

โพรบวัดกระแสไฟฟ้าสลับแบบขดลวดโรโกสกีขนาด 1 kA

High Current Measurement Method by Means of Rogowski Coil Maximum 1kA

ธนรัตน์ ตันมณี¹ ประเสริฐ ตลรวี วุ่นแมสอต² ธนิต มาละวรรณโณ³ พันธวิศ กมลพันธ์⁴

¹อาจารย์ ^{2,3,4}นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ 10800

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการวัดกระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณไม่มากจะใช้วิธีการวัดผ่านเครื่องมือวัดกระแส โดยตรง แต่การวัดกระแสในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีปริมาณกระแสจำนวนมากจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงเครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า เพื่อลดอัตราส่วนของกระแสลงให้สอดคล้องกับ ย่านวัดของเครื่องมือวัด ซึ่งมีน้ำหนักมากและมีราคาสูง ดังนั้นโครงการโพรบวัดกระแสไฟฟ้าสลับแบบขดลวดโรโกสกีขนาด 1 kA ขึ้นนี้สร้างขึ้นมาเพื่อลดค่าใช้จ่าย อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้งานได้สะดวกและมีความแม่นยำ ซึ่งเป็นการนำโพรบวัดกระแสนี้ไปคล้องกับสายส่งตัวนำกระแสสูงเพื่อตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ไหลผ่านสายตัวนำ และเมื่อนำกระแสที่วัดได้เข้าไปผ่านวงจรอินทิเกรเตอร์ ซึ่งใช้ชุดกล่องขยายสัญญาณ ที่จัดทำขึ้น ปรับค่าชดเชยเพื่อให้สอดคล้องกับกระแสอินพุทที่ต้องการวัดโดยกำหนดค่าแรงดันด้านเอาต์พุทของโพรบนี้ไว้เท่ากับ 1 mV/A ผลที่ได้คือ โพรบวัดกระแสนี้สามารถวัดกระแสไฟฟ้าแรงสูงขนาด 1 kA และชุดกล่องขยายสัญญาณ สามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ให้มีความสัมพันธ์ สอดคล้องกับค่าที่วัดได้ และสามารถใช้งานได้จริงประหยัดค่าใช้จ่าย และมีความสะดวกกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้หม้อแปลงเครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า

Abstract

Nowadays, electrical current measurements can be categorized into two methods; direct and indirect measurements. The small amount of electrical current can be directly measured by means of electrical current instrument whereas the current of high voltage cannot directly be measured by means of any physical contact of an instrument, on the other hand, it can be indirectly be measured through voltage transformer by stepping down voltage method in which cannot be realized economically and practically. This paper presents a method of measuring high voltage current by means of Rogowski coil detecting induced electromagnetic wave, compensating unwanted induced current and finally amplifying. The results are that the reduction of measurement time and cost of purchasing the instrument.

คำสำคัญ : ขดลวดโรโกสกี

Keywords : Rogowski Coil

*ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ tanit91@hotmail.com โทร. 081-948-1208

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันการวัดกระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณไม่มากจะใช้วิธีการวัดผ่านเครื่องมือวัดกระแส (Ammeter) โดยตรง แต่การวัดกระแสในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีปริมาณกระแสจำนวนมากจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงเครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า (Current Transformer) เพื่อลดอัตราส่วน (Ratio) ของกระแสลงให้สอดคล้องกับ Range ของเครื่องมือวัด โดยทั่วไปหม้อแปลงกระแส (Current Transformer) ขดลวดจะพันอยู่บนแกนของวัสดุแข็งที่เป็นแกนเหล็ก, แกนเฟอร์ไรต์ (Magnetic Material) จะมีน้ำหนักมากและมีราคาสูง ดังนั้นโครงการนี้จึงขอเสนอโพรบวัดกระแสสลับแบบใหม่ซึ่งตัดโค้งได้ขนาด 1 kA โดยใช้หลักการหม้อแปลงกระแสแบบแกนอากาศ (Rogowski Coil) โดยมีขดลวดพันบนแกนรูปทอรอยด์ (Toroid) เพื่อคล้องกับสายตัวนำที่ต้องการจะวัด โดยค่าเอาต์พุตของขดลวดนี้จะออกมาในรูปของแรงดัน emf ที่แปรผันตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่วัด และเมื่อนำแรงดันที่วัดได้เข้าไปผ่านวงจรอินทิเกรเตอร์ ซึ่งใช้ Operation Amplifier (Op-Amp) ปรับค่าชดเชยเพื่อให้สอดคล้องกับกระแสอินพุตที่ต้องการวัด โดยกำหนดค่าแรงดันด้านเอาต์พุตของโพรบนี้ไว้เท่ากับ 1 mV/A และค่าความแม่นยำ (Accuracy) คาดว่าไม่เกิน $\pm 5\%$

1.2 ทฤษฎีเกี่ยวข้อง

ก่อนที่จะทำการออกแบบและจัดทำโพรบวัดกระแสแบบตัดโค้งและชุดกล่องขยายสัญญาณ Operation Amplifier ได้นั้น จะต้องทราบถึงหลักการทำงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สูตรสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และทฤษฎีของวงจรต่างๆที่ใช้ในการขยายสัญญาณ

2. วิธีการทดลอง

2.1 ทฤษฎีโรโกสกีคอยล์

สำหรับหลักการของโพรบวัดกระแสสลับแบบตัดโค้งได้นั้น ใช้หลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้างดโครงสร้างของคอยล์โรโกสกีคอยล์ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของขดลวดโรโกสกี

2.1.1 สูตรการหาค่าสมการต่างๆในหลักการทำงานของสนามแม่เหล็ก

ซึ่งค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity) สามารถคำนวณได้จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) คือ

$$H = \frac{N_1 \cdot i}{l} \tag{2.1}$$

และ
$$B = \mu H \tag{2.2}$$

จะได้ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) ภายในแกนทอรอยด์ และพื้นที่หน้าตัด A ที่เกิดจากกระแส i หาได้จากสมการข้างล่างนี้

$$B = \mu \frac{N_1 \cdot i}{l} \tag{2.3}$$

วารสารวิชาการและวิจัย มทรพระนคร ฉบับพิเศษ.

และจากกฎของฟาราเดย์ ขนาดแรงดัน emf ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time Varying) ตัดผ่านตัวนำจำนวน n รอบ คือ

$$\mathcal{G} = n \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

โดยที่ (2.5)

$$\Phi = \int_s B dS \quad \mathcal{G} = n \int_s \frac{\partial B}{\partial t} dS \quad \text{จะได้ค่า} \quad (2.6)$$

เพราะฉะนั้นเมื่อ B ตัดผ่านตัวนำในขดลวดชุดที่ 2 จำนวน N_2 รอบ จะทำให้เกิดแรงดัน emf ที่ปลายขดลวดชุดที่ 2 ด้วยค่า V เท่ากับ

$$V = N_2 \int_s \frac{\partial B}{\partial t} dS \quad (2.7)$$

$$V = N_2 A \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.8)$$

แทนค่าสมการที่ (2.3) ในสมการที่ (2.8) จะได้

$$(2.9) \quad V = \frac{\mu N_1 N_2 A}{l} \frac{di}{dt}$$

หากให้ $N_1 = 1$ รอบ (กรณีไปคล้องสายตัวนำของวงจรถัด) และ $\frac{N_2}{l} = N$ ดังนั้น

$$V = \mu N A \frac{di}{dt} \quad (2.10)$$

$$= M \frac{di}{dt}$$

โดยค่า $\mu N A = M$ เป็นค่าคงที่และขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโพรบ เมื่อ

- H = ความเข้มสนามแม่เหล็กภายในแกนทอรอยด์ (A/m)
- B = ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กภายในแกนทอรอยด์ (T)
- m = ความซึมซาบได้ (Permeability) ของวัสดุที่เป็นแกนทอรอยด์ (H/m)
- N_1 = จำนวนรอบขดลวดชุด 1
- N_2 = จำนวนรอบขดลวดชุด 2
- i = กระแสที่ต้องการวัด
- V = แรงดันที่ emf ทางด้านเอาต์พุตของวงจรถัด (V)
- l = ค่าของความยาวประสิทธิผล (Effective Length) ของแกนทอรอยด์ (m)
- N = จำนวนรอบของขดลวดชุด 2 รอบต่อเมตร
- A = พื้นที่หน้าตัด (m^2)
- M = ค่า Mutual Inductance (H)

จากสมการที่ (2.11) จะสามารถวัดค่า i ได้โดยการอินทิเกรตแรงดัน v นั่นคือ

$$(2.11) \quad i = \frac{1}{M} \int V dt$$

ซึ่งการวัดกระแสด้วยวิธีการแบบนี้จะมีชื่อเรียกว่า แบบ โรโกสก็คอยล์ จากสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.11) จะเห็นได้ว่าถ้าหากแกนทอรอยด์ไม่เป็นวัสดุแม่เหล็ก (*Non Magnetic*) นั่นคือ ค่า m จะคงที่และทำให้คอยล์ดังกล่าวนี้ไม่เกิดการ (*Non Saturate*) ดังนั้นเมื่อนำไปใช้งานจะได้ค่าเป็นเชิงเส้นสูงมากทำให้ สามารถวัดกระแสได้สูงมากขึ้นนอกจากนี้ยังไม่มีข้อจำกัดในเรื่องแกนทอรอยด์ด้วยว่าต้องเป็นแบบแกนแข็งเท่านั้นเพราะสามารถใช้แกนแบบตัดโค้งได้ สำหรับการอินทิเกรตค่าแรงดันที่วัดได้จากคอยล์นั้น สามารถใช้วงจรออปแอมป์ อินทิเกรเตอร์จึงทำให้กำหนดอัตราขยายได้ตามต้องการ

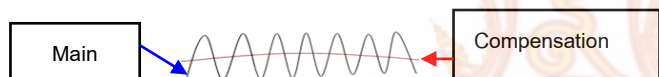
นอกจากนี้การพัน *Coil* นั้นจำเป็นต้องมีการพันชดเชยเพื่อลดผลกระทบต่อสนามแม่เหล็กข้างเคียงซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบหลักคือ

1. *Counter Wound compensation* คือลักษณะที่มีการพัน *Compensation coil* สวนทางกับ *main Coil* ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การพันแบบ Counter Compensation

1. *Single Compensation* คือลักษณะที่มีการพัน *Compensation coil* ในแกนกลางของ *main Coil* ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การพันแบบ Single Compensation

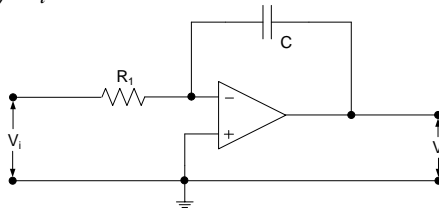
2.2 ทฤษฎีออปแอมป์

ออปแอมป์ (*Operation Amplifier, Op-Amp*) หรือวงจรขยายเชิงดำเนินการ เป็นอุปกรณ์วงจรรวมหรือไอซีประเภทเชิงเส้น (*Linear Integrated Circuit*) ซึ่งมีการนำไปใช้ในงานประยุกต์ต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง ทั้งนี้ก็เนื่องจากเป็นวงจรขยายผลต่าง (*Differential Amplifier*) ที่มีอัตราขยายที่สูงมาก และการออกแบบและวิเคราะห์วงจรที่ใช้ออปแอมป์ก็สามารถทำได้ง่าย งานประยุกต์ที่ใช้ออปแอมป์จะพบได้ในวงจรเครื่องวัด, วงจรแสดงผล และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมกระบวนการ, วงจรปรับสัญญาณ, วงจรสื่อสาร, ระบบเตือนภัย, วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทางการแพทย์, ด้านวิทยาศาสตร์ และในระบบคอมพิวเตอร์ เป็นต้นจะเห็นได้ว่าออปแอมป์ได้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ดังนั้นจึงอาจเรียกออปแอมป์ได้ว่า เป็นวงจรขยายเชิงเส้นอเนกประสงค์ ซึ่งโครงงานนี้จะใช้วงจร *Op-Amp Integrator circuit* คือวงจรใช้ ไอ.ซี. ออปแอมป์ สร้างเป็นวงจร *Integrator* สัญญาณแรงดันอินพุตที่เข้ามาแสดงดังรูปที่ 4 โดยมี R_1 เป็น Element Input และมี C เป็น Feed Back Element สมการของแรงดันขาออกจะเป็นไปตามสมการของการ *Integrator* สัญญาณแรงดันขาเข้า ดังนั้นจึงอาจเรียกออปแอมป์ได้ว่า เป็นวงจรขยายเชิงเส้นอเนกประสงค์ซึ่งในโครงงานนี้ได้นำ 2 วงจรมาใช้งานคือ

2.2.1 วงจร Integrator

Op-Amp Integrator Circuit คือวงจรใช้ ไอ.ซี. ออปแอมป์ สร้างเป็นวงจร *Integrator* สัญญาณแรงดันอินพุตที่เข้ามาแสดงดังรูปที่ 4 โดยมี R_1 เป็น Element Input และมี C เป็น Feed Back Element วงจรจะต่อกลับกันกับวงจร *Differentiator* สมการของแรงดันขาออกจะเป็นไปตามสมการของการ *Integrator* สัญญาณแรงดันขาเข้า

$$V_0 = -(1/R_1C) \int V_i dt$$

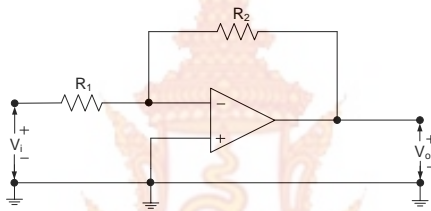


รูปที่ 4 วงจรอินทิเกรเตอร์

2.2.2 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

วงจรขยายแบบกลับเฟส จะมีการต่อ R_1 และ R_2 ดังรูป 2-5 เพิ่มเข้ามาด้วย โดย R_2 จะต่อแบบมีการป้อนกลับทางลบ (Negative Feedback) โดยการนำเอาที่พุดที่ได้ต่อเข้ากับตัวต้านทาน R_2 แล้วนำไปเข้าที่ขาอินพุตทางลบ (จึงเรียกว่าการป้อนกลับทางลบ) ซึ่งวงจรขยายแบบกลับเฟส จะมีอัตราขยายเท่ากับ

$$A_V = \frac{V_0}{V_{SIG}} = -\frac{R_2}{R_1}$$



รูปที่ 5 วงจรขยายแบบกลับเฟส

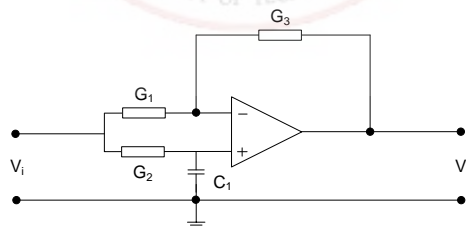
2.2.3 Constant - Amplitude Phase Shifter

Closed - loop Gain ของวงจรนี้จะมีค่าเท่ากับ 1 และเป็นอิสระต่อความถี่ และ Phase Shift โดยสามารถปรับ Phase Shift ได้ที่ G_2 ซึ่งสามารถปรับได้ในช่วง $0-180^\circ$

$$A_{CL} = \frac{V_0}{V_1}$$

$$= 1.0 \left| -2 \tan^{-1}(\omega C_1 / G_2) \right.$$

$$= 1.0 \left| -2 \tan^{-1}(\omega R_2 C_1) \right.$$

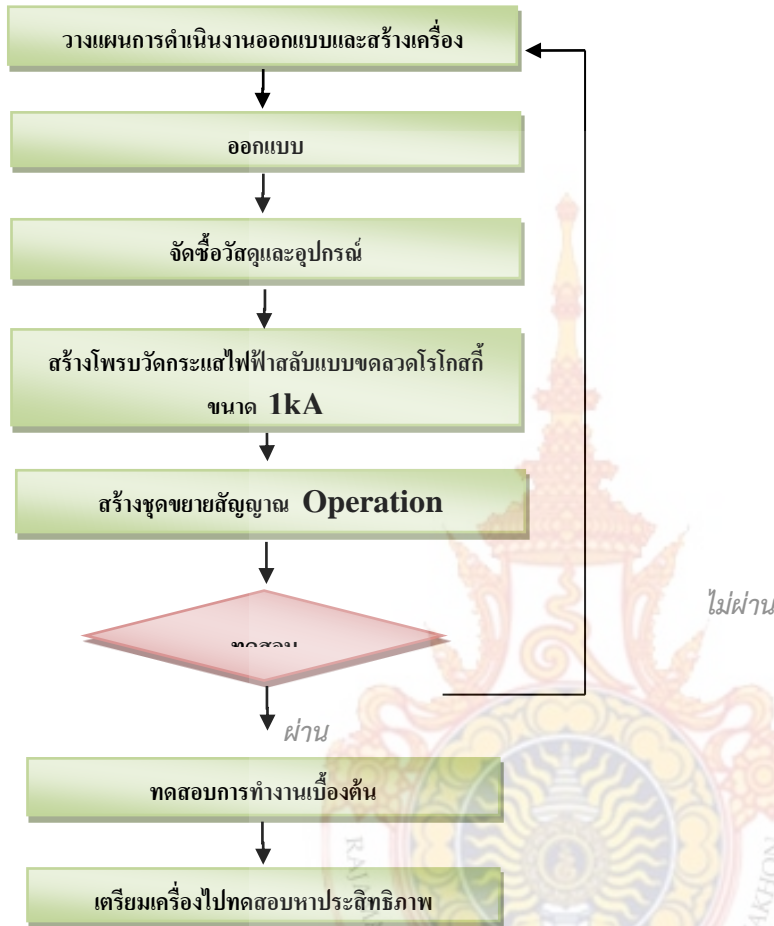


รูปที่ 6 Amplitude Phase Shifter

ขั้นตอนการดำเนินงาน

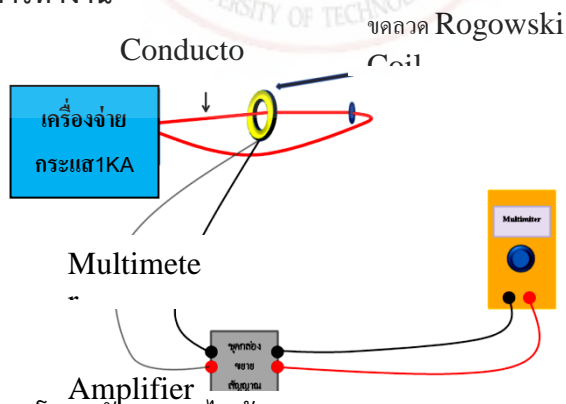
3.1 แผนผังการดำเนินงาน

รูปการสร้างโครงการนี้มีขั้นตอนดำเนินหลัก 7 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน



รูปที่ 2 การทำงานของชุดโพรบวัดกระแสไฟฟ้า แบบ Rogowski Coil

3.3 ขั้นตอนการพันและประกอบขดลวด

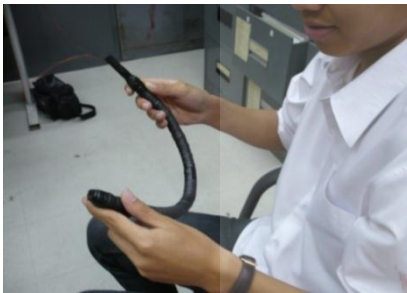
หลังจากที่ได้ทำการศึกษาทฤษฎีต่างๆ ของโพรบวัดกระแสจนได้ความรู้ความเข้าใจเป็นอย่างดีและได้ข้อสรุปว่าหลักการของโพรบวัดกระแส เหมาะแก่การใช้งานในการวัดและวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าสลับได้ จึงได้ทำการออกแบบและทำการพันโพรบวัดกระแส ขึ้นมา โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 การพันและประกอบโพรบวัดกระแส

ทำการเตรียมอุปกรณ์สำหรับทำโพรบวัดกระแสต่อ 1 โพรบ

การพันและประกอบโพรบวัดกระแส

- ทำการตัดท่อทอนความร้อนยาวประมาณ 35 cm
- พันขดลวดลงบนท่อทอนความร้อน ให้แนบกันจำนวน 3000 รอบจากนั้นนำปลายสายสอดกลับเข้าไปในท่อให้ปลายสายออกอีกฝั่ง
- ทำการพันฉนวนทับขดลวดด้วยเทปพันสายเบอร์ 23 จำนวน 2 รอบและพันทับด้วยเบอร์ 33 จำนวน 1 รอบ



รูปที่ 3 โรโกสกีคอยล์ต้นแบบ



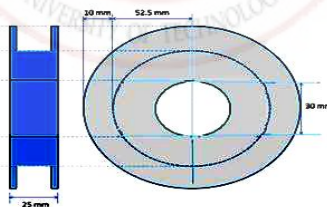
รูปที่ 4 โรโกสกีคอยล์เมื่อพันเสร็จ

3.4 ขั้นตอนการประกอบ Bobbin

เนื่องจากการติดตั้งโพรบวัดกระแส ที่จะสามารถวัดกระแสได้โดยมีความแม่นยำสูงนั้นจำเป็นต้องให้อยู่ในลักษณะที่สมมาตร การติดตั้งนั้นต้องมีความแข็งแรง ทนทาน และอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมเมื่อทำการวัด เพราะฉะนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการออกแบบ Bobbin เพื่อที่จะติดตั้งเข้ากับโพรบวัดกระแส โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.4.1 ออกแบบโครงสร้าง Bobbin

ทำการออกแบบ Bobbin โดยการออกแบบเป็นทรงกลมเพื่อให้จัดวางโพรบวัดกระแสให้สมมาตรแกนกลางเจาะเป็นวงกลมเพื่อให้สายตัวนำอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของโพรบวัดกระแสได้ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 โครงสร้าง Bobbin

3.4.2 ทำการกลึง Bobbin ให้เป็นทรงกระบอก

3.4.3 ทำการเจาะร่องเพื่อให้ง่ายต่อการติดตั้งกับขดลวด

3.5 ชุดกล่องวงจรขยายสัญญาณ



รูปที่ 6 รูปแบบการต่อใช้งานจริง

3.6 การทดสอบโพรบวัดกระแสไฟฟ้าสลับแบบขดลวดโรโกสกี ขนาด 1 kA

การใช้โพรบวัดกระแสไฟฟ้าสลับนี้ เพื่อต้องการทราบว่าขดลวดโรโกสกีที่ทำการพันและชุดกล่องขยายสัญญาณที่จัดทำขึ้นนั้นมีความเที่ยงตรงและคลาดเคลื่อนมากน้อยเพียงใด

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการวัด

- | | | | |
|---------------------------|---|------------------------|-----------|
| 1. เครื่องจ่ายกระแสแรงสูง | 1 | 2. เครื่องโพรบวัดกระแส | 1 ตัว |
| 3. ชุดกล่องขยายสัญญาณ | 1 | 4. ชุดมัลติมิเตอร์ | 1 เครื่อง |

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

เมื่อดำเนินการติดตั้งและตรวจสอบอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้พร้อมทำการทดลอง ที่หน้าจอ LCD ของเครื่องจ่ายกระแสจะแสดง ค่าการจ่ายกระแสเริ่มต้นไว้ที่ 0 A



รูปที่ 7 แสดงผล Standby ของเครื่องจ่ายกระแส

เมื่อทำการปรับกระแสไปที่ 1kA เพื่อเป็นแกนหลัก ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ (Parameter) เพื่อความเที่ยงตรงในการวัด โดยการปรับค่าVariable Resister ทั้ง 3 ตัวให้มีค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ได้แรงดัน Output เท่ากับ 1 V (ตามสัดส่วน 1 mV /1A)



รูปที่ 8 แสดงผลการปรับกระแสไปที่ 1 kA

เมื่อปรับค่า ความต้านทานปรับค่าได้ (Variable Resister) เหมาะสมแล้ว ก็ทำการปรับลดการจ่ายกระแสลง มาที่ 0 A เพื่อเริ่มทำการวัดกระแสตั้งแต่ 100A -1kA จากการทดสอบ โพรบวัดกระแสไฟฟ้าสลับแบบขดลวดโรโกสกี ขนาด 1kA โดนกำหนดค่าความต้านทานปรับค่าได้ (Variable Resister) ให้มีความแม่นยำที่สุดแล้วจึงทำการทดสอบ ตั้งแต่ 100A-1kA ได้ค่าดังนี้ กระแส 100 Aโพรบวัดได้ 95.3mV กระแส 200A วัดได้ 195.4mV กระแส 300A วัดได้ 304.6mV กระแส 400A วัดได้ 395.4mV กระแส 500A วัดได้ 500mV กระแส 601A วัดได้ 601mV กระแส 703A

วารสารวิชาการและวิจัย มทรพระนคร ฉบับพิเศษ.

วัดได้ 703mV กระแส 800A วัดได้ 801mV กระแส 901A วัดได้ 902mV และกระแส 1kA วัดได้ 1.002V จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า โพรบวัดกระแสมีความแม่นยำมากในช่วงกระแสสูง ตั้งแต่ 500A ขึ้นมาจนถึง 1kA

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส Input และแรงดัน Output ของ Coil ต้นแบบ

| กระแส | แรงดันที่วัดได้ | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|-------|-----------------|------------------------|
| 0 | 0.0 | 0.000 |
| 100 | 96.0 | 4.000 |
| 200 | 195.4 | 2.300 |
| 300 | 304.6 | 1.066 |
| 400 | 395.4 | 1.175 |
| 500 | 500.0 | 0.000 |
| 601 | 601.0 | 0.000 |
| 703 | 703.0 | 0.000 |
| 800 | 801.0 | 0.000 |
| 901 | 902.0 | 0.333 |
| 1000 | 1002.0 | 0.200 |

ตารางที่ 2 การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส Input และแรงดัน Output ของ Current Clamp ที่มีในท้องตลาด

| กระแส | แรงดันที่วัดได้ | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|-------|-----------------|------------------------|
| 0 | 0.0 | 0.00 |
| 100 | 98.5 | 1.50 |
| 200 | 199.6 | 0.20 |
| 300 | 293.2 | 2.27 |
| 400 | 391.7 | 2.08 |
| 500 | 490.4 | 1.92 |
| 600 | 587.4 | 2.10 |
| 700 | 686.7 | 1.90 |
| 800 | 780.5 | 2.44 |
| 900 | 879.6 | 2.27 |
| 1000 | 977.0 | 2.30 |

4. สรุป

จากการจัดทำงานวิจัยนี้ ได้ดำเนินการจนสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ โดยโพรบวัดกระแสสามารถวัดกระแสไฟฟ้าแรงสูงขนาด 1 kA ซึ่งเป็นการนำโพรบวัดกระแสไปคล้องกับสายส่งตัวนำกระแสสูงเพื่อตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ไหลผ่านสายตัวนำ และเมื่อนำกระแสที่วัดได้เข้าไปผ่านวงจร อินทิเกรเตอร์ซึ่งใช้ชุดกล่องขยายสัญญาณ ที่จัดทำขึ้น ปรับค่าชดเชยเพื่อให้สอดคล้องกับกระแสอินพุทที่ต้องการวัดโดยกำหนดค่าแรงดันด้านเอาต์พุตของโพรบนี้ไว้เท่ากับ 1 mV/A จนทำให้ โพรบวัดกระแสสามารถวัดกระแสไฟฟ้าแรงสูงขนาด 1 kA และชุดกล่องขยายสัญญาณ สามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ให้มีความสัมพันธ์ สอดคล้องกับค่าที่วัดได้ จึงได้ข้อสรุปว่า งานวิจัยชิ้นนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง มีความสะดวกในการนำไปใช้งาน และมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการวัดโดยใช้อุปกรณ์วัดกระแสประเภท Current Transformer

4.1 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาโครงการ

ในการโครงการวิจัยวิศวกรรมนี้ ได้ทราบถึงปัญหาและข้อผิดพลาดของโครงการบางประการ ซึ่งทำให้นำข้อบกพร่องที่ได้พบดังกล่าวไปแก้ไขปัญหาและพัฒนาโครงการให้มีประสิทธิภาพและการใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น เช่น ปรับปรุงและพัฒนาให้สามารถบันทึกข้อมูลจากผลการทดลองที่วัดได้ สามารถนำข้อมูลที่วัดได้นั้น แสดงผลไปยังคอมพิวเตอร์ และบันทึกผลได้โดยอาจที่จะพัฒนาไปจนถึงการวัดค่า Transient ได้ด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- สุขสันต์ หวังสถิตย์วงศ์, ดำรง จินขาวขำ. 2544. โพรบวัดกระแสสลับแบบตัดโค้งได้ขนาด 500 แอมป์. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ฉบับที่ 11 ปีที่ 3, กรกฎาคม - กันยายน 2544.
- Ray, W.F.. 1994. Rogowski Transducers for High Bandwidth High Current Measurement. The Institution of Electrical Engineers, London.
- William H. Hayt, Jr. and John A. Buck / สุริภณ สมควรพาณิชย์ และคณะ. 2550. สนามแม่เหล็กไฟฟ้า Engineering electromagnetics. กรุงเทพฯ.
- ธันต์ ศรีสกุล. 2552. พื้นฐานการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์. มปท..
- Jhon D. Ramboz. 1996. Machinable Rogowski Coil, Design, and Calibration. IEEE Trans. Instrum. Meas. (45, 2 April).
- Kraus, J. D. 1984. Electromagnetics. 3 Edition, McGraw Hill.
- Ward, D. A. and Exan, J. L. T. 1992. Experience with Using Rogowski Coil for Transient Measurement. IEE Colloquium. Pulsed Power Technology.

