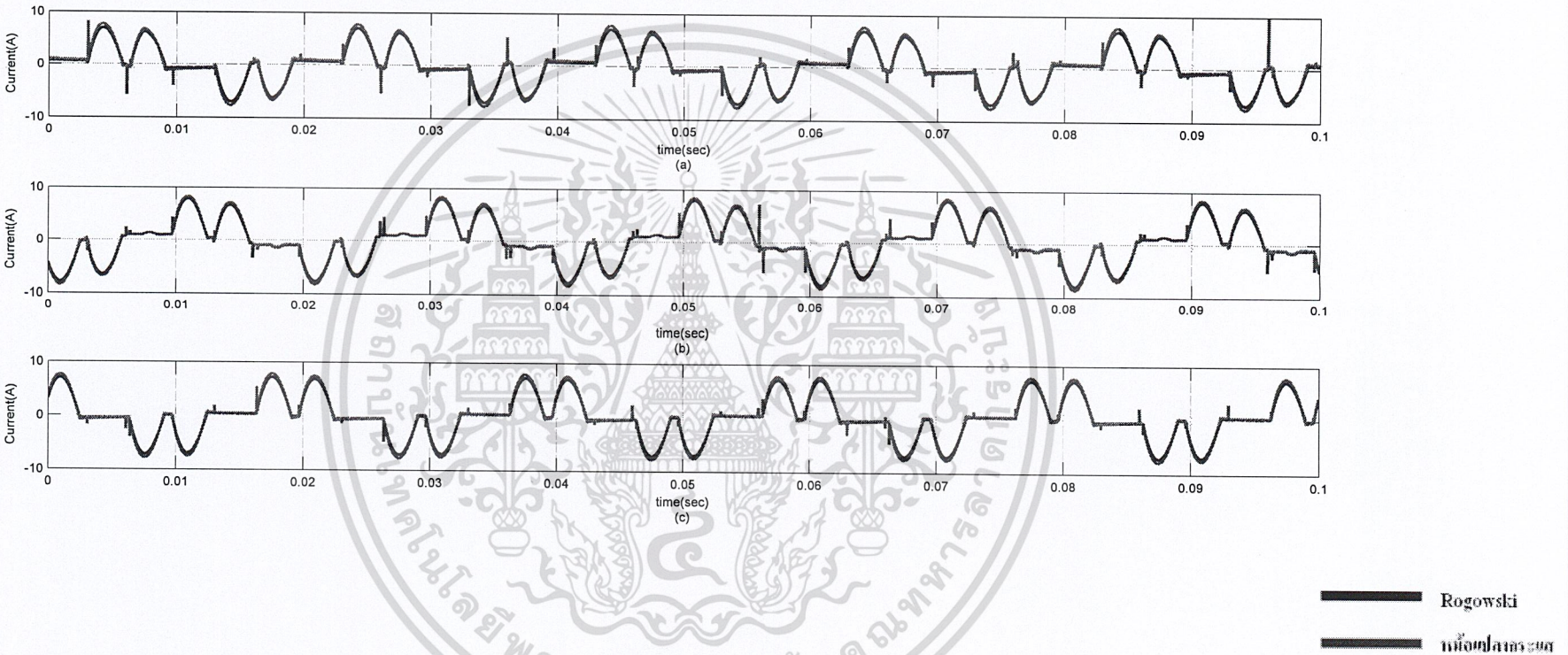
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter (80%load) โดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับหม้อแปลงกระแส (CT)

จากผลการทดลองการตอบสนองต่อรูปคลื่น Non-linear load (DC Convertor ที่ขับโหลด DC moter) ของชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เปรียบเทียบกับ หม้อแปลงกระแส (CT) มีรูปคลื่นที่ความใกล้เคียง แสดงให้เห็นว่าชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C สามารถตอบสนองรูปคลื่น Non-linear load ได้ ซึ่งผลการตอบสนอง Non-linear load สามารถนำข้อมูลการผลทดลองมาแสดงให้เห็นชัดเจนขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 4.35

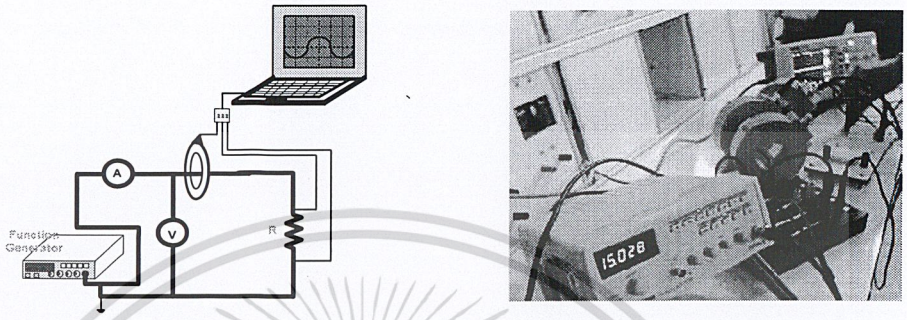
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 กระแส 3 เฟส ของ DC Convertor โดยชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เทียบกับหม้อแปลงกระแสแสดงผลโดยใช้ โปรแกรม MATLAB

4.2 ทดลองหาความถี่จำกัดของขดลวด A, B, C

การทดลองในหัวข้อนี้ คือการนำชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C วัดกระแส เพื่อหาความถี่จำกัดขอบบนและขอบล่าง โดยใช้ Function Generator เป็นแหล่งจ่าย ผ่านตัวต้านทานขนาด 0.017 แล้วทำการปรับค่าความถี่ เพื่อหาค่าความถี่ต่ำสุดและความถี่สูงสุดที่ค่าขนาดกระแสไม่เกิน 3% เมื่อเทียบกับกระแสที่ได้จาก Current Probe และมุมต่างเฟสไม่เกิน 7.2°



(ก) (ข)

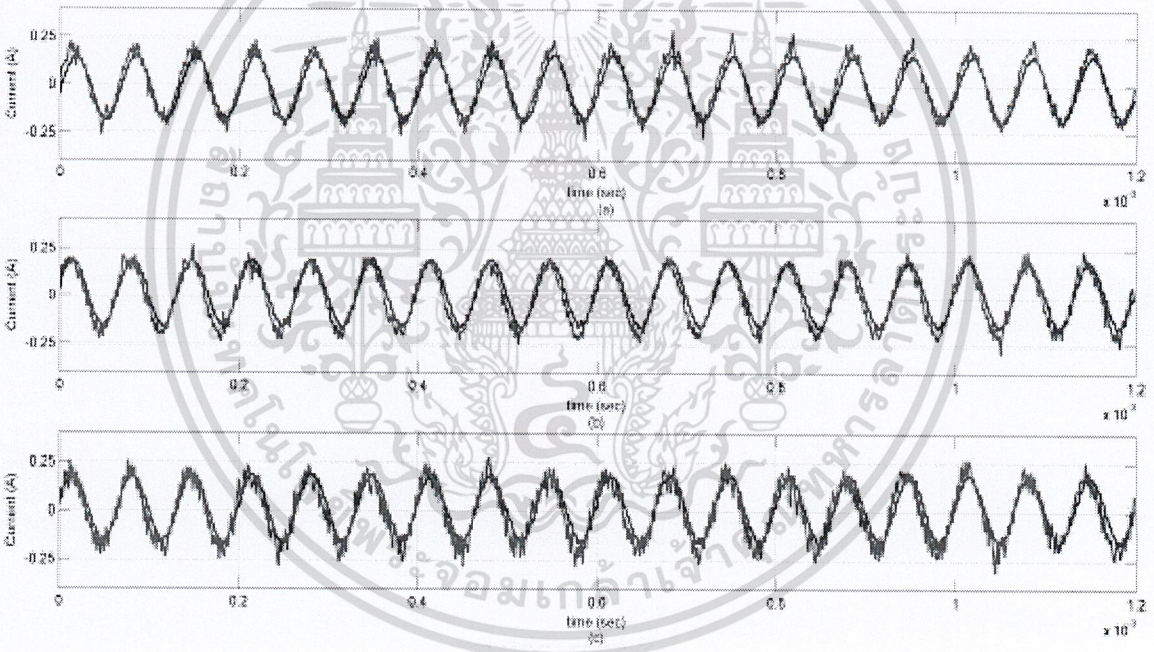
รูปที่ 4.36 ก. วงจรที่ใช้ในการทดลองวัดกระแสเพื่อหาช่วงความถี่จำกัดขอบล่างและขอบบน
ข. การทดลองวัดกระแสเพื่อหาช่วงความถี่จำกัดขอบล่างและขอบบน

จากการดำเนินการทดลองเพื่อหาความถี่จำกัดขอบบนและขอบล่าง สามารถแบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลองคือการทดลองหาค่าความถี่จำกัดขอบบนและการทดลองหาค่าความถี่จำกัดขอบล่าง ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ผลการทดลองหาความถี่จำกัดขอบบน

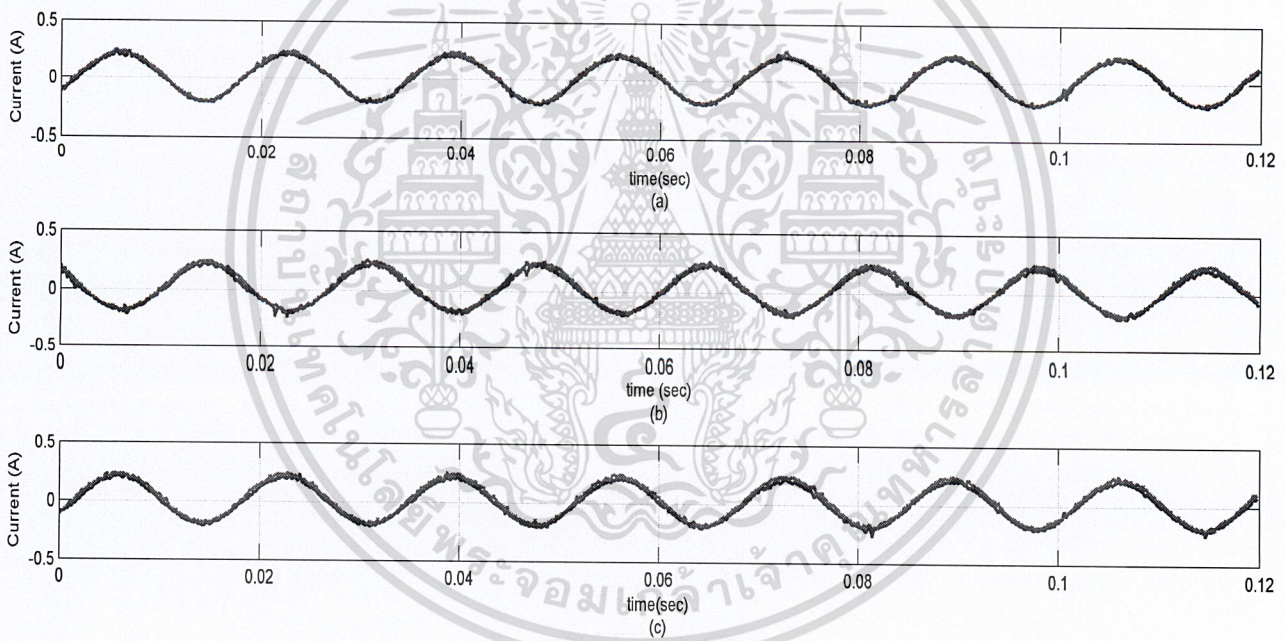
ในการทดลองนี้ที่ค่าความถี่ 15 kHz รูปคลื่นกระแสที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดเกิน 3% และมีค่ามุมต่างเฟสเกิน 7.2° แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ที่สูงเกินกว่า 15 kHz ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C จะวัดค่ากระแสมีความผิดพลาดสูง



รูปที่ 4.37 a, b,c รูปกระแสความถี่ 15kHz จาก Function generator วัดโดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B,C เทียบกับ แรงดันคร่อมตัวต้านทาน 0.017 Ω

4.2.2 ผลการทดลองหาความถี่จำกัดขอบล่าง

ในการทดลองนี้ที่ค่าความถี่ 29.76 Hz รูปคลื่นกระแสที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดเกิน 3% และมีค่ามุมต่างเฟสเกิน 7.2° แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ที่ต่ำเกินกว่า 29.76 Hz ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C จะวัดค่ากระแสมีความผิดพลาดสูง



รูปที่ 4.38 a, b, c รูปกระแสความถี่ 29.76Hz จาก Function generator วัดโดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี A ,B,C เทียบกับ แรงดันคร่อมตัวต้านทาน 0.017 Ω

จากรูปที่ 4.37, 4.38 แสดงผลการวัดกระแสที่ความถี่จำกัดขอบบนและขอบล่างโดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B,C เทียบกับ แรงดันคร่อมตัวต้านทาน 0.017 Ω ซึ่งเป็นค่าความถี่ที่รูปกระแสความคลาดเคลื่อนเกิน 2.83%ผลการทดลองสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4.7

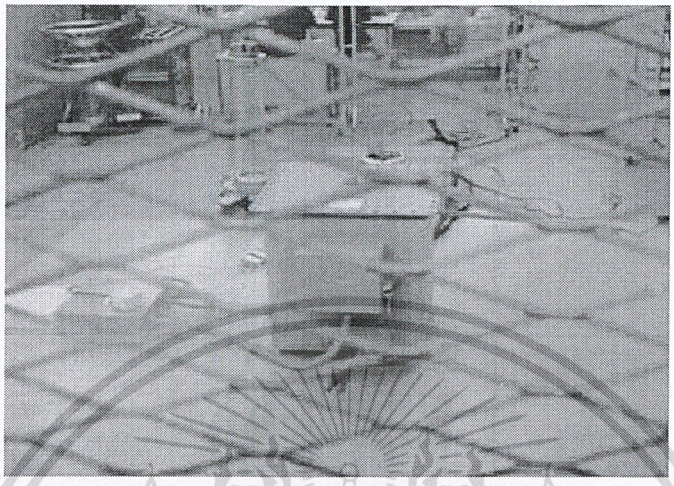
ตารางที่ 4.7 ช่วงความถี่ในการวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี้ A,B,C

พิกัดความถี่	Rogowski.A	Rogowski.B	Rogowski.C
ความถี่จำกัดขอบล่าง	29.76 Hz	29.76 Hz	29.76 Hz
ความถี่จำกัดขอบบน	15k Hz	15k Hz	15k Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

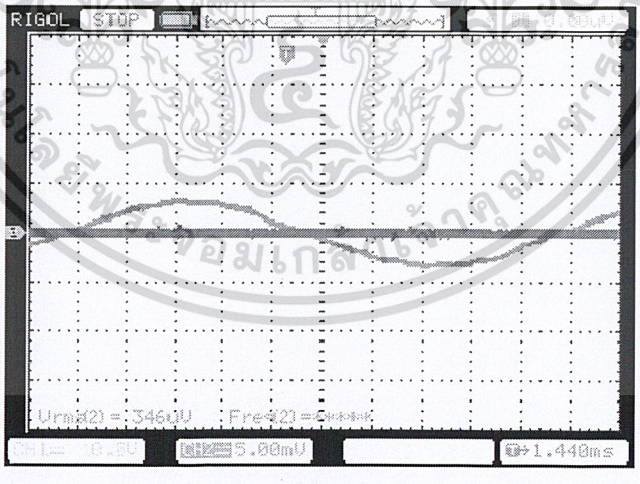
4.3 การทดลองวัดกระแสดิสชาร์จบางส่วน

การทดลองทำขึ้นเพื่อสังเกตผลการตอบสนองต่อกระแสความถี่สูง เช่น การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในระบบไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้ชุดขดลวดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C



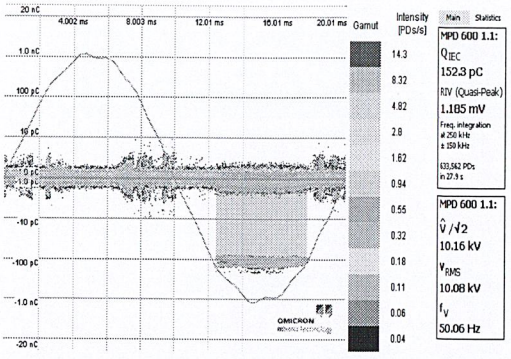
รูปที่ 4.39 การทดลองวัดกระแสดิสชาร์จบางส่วน

ในการทดลองที่ 4.3 ได้ทดลองนำชุดขดลวดโรกอฟสกี้ไปตรวจจับกระแสดิสชาร์จบางส่วน 4 แบบ คือ โคโรนาดิจชาร์จด้านแรงดันสูง, โคโรนาดิจชาร์จด้านแรงดันต่ำ, ดิจชาร์จภายใน, ดิจชาร์จตามผิว ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

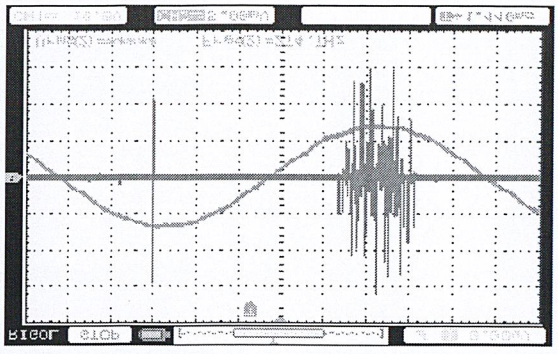


รูปที่ 4.40 กระแสจากขดลวดโรกอฟสกี้ก่อนเกิดดิสชาร์จบางส่วน

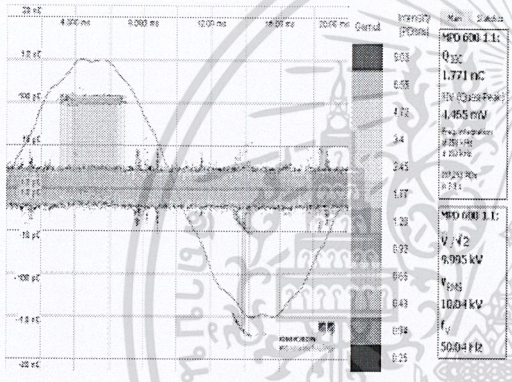
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



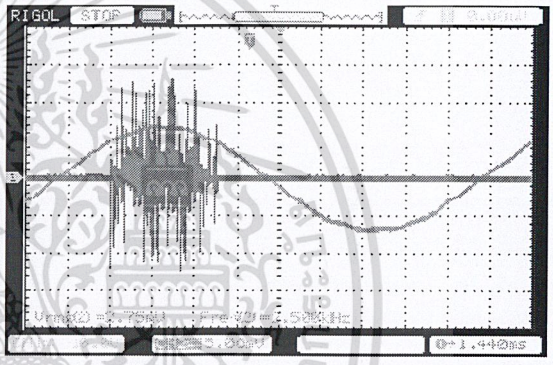
รูปที่ 4.41 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จด้านแรงดันสูง ด้านจาก M Tonix



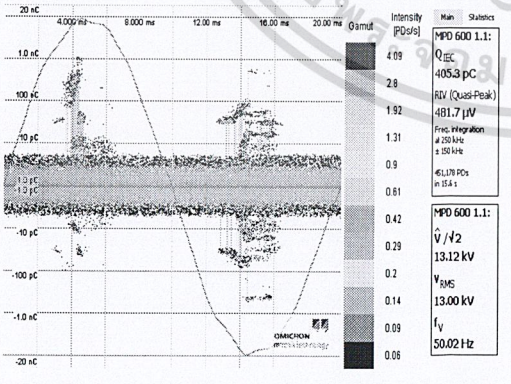
รูปที่ 4.42 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จ แรงดันสูงจาก ขดลวดโรกอฟสกี้



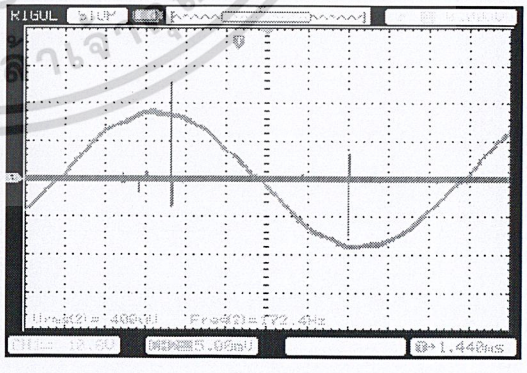
รูปที่ 4.43 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จด้านแรงดันต่ำ ด้านจาก M Tonix



รูปที่ 4.44 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จ แรงดันต่ำจาก ขดลวดโรกอฟสกี้

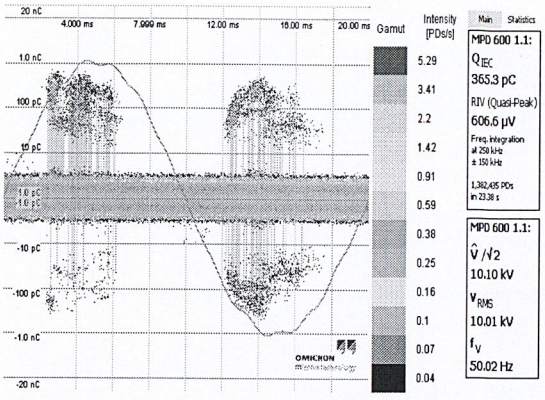


รูปที่ 4.45 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จภายใน จาก M Tonix

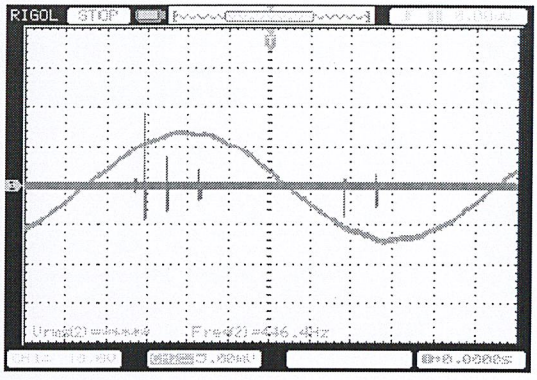


รูปที่ 4.46 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จภายใน จากขดลวดโรกอฟสกี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จตามผิว จากM Tonix



รูปที่ 4.48 การเกิดโคโรนาดิจชาร์จตามผิว จาก ขดลวดโรกอฟสกี้

จากรูปที่ 4.40 - 4.48 แสดงผลการตอบสนองต่อการวัดกระแสดิสชาร์จของขดลวดโรกอฟสกี้ เทียบกับ กระแสดิสชาร์จ ที่ได้จาก M Tonix ซึ่งขดลวดโรกอฟสกี้ ในโครงงานนี้สามารถแสดงผลการวัดกระแสดิจชาร์จบางส่วนได้

จากการดำเนินการทดลองทั้ง 3 ตอนแสดงให้เห็นว่าชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C (Burden 1 VA) สามารถใช้วัดกระแสที่มีช่วงความถี่ 29.76 Hz – 15 kHz พิกัดกระแสใช้งาน 0.125 A – 40.39 A และสามารถใช้วัดกระแสดิสชาร์จบางส่วนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินการทดลอง

โครงงานนี้ได้นำเสนอวิธีออกแบบสร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้ เพื่อใช้วัดกระแส 3 เฟสในระบบไฟฟ้า ที่สามารถนำไปใช้วัดกระแสไฟฟ้าโดยทั่วไป และสามารถนำไปใช้วัดกระแสความถี่สูง เช่น กระแสดิสชาร์จบางส่วนในระบบไฟฟ้าแรงสูง

ในภาคเรียนที่ 1 ทำการศึกษาทฤษฎีและหลักการออกแบบขดลวดโรกอฟสกี้และวงจรอินทริเกรตชนิด self integrate และ RC integrate เพื่อทราบถึงหลักการทำงานของขดลวดโรกอฟสกี้และวงจรอินทริเกรตทั้งสองชนิด จากนั้นได้ทำการออกแบบวงจรอินทริเกรตชนิด self integrate และ RC integrate และออกแบบแกนขดลวดของขดลวดโรกอฟสกี้โดยเลือกชนิดแกนเฟอร์ไรท์และแกนอากาศ จากนั้นทำการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice สามารถวิเคราะห์การทำงานของขดลวดโรกอฟสกี้พบว่า วงจรอินทริเกรตชนิด self integrate ให้ผลตอบสนองรูปคลื่นได้ดีกว่า RC Integrator โดยรูปคลื่นที่วัดได้ใกล้เคียงกับรูปคลื่นอ้างอิง และแกนชนิดเฟอไรต์ให้ค่าGain สูง ความถี่จำกัดขีดล่างต่ำ ทำให้ช่วงความถี่ในการใช้งานกว้างกว่าแกนอากาศ ดังนั้นจึงนำผลที่ได้มาพิจารณาเลือกแกนชนิดเฟอร์ไรท์และวงจรอินทริเกรตชนิด self integrate ที่ให้ช่วงในการใช้งานกว้าง สามารถวัดกระแสความถี่สูงได้ จากนั้นทำการประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกี้ต้นแบบ

ในภาคเรียนที่ 2 ทำการทดสอบขดลวดโรกอฟสกี้ต้นแบบ โดยเปรียบเทียบกับ Current probe ซึ่งสามารถวัดกระแสได้ขนาดที่ใกล้เคียงกันแต่มีอัตราขยายต่ำเกินไป จากนั้นจึงทำการประกอบสร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C โดยทำการเพิ่มขนาดแกนขดลวดให้ใหญ่ขึ้น ซึ่งมีอัตราขยายเพิ่มขึ้น สามารถใช้วัดกระแสได้ 3 เฟส แล้ได้ดำเนินการทดลองวัดกระแส Linear , Non- Linear load เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดและช่วงกระแสและความถี่ใช้งานของขดลวดโรกอฟสกี้ A,B.C โดยอ้างอิงจากหม้อแปลงกระแสโดยใช้โปรแกรม Lab view และ Current probe สามารถนำไปใช้วัดกระแสที่มี ช่วงกระแสใช้งาน 0.125-40.39 A ความถี่ 29.76-15 KHz มีค่าความผิดพลาด 2.78 % มีมุมต่างเฟสของโรกอฟสกี้ A,B,C เป็นมุม 7.2° ทั้งสามเฟส และชุดขดลวดโรกอฟสกี้ที่สร้างขึ้นมีผลตอบสนองต่อกระแสดิสชาร์จบางส่วนได้ โดยการรูปคลื่นกระแสดิสชาร์จที่ได้จากชุดชดลวดโรกอฟสกี้มีความเหมือนกับรูปคลื่นกระแสดิสชาร์จที่ได้จาก M-Tonix

จากการสร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A,B,C ที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานในช่วงกระแสและความถี่เป็นที่น่าพอใจ สามารถนำไปวัดกระแสความถี่สูง 3 เฟสได้ เช่น กระแสดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ของโครงงานที่ต้องการสร้างชุดเครื่องมือวัดกระแส 3 เฟส มีช่วงการใช้งานกว้าง ราคาถูกมีขนาดเล็ก และสามารถนำประยุกต์ใช้วัดกระแสในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 อุปสรรค์และวิธีการแก้ไข

อุปสรรค์ที่พบในการดำเนินโครงการและวิธีการแก้ปัญหาต่างๆ มีดังนี้

1. แกนของขดลวดโรกอฟสกี้ที่ใช้ในการออกแบบมีค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก (μ) ต่างกัน ต้องทำการออกแบบขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ให้มีผลการตอบสนองใกล้เคียงกันมากที่สุด จึงทำให้การทำงานของชุดขดลวดโรกอฟสกี้ เพื่อวัดกระแส 3 เฟส มีประสิทธิภาพลดลงจากที่ออกแบบไว้

2. การประกอบสร้างวงจรอินทริเกรต ค่าตัวต้านทานที่ออกแบบได้ไม่สามารถหาซื้อได้ จึงจำเป็นต้องเพิ่มค่าความต้านทานที่ออกแบบไว้ ทำให้เกิดความผิดในการวัดกระแส

3. ในการประกอบสร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้ต้องการช่วงความถี่ในการทำงานกว้าง ในการออกแบบจึงจำเป็นต้องใช้ลวดทองแดงที่มีขนาดเล็กทำให้เป็นอุปสรรค์ในการพันที่ต้องใช้ความระมัดระวังในการพัน ไม่ให้แกนเฟอร์ไรท์สัมผัสกับขดลวดทองแดงโดยต้องพันแกนเฟอร์ไรท์ด้วยผ้าพันแกนและเมื่อพันขวดทองแดงเสร็จต้องพันผ้าอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันไม่ให้ขดลวดทองแดงขาดหรือเคลื่อนจากตำแหน่งที่พัน ซึ่งจะทำให้การวัดผิดพลาดได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการทำโครงงาน คือ ในส่วนการออกแบบควรสำรวจขนาดแกนเฟอร์ไรท์ที่มีขายก่อนทำการออกแบบ และควรทดสอบหาค่าคุณสมบัติความซึมซาบสนามแม่เหล็ก (μ) ซึ่งสามารถทำได้โดยการวัดค่าความเหนี่ยวนำ (L) แล้วคำนวณกลับเพื่อหาค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก (μ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] เกรียงศักดิ์ มหามาตย์ และ คณะ, "การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขดลวดโรกอฟสกี้เพื่อวัดกระแสดิสชาร์จบางส่วน," **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.

[2] John, D. Ramboz. 1996. Machinable Rogowski Coil Design and Calibration. IEEE Transaction on instrumentation and measurement (45): 511-515

[3] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, พิมพ์ครั้งที่1, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547

[4] W.F.Ray and C.R. Hewson. 1993. **Wide bandwidth Rogowski Current Transducers**. Engineering Power Electronic Journal (2): 116-122.

[5] Termen, F.E. 1943. **Raido Engineering Handbook**. Mc Graw-Hill Publishing Company Ltd.

[6] W.F.Ray and C.R. Hewson. **High Performance Rogowski Current Transducers**. Engineering Power Electronic Journal ,2000 .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดขดลวดโรกอฟสกี้เพื่อวัดกระแส 3 เฟส

Rogowski Coil for measuring 3-phases current in power system

ทัชริณ จันทน์วัฒนวงษ์ นภัสวรรณ อนุรักษ์สินทวี นฤมล ประชา และนัฐพงศ์ ตั้งปัญญาโชติ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร/โทรสาร. 0-2739-2478

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้เพื่อวัดกระแส 3 เฟส ในวงจรไฟฟ้ากำลัง ซึ่งวงจรการวัดโดยขดลวดโรกอฟสกี้จะต่อแยกออกจากวงจรทดสอบทำให้สามารถลดความเสี่ยงในการต่อเครื่องมือวัดกับวงจรทดสอบโดยตรง และรูปแบบสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกี้นั้น สามารถใช้ออสซิลโลสโคปเป็นตัวแสดงผล ในงานวิจัยได้เสนอหลักการออกแบบและการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของขดลวดโรกอฟสกี้ แบบ ตัวต้านทาน และเมื่อจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice พบว่าขดลวดโรกอฟสกี้แบบวงจร อินทิเกรทตัวต้านทานที่ออกแบบ มีการตอบสนองย่านความถี่และความถูกต้องของย่านการวัดอยู่ในระดับที่น่าพอใจ อุปกรณ์ที่ออกแบบมีพิกัดกระแส 40.39 A อัตราขยาย 0.02 (250/5) สามารถวัดกระแสที่มีขนาด 0.125 A ความถี่ 29.76 Hz ขึ้นไป จากผลการทดลองวัดขนาดและรูปคลื่นกระแส Linear load , Non-Linear load ,แหล่งจ่ายความถี่สูง เปรียบเทียบกับ current probe และ หม้อแปลงกระแสได้ค่าความผิดพลาดของการวัดกระแส ± 2.83 % ค่าความถี่ในช่วงการวัดกระแส อยู่ประมาณ 29.76-15 kHz และสามารถตรวจจับกระแสดิสชาร์จบางส่วนได้ ซึ่งผลงานวิจัยอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานตรวจวัดกระแสในระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป

คำสำคัญ: ขดลวดโรกอฟสกี้, อินทิเกรเตอร์ตัวตานทาน, การดิสชาร์จบางส่วน

Abstract

This research project presents the design and create Rogowski Coil to measure currents in three-phase for electrical power system that it is separated from the test circuit can reduce the risk of the instrumentation and test circuit directly and signals from measurements. In addition, the signal from measurement can be displayed on Oscilloscope to ease of use. This research has proposed design principles and parameters. Simulation by Pspice program showed that the frequency response and accuracy of the measurement is satisfactory. The Rogowski Coil has rated current 40.39 A gain 0.02 (250 / 5) able to measure minimum current 0.125 A. Results from the experiment showed that amplitude and waveforms compared with the current probe and current transformer has an error of ± 3% measurement and frequency range is around 29.76 Hz-15 kHz. And Able to detect the partial discharge. This research is satisfactory and can be applied using current measurements in power systems.

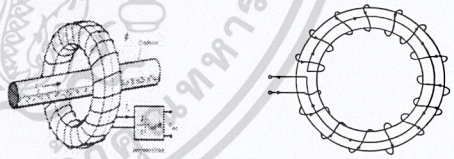
Key word: Rogowski coil, Self Integrator, partial discharge

1. บทนำ

การวัดกระแสในห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงด้วยเครื่องมือวัดกระแสแบบดั้งเดิม มีการติดตั้งแบบถาวรยากต่อการเคลื่อนย้าย และต่อเครื่องมือวัดอนุกรมเข้ากับระบบวงจรทดสอบโดยผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อก่อนเข้าเครื่องมือวัด เพื่อลดระดับแรงดันลงให้สามารถเชื่อมต่อกับเครื่องมือวัดได้ ซึ่งไม่สะดวกในการใช้งาน มีขนาดใหญ่ตามพิกัดกระแส ส่งผลให้เครื่องมือวัดมีราคาสูง และมีช่วงความถี่ในการวัดแคบ เพื่อช่วยลดข้อจำกัดของเครื่องมือวัดดังที่กล่าวมาแล้ว โครงงานนี้จึงนำเสนอการออกแบบสร้างเครื่องมือวัดโดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้แบบวงจรอินทิเกรทตัวตานทาน 3 เฟส อัตราขยาย 250/5 ที่มีย่านการวัด 0.125-40.39 A สามารถวัดกระแสอยู่ในช่วงความถี่ 29.76-15 kHz ได้ มีขนาดเล็ก,ราคาถูก ไม่เชื่อมต่อกับวงจรทดสอบโดยตรงและการพันขดลวดแบบโรกอฟสกี้จะสามารถช่วยลดผลกระทบจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่เข้ามารบกวนการวัด ซึ่งทำให้ผลการวัดผิดพลาดได้[2]

2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง[1]

ขดลวดโรกอฟสกี้เป็นอุปกรณ์วัดกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลาอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กคล้องผ่านขดลวดที่พันบนแกน ผลจากสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้เกิดแรงดันที่ปลายของขดลวด เมื่อนำแรงดันดังกล่าวไปผ่านตัวอินทิเกรทที่เหมาะสมก็จะได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัดอย่างถูกต้อง ดังรูปที่ 1 (ก)



(ก) (ข)

รูปที่ 1 (ก) หลักการวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกี้
(ข) การพันขดลวดโรกอฟสกี้

จากรูปที่ 1 (ข) แสดงลักษณะการพันขดลวดโรกอฟสกี้ย้อนกลับเข้าไปในแกนขดลวด เพื่อลดผลของแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกให้หักล้างกัน [2]

จากความสัมพันธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องผ่านขดลวดทั้งหมด

$$\varphi = \int d\varphi = \mu_0 \cdot n \cdot A \cdot \int H \cdot \cos\alpha dl \qquad (1)$$

และจากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force) ที่เกิดขึ้นที่ปลายของขดลวดดังสมการที่ 2

$$V_C = \frac{d\varphi}{dt} = \mu_O.\mu_r.n.A.\frac{di_p}{dt} = M\frac{di_p}{dt} \qquad (2)$$

จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวนำมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_p = \oint H \cdot \cos\alpha dl \quad (3)$$

และให้ $$M = \mu_0.\mu_r.n.A \quad (4)$$

จะได้ $$i_p = \frac{1}{M}\int V_c dt \quad (5)$$

จากสมการที่ 5 จะเห็นได้ว่าการวัดกระแสของโรกอฟสกี้คอยล์นั้นต้องทำการอินทิเกรตแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดจึงจะได้เป็นกระแสที่ต้องการวัด

3. การออกแบบขดลวดโรกอฟสกี้ในโครงงาน

ในการออกแบบขดลวดโรกอฟสกี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ตอน คือ

- การออกแบบแกน เพื่อสามารถเลือกชนิดและขนาดแกนของขดลวดโรกอฟสกี้
- การออกแบบวงจรอินทริเกรท เพื่อได้วงจรอินทริเกรทที่เหมาะสมสามารถนำไปวัดกระแสค่าที่ได้ถูกต้อง

3.1 การออกแบบแกน

การเลือกชนิดของแกนจะเลือกตามพิกัดกระแสและความถี่ที่ต้องการวัด โดยแกนที่นิยมใช้ คือ

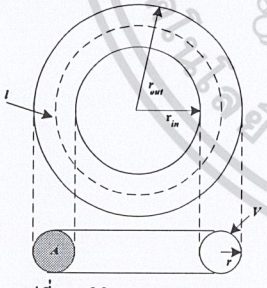
แกนอากาศ เหมาะสำหรับการวัดกระแสที่มีความถี่สูง ขนาดกระแสสูง

แกนเฟอร์ไรท์สำหรับ การวัดกระแสที่มีความถี่ต่ำ ขนาดกระแสต่ำ

ในโครงงานนี้เลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์ เนื่องจากต้องการวัดกระแสที่มีช่วงความถี่ในการทำงานกว้าง และต้องการอัตราขยายสูง จึงเลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์ เมื่อสามารถเลือกแกนชนิดแกนที่เหมาะสมได้แล้ว จึงหาขนาดความยาวแกนเฉลี่ย ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (6)

$$l = 2\pi\left[\frac{(r_{out} - r_{in})}{2} + r_{in}\right] = \text{ความยาวเฉลี่ยแกน} \quad (6)$$

โดยที่ r_{in} = รัศมีวงในแกน , A = พื้นที่หน้าตัดแกน, r_{out} = รัศมีวงนอกแกน, ν = เส้นรอบวงพื้นที่หน้าตัดแกน, r = รัศมีพื้นที่หน้าตัด, y = ความต้านทานขดลวด (Ω/m)

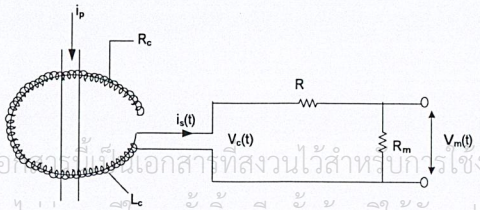


รูปที่ 3 มิติของแกนขดลวด

3.2 การออกแบบวงจรอินทิเกรท

ในโครงงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรอินทริเกรทแบบตัวต้านทาน ซึ่งวงจรอินทริเกรทแบบตัวต้านทานมีหลักการออกแบบดังนี้

วงจรอินทริเกรท แบบตัวต้านทาน คือ วงจรที่ต่อขาออกโรกอฟสกี้คอยล์ด้วยความต้านทานค่าต่ำโดยมีเงื่อนไข คือ $\omega L_c \gg (R + R_c)$ [4] ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรสมมูลย์โรกอฟสกี้คอยล์แบบตัวต้านทาน (Self Integrator) [5]

C	= ตัวเก็บประจุ	$V_c(t)$	= แรงดันเหนี่ยวนำ
R_o	= ความต้านทานเคเบิล	$i_s(t)$	= กระแสเหนี่ยวนำ
R_c	= ความต้านทานขดลวด	$i_p(t)$	= กระแสที่ต้องการวัด
R_m	= ความต้านทานแมทชิ่ง	$V_m(t)$	= แรงดันไฟฟ้าที่วัด
R	= ความต้านทานอินทิเกรท	L_c	= ความเหนี่ยวนำขดลวด

จากรูปที่ 4 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ต้องการวัดกับแรงดันที่วัดได้ คือ

$$V_m(t) = \frac{R}{L_c} M.i_p(t) \quad (7)$$

$$\tau = \frac{L}{(R + R_C)} = \text{ค่าคงที่ทางเวลา} \quad (8)$$

คำนวณหาจำนวนรอบจากความสัมพันธ์

เมื่อ $$L = \frac{r^2 N^2}{(23r + 25l)} \quad [6](9)$$

และ $$R_c = \nu.y.N \quad (10)$$

โดยที่ $$R_c \gg R; R = 0$$

ดังนั้น $$\tau = \frac{\left[\frac{r^2 N^2}{(23r + 25l)}\right]}{\nu.y.N} \quad (11)$$

จะได้จำนวนรอบ

$$N = \frac{\tau.\nu.y(23r + 25l)}{r^2} \quad [7](12)$$

คำนวณจำนวนรอบต่อความยาว และค่าความเหนี่ยวนำร่วมจากสมการ

$$n = \frac{N}{l} \quad (13)$$

$$M = \mu_o \mu_r .n.A \quad (14)$$

คำนวณค่าความต้านทานของอินทิเกรเตอร์จากสมการ

$$R = \frac{V_m.L}{M.i_p} \quad (15)$$

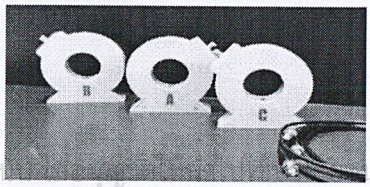
คำนวณค่าความถี่ตอบสนองจากสมการ

$$f = \frac{\left(\frac{R + R_C}{L}\right)}{2\pi} \quad (16)$$

จากการออกแบบแกนและวงจรอินทิเกรทได้ตรงตามความต้องการแล้ว จึงได้ประกอบสร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ดังรูปที่ 5, 6



รูปที่ 5 ขดลวดโรกอฟสกี้และวงจรอินทิเกรท

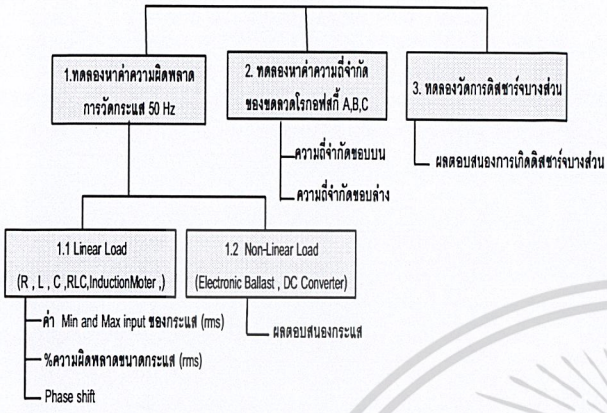


รูปที่ 6 ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลการทดลอง

โครงงานนี้ได้ดำเนินการทดลองวัดกระแสโดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดกระแสอ้างอิง (หม้อแปลงกระแสและ current probe) ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอนดังต่อไปนี้



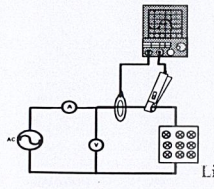
รูปที่ 7 วิธีการดำเนินการทดลอง

ตอนที่ 1 ทดลองวัดกระแสความถี่ 50 Hz เพื่อหาค่าความผิดพลาดจากการวัด

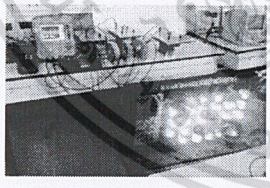
วัตถุประสงค์

เพื่อหากระแสต่ำสุดและกระแสสูงสุด (rms) ที่สามารถใช้ขดลวดโรกอฟสกี้วัดกระแสที่แปรผันตามแรงดัน (Linear load)[] มีค่าที่ถูกต้องและหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดขนาดกระแส(rms)และมุมต่างเฟสของกระแส Linear load (R, L, C, RLC, Induction Motor) โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกี้เทียบกับหม้อแปลงกระแสและ Current Probe

1.1 ทดลองวัดกระแสจาก Linear load ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 8 วงจรวัดกระแส Linear load



รูปที่ 9 ทดลองวัดกระแส Linear load

จากรูปที่ 8 แสดงวงจรการวัดกระแสที่ใช้ในการทดลองเก็บข้อมูลโดยการเปลี่ยนโหลดเป็น R, L, C, RLC, Induction Motor ดังรูปที่ 9 คือการทดลองวัดกระแสโหลด R (หลอดไฟ) การทดลอง 1.1 ได้ตัวอย่างผลการทดลองดังต่อไปนี้

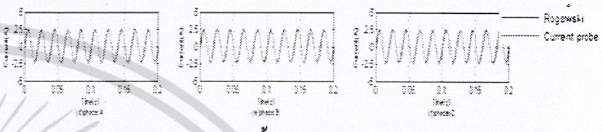
ตารางที่ 1 ผลการทดลองหาค่า Minimum input (rms)

Test No.	I_Probe	I_Rokowski			Error I Probe& I Rokowski		
		Rog A	Rog B	Rog C	Rog A	Rog B	Rog C
	A	A			%		
1	0.047	0.032	0.035	0.037	33.192	26.744	20.930
2	0.072	0.063	0.064	0.065	13.194	11.111	9.722
3	0.095	0.088	0.089	0.091	7.660	6.611	5.037
4	0.125	0.122	0.122	0.122	2.800	2.800	2.800
5	0.159	0.155	0.155	0.155	2.830	2.830	2.830
6	0.189	0.185	0.185	0.185	2.116	2.116	2.116
7	0.220	0.215	0.216	0.216	2.273	1.818	1.818

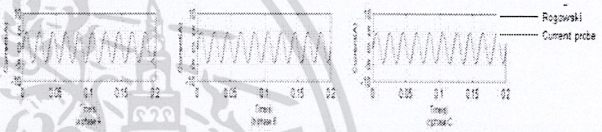
ตารางที่ 2 ผลการทดลองหาค่า Maximum input (rms)

Test No.	I_Probe			I Rokowski			Error I Probe& I Rokowski		
	A	B	C	Rog A	Rog B	Rog C	Rog A	Rog B	Rog C
	A			A			%		
1	5.130	5.200	5.300	5.185	5.205	5.275	-1.072	-0.096	0.471
2	9.970	10.010	10.020	9.895	9.775	9.765	0.752	2.347	2.544
3	15.040	15.130	15.390	14.73	14.750	15.110	2.061	2.511	1.819
4	19.700	20.100	20.300	19.23	19.720	20.005	2.385	1.890	1.453
5	24.700	25.010	25.600	24.2	24.865	25.010	2.024	0.579	2.304
6	30.050	30.340	30.410	29.22	29.600	29.700	2.762	2.439	2.334
7	34.760	34.860	34.910	33.98	34.050	34.175	2.243	2.323	2.105
8	40.350	40.390	40.600	39.4	39.265	39.550	2.354	2.785	2.586
9	45.870	45.900	46.010	44.35	44.100	44.200	3.313	3.921	3.933

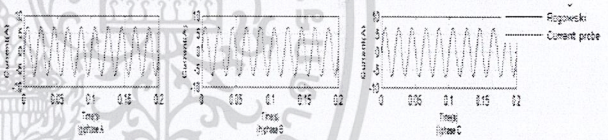
จากผลการทดลองในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นค่ากระแสขนาด 0.125 A คือ Minimum input (rms) และกระแสขนาด 40.39 A คือ Maximum input (rms) ที่ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C สามารถวัดค่าความผิดพลาด (%Error) < ±2.83%



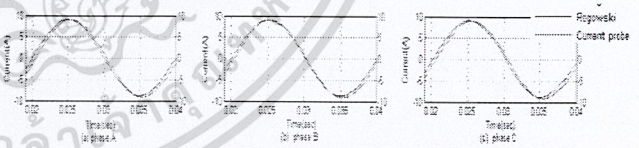
รูปที่ 10 กระแสจากชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เทียบกับ Current probe โหลด R ขนาดกระแสทดสอบ 1.684 A



รูปที่ 11 กระแสจากชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B ,C เทียบกับ Current probe โหลด R ขนาดกระแสทดสอบ 3.26 A

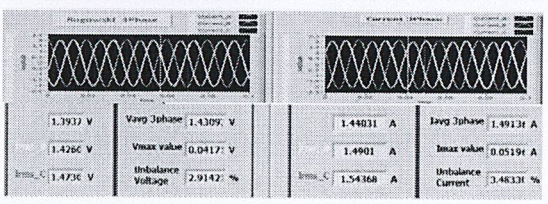


รูปที่ 12 กระแสจากชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B ,C เทียบกับ Current probe โหลด R ขนาดกระแสทดสอบ 4.88 A



รูปที่ 13 (a), (b), (c) phase shift ของขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C กับ current probe

จากรูปที่ 10, 11,12 ,13 แสดงรูปคลื่นกระแสจากชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C เทียบ Current probe พบว่าขนาดกระแส (rms) มีค่าความผิดพลาดจากวัด 2.83% และรูปคลื่นกระแสที่วัดมีค่ามุมต่างเฟส (phase shift) 7.2° ดังแสดงในรูปที่ 13



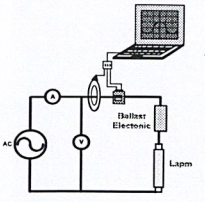
รูปที่ 14 กระแส 3 เฟส ของ Induction motor ที่วัดโดยชุดขดลวดโรกอฟสกี้กับหม้อแปลงกระแสจากโปรแกรม Labview

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
เพื่อการศึกษาทำนุ เมื่อญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

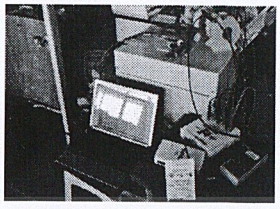
1. 2 ทดลองวัดกระแส Non- Linear load ความถี่ 50 Hz

วัตถุประสงค์

เพื่อหาความผิดพลาดในการวัดรูปคลื่นสัญญาณกระแส Non-linear load (Ballast Electronic, DC Convertor)จากโรกอฟสกี้เทียบกับหม้อแปลงกระแส และ current probe



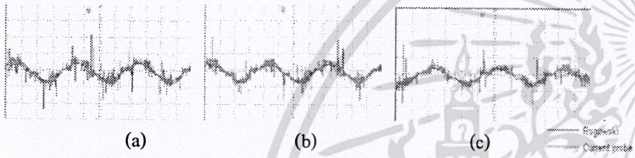
Non linear Load



รูปที่ 15 วงจรวัดกระแส Non-Linear load

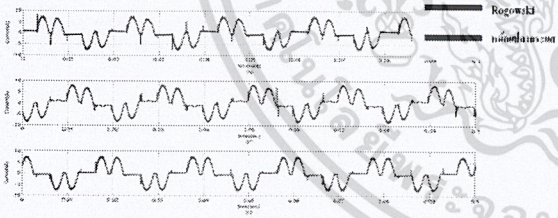
รูปที่ 16 การทดลองวัดกระแส Non Linear load

จากรูปที่ 15,16 แสดงรูปวงจรที่ใช้ทดลองวัดกระแส Non Linear load ในการทดลองที่ 1.2 ซึ่งได้ตัวอย่างผลการทดลองดังต่อไปนี้



รูปที่ 17 a, b, c กระแสจาก Ballast Electronic 0.86 A จากชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B,C กับ current probe

จากรูปที่ 17 แสดงผลตอบสนองต่อการวัดกระแส Non Linear load เมื่อนำชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C ไปวัดกระแสของ Ballast Electronic ได้ผลตอบสนองต่อกระแส Non Linear load ของชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C อยู่ในระดับที่น่าพอใจ



รูปที่ 18 กระแส 3 เฟส ของ DC Convertor ที่วัดโดยชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A,B,C กับหม้อแปลงกระแส

จากรูปที่ 18 แสดงผลตอบสนองรูปคลื่นกระแส เมื่อนำชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A,B,C เทียบกับหม้อแปลงกระแส โดยใช้โปรแกรม Lab Veiw วัดกระแส 3 เฟสของ DC Convertor พบว่าชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C สามารถตอบสนองต่อรูปคลื่นกระแสของโหลดแบบ Non Linear load ใกล้เคียงกับหม้อแปลงกระแส

ตารางที่ 3 ช่วงการทำงานของชุดขดลวดโรกอฟสกี้

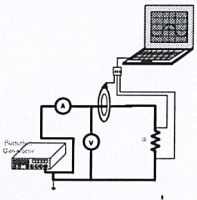
คุณสมบัติ	Rogowski A	Rogowski B	Rogowski C
Min Input (A)	0.125	0.125	0.125
Max Intput (A)	40.39	40.39	40.39
Phase shift error	7.2°	7.2°	7.2°
% Maximum Error (rms)	2.83%	2.83%	2.83%

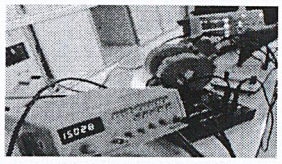
จากตารางที่ 3 เป็นตารางแสดงผลการทดลองตอน 1 ที่ทำการทดลองซึ่งสามารถสรุปได้ดังค่าในตาราง

ตอนที่ 2 ทดลองหาความถี่จำกัดของชุดขดลวดโรกอฟสกี้ 3 เฟส

วัตุประสงค์

เพื่อหาความถี่จำกัดขอบบนและขอบล่าง ของขดลวดโรกอฟสกี้

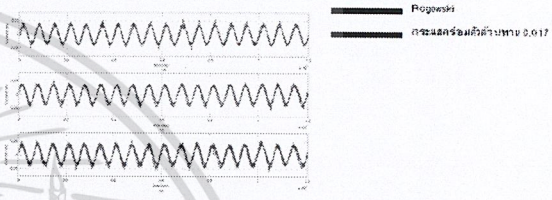




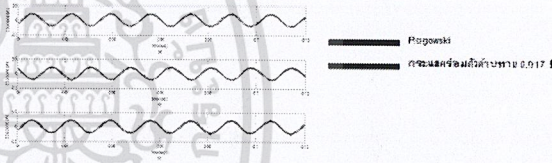
รูปที่ 19 วงจรวัดกระแสเพื่อหาช่วงความถี่

รูปที่ 20 ทดลองวัดกระแสเพื่อหาช่วงความถี่

จากรูปที่ 19, 20 แสดงวงจรที่ใช้ในการวัดกระแสเพื่อหาช่วงความถี่ใช้งานของขดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C และการทดลอง 2 มีตัวอย่างผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 21 (a), (b),(c) รูปกระแสความถี่ 15kHz จาก Function generator วัดโดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B,C เทียบกับ แรงดันคร่อมตัวต้านทาน 0.017 Ω



รูปที่ 22 (a), (b),(c) รูปกระแสความถี่ 29.76Hz จาก Function generator วัดโดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B,C เทียบกับ แรงดันคร่อมตัวต้านทาน 0.017 Ω

จากรูปที่ 21,22 แสดงผลการวัดกระแสที่ความถี่จำกัดขอบบนและขอบล่าง โดยใช้ชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A ,B,C เทียบกับ แรงดันคร่อมตัวต้านทาน 0.017 Ω ซึ่งเป็นค่าความถี่ที่รูปกระแสความคลาดเคลื่อนเกิน 2.83%

ผลการทดลองในตอนที่ 2 สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ช่วงความถี่ในการวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี้ A,B,C

หิกัดความถี่	Rogowski.A	Rogowski.B	Rogowski.C
ความถี่จำกัดขอบล่าง	29.76 Hz	29.76 Hz	29.76 Hz
ความถี่จำกัดขอบบน	15k Hz	15k Hz	15k Hz

ตอนที่ 3. ทดลองวัดกระแสดิสชาร์จบางส่วน

วัตถุประสงค์

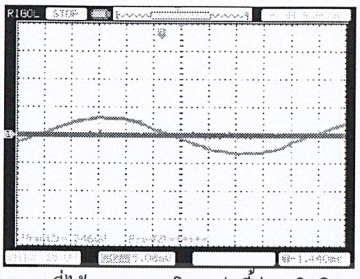
เพื่อสังเกตผลการตอบสนองต่อกระแสความถี่สูง เช่น การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในระบบไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้ชุดขดลวดลวดโรกอฟสกี้ A, B, C



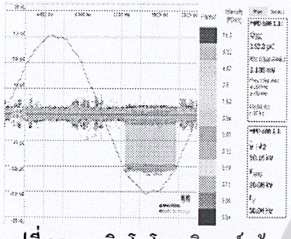
รูปที่ 23 การทดลองวัดกระแสดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

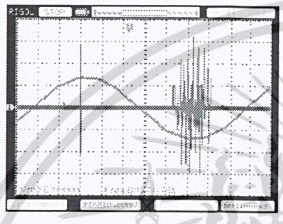
ในการทดลองที่ 3 ได้ทดลองนำชุดขดลวดโรกอฟสกี้ไปตรวจจับกระแสดิสชาร์จบางส่วน 4 แบบ คือ โคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูง , โคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันต่ำ, ดิสชาร์จภายใน, ดิสชาร์จตามผิว ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้



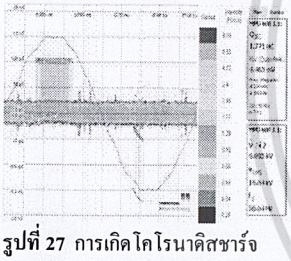
รูปที่ 24 รูปกระแสที่ได้จากขดลวดโรกอฟสกี้ก่อนเกิดดิสชาร์จบางส่วน



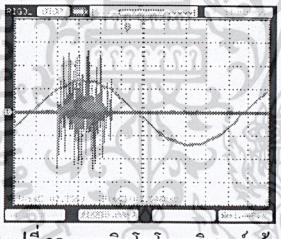
รูปที่ 25 การเกิดโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูงจาก M Tonix



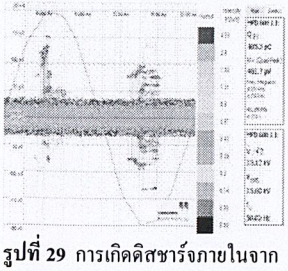
รูปที่ 26 การเกิดโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูงจาก ขดลวดโรกอฟสกี้



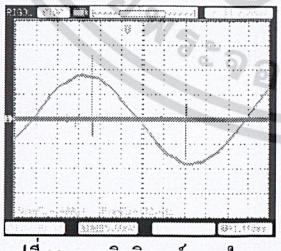
รูปที่ 27 การเกิดโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันต่ำจาก M Tonix



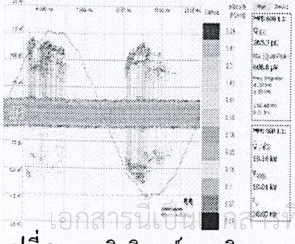
รูปที่ 28 การเกิดโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันต่ำจาก ขดลวดโรกอฟสกี้



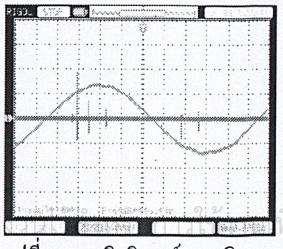
รูปที่ 29 การเกิดดิสชาร์จภายในจาก M Tonix



รูปที่ 30 การเกิดดิสชาร์จภายในจากขดลวดโรกอฟสกี้



รูปที่ 31 การเกิดดิสชาร์จตามผิวจาก M Tonix



รูปที่ 32 การเกิดดิสชาร์จตามผิวจากขดลวดโรกอฟสกี้

จากรูปที่ 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32 แสดงผลการตอบสนองต่อกระแสดิสชาร์จที่มีความใกล้เคียงกันของขดลวดโรกอฟสกี้ เทียบกับ กระแสดิสชาร์จ ที่ได้จาก MTonix ซึ่งสามารถแสดงผลการวัดกระแสดิสชาร์จบางส่วนได้

5. สรุป

โครงงานนี้ได้นำเสนอวิธีออกแบบสร้างขดลวดโรกอฟสกี้ 3 เฟส ได้ดำเนินการทดลองวัดกระแส Linear , Non- Linear load เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดและช่วงกระแสและความถี่ใช้งานของขดลวดโรกอฟสกี้ A,B.C โดยอ้างอิงจาก หม้อแปลงกระแสโดยใช้โปรแกรม Lab view และ Current probe สามารถนำไปใช้วัดกระแสที่มี ช่วงกระแสใช้งาน 0.125-40.39 A ความถี่ 29.76-15 KHz มีค่าความผิดพลาด 2.78 % มีมุมต่างเฟสของโรกอฟสกี้ A,B,C เป็นมุม 7.2° ทั้งสามเฟส และชุดขดลวดโรกอฟสกี้ที่สร้างขึ้นมีผลตอบสนองต่อกระแสดิสชาร์จบางส่วนได้

จากการสร้างชุดขดลวดโรกอฟสกี้ A,B,C ที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานในช่วงกระแสและความถี่เป็นที่น่าพอใจ สามารถนำไปวัดกระแสความถี่สูง 3 เฟสได้ เช่น กระแสดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ของโครงงานที่ต้องการสร้างชุดเครื่องมือวัดกระแส 3 เฟส มีช่วงการใช้งานกว้าง ราคาถูกมีขนาดเล็ก และสามารถนำประยุกต์ใช้วัดกระแสความถี่สูงในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.เชาว์ ชมพูอินไหว ที่ให้ข้อเสนอแนะด้วยดีตลอดมาและขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความร่วมมือในการเก็บข้อมูลการทดลอง จึงทำให้โครงงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จลงได้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] เกรียงศักดิ์ มหามาตย์ และ คณะ, "การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขดลวดโรกอฟสกี้เพื่อวัดกระแสดิสชาร์จบางส่วน," **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.

[2] John, D. Ramboz. 1996. Machinable Rogowski Coil Design and Calibration. IEEE Transaction on instrumentation and measurement (45): 511-515

[3] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, พิมพ์ครั้งที่1, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547

[4] W.F.Ray and C.R. Hewson. 1993. **Wide bandwidth Rogowski Current Transducers**. Engineering Power Electronic Journal (2): 116-122.

[5] นรเศรษฐ พัฒนเดช และคณะ, "อุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ชนิดขดลวดโรกอฟสกี้," **โครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะประจำปี 2550**, หน้า 14-19

[6] Termen, F.E. 1943. **Raido Engineering Handbook**. Mc Graw-Hill Publishing Company Ltd.

[7] W.F.Ray and C.R. Hewson. **High Performance Rogowski Current Transducers**. Engineering Power Electronic Journal ,2000 .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

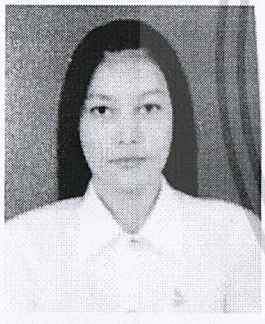
ประวัติผู้เขียน



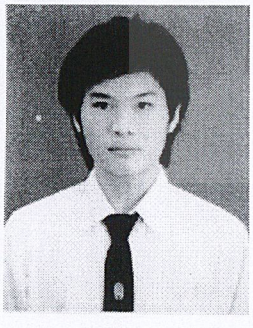
นางสาวทัชริณ จันทน์วัฒนวงษ์ (เม)
เกิดวันที่ 28 สิงหาคม 2531
ที่อยู่ 47/1 หมู่ที่ 5 ต.ศรีสุทโธ อ.บ้านดุง จ.อุดรธานี 41190
จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนบ้านดุงวิทยา อุดรธานี
จบชั้นมัธยมตอนปลาย จากโรงเรียนบ้านดุงวิทยา อุดรธานี
Email: thatcharin_mt@hotmail.com tel. 0847424566



นางสาวนภัสวรรณ อนุรักษ์สินทวี (เดียร์)
เกิดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2532
ที่อยู่ 80/1 ซอยโชคชัยร่วมมิตร แขวงดินแดง เขตดินแดง กทม. 10310
จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนหอวัง กรุงเทพ
จบชั้นมัธยมตอนปลาย จากโรงเรียนหอวัง กรุงเทพ
Email: fick13_@hotmail.com tel. 0817771091



นางสาวนฤมล ประชา (ทราย)
เกิดวันที่ 12 ธันวาคม 2531
ที่อยู่ 391/3 ต.วังก์พง อ.ปราณบุรี จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77120
จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนรักษ์วิทยา ประจวบฯ
จบชั้นมัธยมตอนปลาย จากโรงเรียนเบญจมเทพอุทิศ เพชรบุรี
Email: stopword_06@hotmail.com tel. 0840789908



นายนัฐพงศ์ ตั้งปัญญาโชติ (ไอซ์)
เกิดวันที่ 16 กันยายน 2531
ที่อยู่ 190/5 ต.ป่าคา อ.ท่าวังผา จ.น่าน 55140
จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนท่าวังผาพิทยาคม จ.น่าน
จบชั้นมัธยมตอนปลาย จากโรงเรียนท่าวังผาพิทยาคม จ.น่าน
Email: up-2-u_relax@hotmail.com tel. 0802527036

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้