

การออกแบบสร้างโรกอปสกีคอยล์วัดกระแสอิมพัลส์ขนาดพิกัด 100 กิโลแอมป์
Design and construction of Rogowski Coil for impulse current measurement 100 kA

พงศ์พันธุ์ ปริยวงศ์*

สำรวย สังข์สะอาด**

*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

** เมธีวิจัยอาวุโส สกว. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการออกแบบสร้างโรกอปสกีคอยล์สำหรับวัดกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามีขนาดพิกัด 100 kA ประกอบด้วยแกนขดลวด ขดลวด และชีลด์ แกนขดลวดมีลักษณะเป็นวงแหวนทอรอยด์ทำด้วยอะคริลิก ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก การพันขดลวดมีความสม่ำเสมอตลอดความยาวเพื่อให้การวัดมีความถูกต้องสูง ป้องกันผลของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำภายนอกด้วยการพันย้อนกลับภายในแกน และใช้อะลูมิเนียมเป็นชีลด์ป้องกันสนามไฟฟ้า โรกอปสกีคอยล์ที่ออกแบบสร้างเป็นชนิด Self integrator และชนิด RC integrator ทำการทดสอบโรกอปสกีคอยล์ทั้งสองชนิดตามมาตรฐาน IEC วัดกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 μ s เปรียบเทียบผลการวัดที่กระแส 20% ของพิกัดกับระบบอ้างอิง หาสเกลแฟกเตอร์และพฤติกรรมพลศาสตร์ ผลการทดสอบพบว่าโรกอปสกีคอยล์ชนิด RC integrator มีคุณสมบัติได้ตามมาตรฐานกำหนดดีกว่าชนิด Self integrator แสดงออสซิลโลแกรมของผลการวัดกระแสที่ 100 kA

Abstract

This paper presents the design and construction of Rogowski coil for measuring lightning impulse current rated 100 kA. The coil consists of core, winding and shielding. The core has the form of toroid made of acrylic which is nonmagnetic material. The winding was wound uniformly for obtaining high accuracy of measurement and wound return to prevent the effect of external induction field. Aluminium housing was designed for electric field shielding. The constructed Rogowski coil was designed as Self integrator and RC integrator. Both kinds of Rogowski coil were tested in accordance with IEC standard for measuring impulse

current 8/20 μ s by comparing with the reference measuring system at 20% of rated current. The scale factor and dynamic behavior of the coil were carried out. The result shows that the RC integrator coil complied with standard better than the Self integrator coil. The results of measured waveform oscillograms at 100 kA are illustrated.

1. บทนำ

การทดสอบกับดักลึกลับที่ใช้ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC Publ. No. 99-4 [1] กำหนดให้มีการทดสอบด้วยกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 μ s เพื่อหาแรงดันค้างเหลือ (residual voltage test) และกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 4/10 μ s จะใช้ในการทดสอบความคงทนต่อกระแสอิมพัลส์ที่สภาวะใช้งาน (high current impulse operating duty test) เพื่อถึงความคงทนอยู่ได้ของกับดักลึกลับต่อกระแสอิมพัลส์ความชันสูง โดยขนาดกระแสอิมพัลส์ทดสอบขึ้นกับขนาดกับดักลึกลับ

เนื่องจากการใช้กับดักลึกลับขนาดกระแสพิกัดสูงเพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นต้องใช้กระแสอิมพัลส์ทดสอบขนาดสูง ทำให้อุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ทดสอบดังกล่าวต้องมีพิกัดที่สูงตาม อุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ที่มีขายอยู่จะมีขนาดพิกัดที่ไม่สูงมารวมทั้งอุปกรณ์ยังมีราคาแพง ดังนั้นเพื่อให้สามารถวัดกระแสอิมพัลส์ทดสอบที่มีขนาดสูงได้จึงควรมีการพัฒนาออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ที่มีขนาดสูง

อุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์มีหลายชนิด โดยแต่ละชนิดมีหลักการทำงานที่ต่างกันไปเช่นชนิดแบบแกนร่วม (coaxial shunt) ที่ขนาดของชิ้นวัดกระแสจะใหญ่เทอะทะตามขนาดกระแสใช้งาน ทำให้ไม่สะดวกในการใช้งาน อีกทั้งยังไหลดวงจรที่จะวัดอีกด้วย สำหรับอุปกรณ์วัดกระแสอีกชนิดหนึ่งที่สามารถวัดกระแสอิมพัลส์

RECEIVED 27 FEBRUARY, 2002

ACCEPTED 24 OCTOBER, 2002

ค่าสูง และมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างรวดเร็ว โดยใช้หลักการของหม้อแปลงกระแส (current transformer) แบบพิเศษได้แก่ โรกอสกีก้อยล์ ซึ่งจะเป็นอุปกรณ์วัดที่จะออกแบบสร้าง เนื่องจากโรกอสกีก้อยล์มีข้อดีดังนี้ [2]

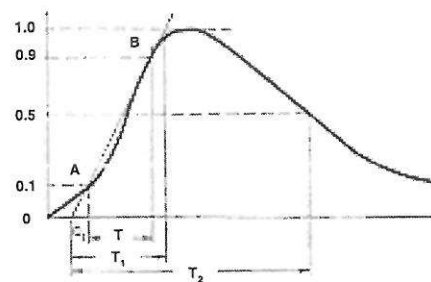
- 1) โรกอสกีก้อยล์สามารถใช้วัดกระแสที่มีขนาดสูงๆ ได้ถูกต้อง เนื่องจากไม่ได้ใช้แกนเหล็กทำให้ไม่เกิดการอิ่มตัว และการที่ค่ามิวขวลอินดักแตนซ์ M ไม่ขึ้นกับกระแสที่ต้องการวัด ทำให้โรกอสกีก้อยล์มีความเป็นเชิงเส้น (linearity)
 - 2) การวัดกระแสที่มีขนาดสูงๆ โรกอสกีก้อยล์ไม่จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่ นั่นคือโรกอสกีก้อยล์ชุดเดิมสามารถวัดกระแสได้หลายๆ ขนาด
 - 3) โรกอสกีก้อยล์สามารถใช้วัดกระแสที่มีค่าเปลี่ยนแปลงสูงๆ ได้เพราะเมื่อใช้แกนอากาศทำให้ไม่เกิด hysteresis loss (ขึ้นกับ f) และ eddy current loss (ขึ้นกับ f^2)
 - 4) การวัดโดยใช้โรกอสกีก้อยล์จะไม่ไปรบกวนวงจรที่ต้องการวัดทำให้ผลการวัดที่ได้ถูกต้อง และเนื่องจากไม่มีการต่อถึงกันทางไฟฟ้าทำให้มีความปลอดภัยกับผู้ใช้งาน
 - 5) การใช้แกนอากาศทำให้ไม่เสียหายเนื่องจากกระแสเกิน
 - 6) กรณีที่โรกอสกีก้อยล์มีแกนแบบเปิดอัดได้ ทำให้การใช้งานง่ายขึ้น ไม่ต้องไปปลดวงจรที่ต้องการวัดออก
 - 7) สร้างง่าย และราคาถูก
- ดังนั้นจึงเลือกออกแบบและสร้างโรกอสกีก้อยล์เพื่อเป็นอุปกรณ์วัดกระแสที่มีค่า 100 kA

2. การวัดกระแสด้วยโรกอสกีก้อยล์

2.1 ลักษณะรูปคลื่นกระแส

IEC Publ. No. 60-1 [3] กำหนดรูปคลื่นกระแสมาตรฐานขึ้น โดยพยายามเลียนแบบรูปคลื่นให้ใกล้เคียงมากที่สุดกับที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติดังรูปที่ 1 มีพารามิเตอร์ดังนี้

- 1) เวลาค้น (T_1 หรือ T_r)
- 2) เวลาหลังคลื่น (T_2 หรือ T_f)
- 3) ค่ายอด ($\hat{I}$)
- 4) ค่ายอดกระแสชั่วตรงข้าม ($-\hat{I}$)



รูปที่ 1 ลักษณะรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าตามมาตรฐาน

2.2 มาตรฐานของระบบวัดกระแส

ตามมาตรฐาน IEC Publ. No. 60-2 [4] ได้กำหนดคุณสมบัติของระบบวัดกระแสดังนี้

- 1) ความผิดพลาดในการวัดค่ายอดกระแสไม่เกิน $\pm 3\%$
- 2) ความผิดพลาดในการวัดค่าทางเวลาซึ่งเป็นตัวกำหนด

ลักษณะรูปคลื่นกระแสไม่เกิน $\pm 10\%$

2.3 หลักการทำงานของโรกอสกีก้อยล์

โรกอสกีก้อยล์เป็นอุปกรณ์วัดกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กเคลื่อนผ่านขดลวดที่พันรอบแกนที่ไม่เป็นแม่เหล็กของโรกอสกีก้อยล์ ผลจากสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะไปคาบเกี่ยวกับค้อยล์ซึ่งวางอยู่เป็นวงรอบตัวนำเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันขึ้นที่ปลายของขดลวด เมื่อนำแรงดันดังกล่าวไปผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสมก็จะได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัดอย่างถูกต้องดังรูป 2 (a)

รูปที่ 2 (b) แสดงหลักการวัดกระแสของโรกอสกีก้อยล์ [5] โดยมีขดลวด n รอบต่อเมตร และพื้นที่หน้าตัด A วางอยู่ล้อมรอบตัวนำที่มีกระแส i_p ไหล พิจารณาในช่วงความยาว dl จะได้จำนวนรอบ $n \cdot dl$ และเส้นแรงแม่เหล็ก $d\phi$ ที่มากล้องในช่วง dl มีค่า

$$d\phi = \mu_0 \cdot H \cdot A \cdot n \cdot dl \cdot \cos\alpha \quad (1)$$

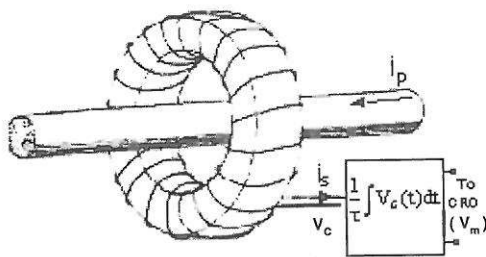
เมื่ออินทิเกรตรอบขดลวดจะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่มากล้องขดลวดทั้งหมด

$$\phi = \int d\phi = \mu_0 \cdot n \cdot A \cdot \int H \cdot \cos\alpha \cdot dl \quad (2)$$

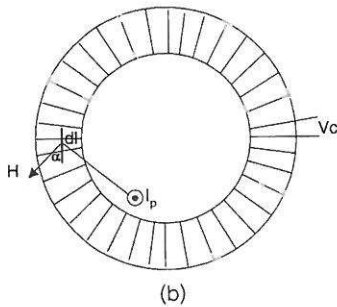
$$\text{จากกฎของแอมแปร์} \oint_c H \cdot dl = i_p \quad (3)$$

$$\text{จากรูป จะได้} \oint_c H \cdot \cos\alpha \cdot dl = i_p \quad (4)$$

$$\text{แทน (4) ลงใน (2) จะได้} \phi = \mu_0 \cdot n \cdot A \cdot i_p \quad (5)$$



(a)



(b)

รูปที่ 2 (a) การวัดกระแสด้วยโรกอปสกีคอยล์
(b) แรงดันที่ได้จากโรกอปสกีคอยล์

$$\text{จากกฎของฟาราเดย์ } V_c = \frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

$$V_c = \frac{d\phi}{dt} = \mu_0 \cdot n \cdot A \cdot \frac{di_p}{dt} = M \frac{di_p}{dt} \quad (7)$$

$$\text{เมื่อ } M = \mu_0 \cdot n \cdot A \quad (8)$$

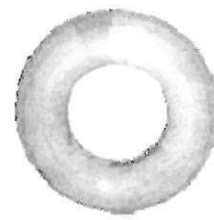
จากสมการที่ (7) จะเห็นว่าการวัดกระแสของโรกอปสกีคอยล์นั้นต้องทำการอินทิเกรตแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด ซึ่งการอินทิเกรตที่ใช้สำหรับโรกอปสกีคอยล์ที่สร้างขึ้นจะเป็นแบบพาสซีฟชนิด Self integrator และชนิด RC integrator

3. การออกแบบสร้างคอยล์

ในการวัดรูปคลื่นกระแสพัลส์ เพื่อให้ได้รูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นจริงมากที่สุดนั้น การออกแบบคอยล์จะต้องคำนึงถึงวัสดุที่ใช้ทำแกนขดลวด การพันขดลวดเพื่อไม่ให้มีผลของสนามแม่เหล็กจากภายนอก และการชิลด์เพื่อให้อุปกรณ์วัดได้ถูกต้องไม่มีผลการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าจากภายนอก โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 แกนขดลวด

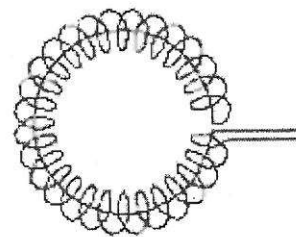
โรกอปสกีคอยล์ที่ออกแบบจะใช้แกนที่ทำด้วยอะคริลิก ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก เพื่อไม่ให้เกิดการอิ่มตัวของแกนขดลวดเมื่อนำไปวัดกระแสที่มีขนาดกระแสสูงๆ โดยจะกลึงเป็นรูปวงแหวนทอรอยด์ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แกนขดลวด

3.2 ขดลวด

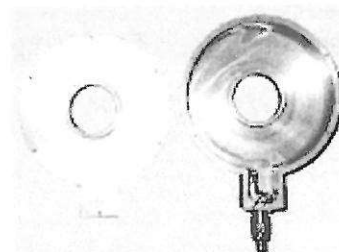
การพันขดลวดของโรกอปสกีคอยล์จะมีความพิเศษ คือต้องมีการพันย้อนกลับเข้าไปในแกนของขดลวด เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน [6] ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การพันขดลวด

3.3 การชิลด์

การชิลด์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะทำการวัดกระแสพัลส์ จะใช้เป็นกล่องชิลด์ที่ทำจากอะลูมิเนียมดังรูปที่ 5

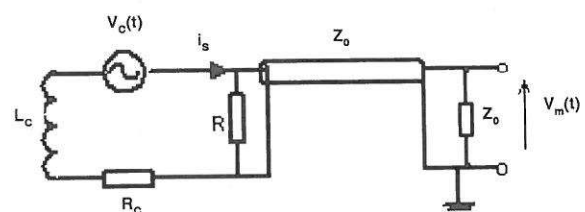


รูปที่ 5 กล่องชิลด์สนามไฟฟ้า

4. โรกอปสกีคอยล์ชนิด Self integrator

4.1 หลักการโรกอปสกีคอยล์ชนิด Self integrator

วงจร Self integrator คือ วงจรที่ต่อขาออกของโรกอปสกีคอยล์ด้วยความต้านทานค่าต่ำ ดังรูปที่ 6 โดยมีเงื่อนไข [6] คือ $\omega L \gg (R + R_c)$



รูปที่ 6 โรกอปสกีคอยล์ชนิด Self integrator

ความหมายในรูปวงจร :

V_c = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

L_c = ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอปสกีค้อยล์

R_c = ความต้านทานของขดลวดโรกอปสกีค้อยล์

R = ความต้านทานโหลด

Z_0 = เสรีจิมพีแดนซ์ของสายวัดและเมทซ์จิมพีแดนซ์

V_m = แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้

จากรูปที่ 6 สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระแส กับ แรงดันได้ดังนี้ [5]

$$V_c = M \frac{di_p}{dt} = L_c \frac{di_s}{dt} + i_s (R_c + R) \quad (9)$$

เนื่องจาก $L_c \frac{di_s}{dt} \gg i_s (R_c + R)$ จะได้

$$V_c(t) = L_c \frac{di_s}{dt} \quad (10)$$

ทำการ integrate จะได้กระแสในขดลวด

$$i_s(t) = \frac{1}{L_c} \int V_c(t) dt \quad (11)$$

$$\text{และแรงดันที่วัดได้ } V_m(t) = i_s(t) \cdot R \quad (12)$$

แทน i_s จาก (12) ลงใน (11) จะได้

$$V_m(t) = \frac{R}{L_c} \int V_c(t) dt \quad (13)$$

แทนค่า $V_c(t)$ จาก (7) ลงใน (13) จะได้

$$V_m(t) = \frac{R}{L_c} M i_p(t) \quad (14)$$

จากสมการที่ (14) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้กับกระแสที่วัดได้ที่ต้องการวัด สำหรับผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรหาได้จากการแปลงลาปลาซสมการที่ (9) ได้เป็น

$$M i_p(s) = i_s(s) [s L_c + R_c + R] \quad (15)$$

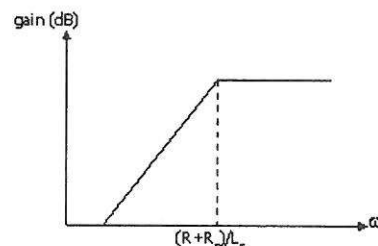
$$\text{จัดรูปใหม่จะได้ } \frac{i_s(s)}{i_p(s)} = \frac{Ms}{s L_c + R_c + R} \quad (16)$$

จาก $V_m(s) = i_s(s) \cdot R$ จะได้

$$\begin{aligned} \frac{V_m(s)}{i_p(s)} &= \frac{R M s}{R + R_c + L_c s} \\ &= \frac{(R M / L_c) s}{s + (R + R_c) / L_c} \end{aligned} \quad (17)$$

จากสมการที่ (17) ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร Self integrator เป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านดังรูปที่ 7 มีความถี่หักมุม

$$\omega_l = \frac{R + R_c}{L_c} \quad (18)$$



รูปที่ 7 ผลตอบสนองทางความถี่ของโรกอปสกีค้อยล์ชนิด Self integrator

4.2 การออกแบบสร้างโรกอปสกีค้อยล์ชนิด Self integrator

โรกอปสกีค้อยล์ชนิด Self integrator ที่ออกแบบสร้างขึ้นอาศัยหลักการดังที่กล่าวแล้ว โดยแรงดันที่ต้องการวัดได้ $V_m = 10$ V สำหรับค่ายอดกระแสอิมพัลส์ $\hat{I} = 100$ kA โรกอปสกีค้อยล์ที่สร้างขึ้นใช้ลวดทองแดงอบจนอุณหภูมิได้สูงถึง 90°C [7] เนื่องจากการวัดกระแสด้วยโรกอปสกีค้อยล์จะไม่มีการเชื่อมต่อกับไฟฟ้ากับวงจรที่ต้องการวัด ทำให้พลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำมีขนาดเล็ก ดังนั้นปัจจัยที่สำคัญในการเลือกขนาดลวดจึงขึ้นกับเงื่อนไข $\omega L \gg (R + R_c)$ นั่นคือกรณีของโรกอปสกีค้อยล์ชนิด Self integrator ต้องการความเหนี่ยวนำ L_c ที่สูง ขณะที่ความต้านทาน R_c ต่ำ ซึ่งการเพิ่มจำนวนรอบทำให้ได้ค่า L_c ที่เพิ่มขึ้นมากกว่าการเพิ่มของ R_c ดังนั้นจึงเลือกใช้ลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. ที่ให้ค่า L_c สูงพอขณะที่สามารถพันให้สม่ำเสมอได้ด้วยมือ

พารามิเตอร์ของค้อยล์แบบ Self integrator คือ

จำนวนรอบของขดลวด, $N = 304$ รอบ

พื้นที่หน้าตัดของแกนอากาศ, $A = 10.18 \text{ cm}^2$

ความยาวของแกนอะคิลิก, $l = 21.36 \text{ cm}$

ความต้านทานขดลวด, $R_c = 3 \Omega$

ความเหนี่ยวนำขดลวด, $L_c = 650 \mu\text{H}$

ดังนั้นจำนวนรอบของขดลวดต่อความยาว,

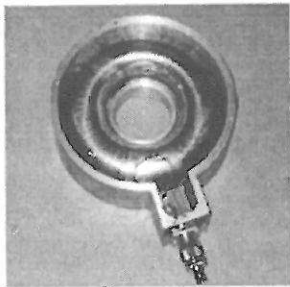
$$n = 304/21.36 = 12 \text{ รอบ / cm จะได้}$$

$$M = \mu_0 \cdot n \cdot A = 1.82 \text{ } \mu\text{H}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } R = \frac{V_m \cdot L}{M \cdot I_p} = 0.0357 \text{ } \Omega$$

ซึ่งจะทำได้โดยใช้ความต้านทาน 0.5 Ω ขนาดกัน 14 ตัว

โรกอปสกีคอลลีที่สร้างเสร็จแล้ว แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 โรกอปสกีคอลลีแบบ Self integrator

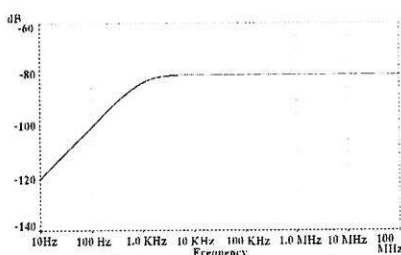
ความถี่ที่หุ้มด้านความถี่ต่ำของโรกอปสกีคอลลีชนิด Self integrator ที่สร้างขึ้น

$$\omega_l = \frac{R + R_c}{L_c} = 6.15 \times 10^3 \text{ rad/s หรือ } f_l = 979 \text{ Hz}$$

และผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร โดยใช้โปรแกรม

PSPICE [8] ซึ่งมีค่าคงตัวทางเวลา $\tau = \frac{L_c}{R + R_c} = 216 \text{ } \mu\text{s}$

ซึ่งมีค่ามากกว่า 10 เท่าของความกว้างพัลส์ที่ต้องการวัดดังรูปที่ 9

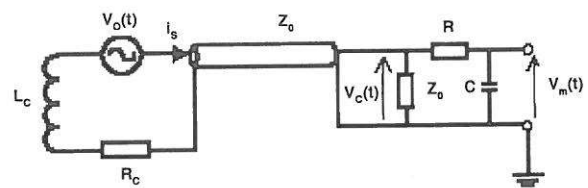


รูปที่ 9 ผลตอบสนองทางความถี่

5 โรกอปสกีคอลลีชนิด RC integrator

5.1 หลักการโรกอปสกีคอลลีชนิด RC integrator

วงจร RC integrator คือ วงจรที่ต่อความต้านทานค่าสูง ($R \gg Z_0$) อนุกรมกับตัวเก็บประจุแล้ววัดแรงดันขาออกดังรูปที่ 10 โดยมีเงื่อนไข $\omega L_c \ll Z_0$ และด้านความถี่ต่ำ $1/\omega C \ll R$ [6]



รูปที่ 10 โรกอปสกีคอลลีชนิด RC integrator

จากรูปที่ 10 จะได้ความสัมพันธ์ของกระแส กับ แรงดัน [4]

$$V_c = M \frac{di_p}{dt} = L_c \frac{di_s}{dt} + i_s \cdot Z_0 + V_o \quad (19)$$

จากเงื่อนไข $\omega L_c \ll Z_0$ ดังนั้นจาก (19) จะได้

$$V_c = M \frac{di_p}{dt} = i_s \cdot Z_0 + V_o \quad (20)$$

$$\text{ทางด้าน RC จะได้ } V_o = i_s \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right) \quad (21)$$

$$\text{จากเงื่อนไข } \frac{1}{\omega C} \ll R \text{ จะได้ } V_o = i_s \cdot R \quad (22)$$

แทน (22) ลงในสมการที่ (20) จะได้

$$V_c = M \frac{di_p}{dt} = i_s \cdot Z_0 + i_s \cdot R \quad (23)$$

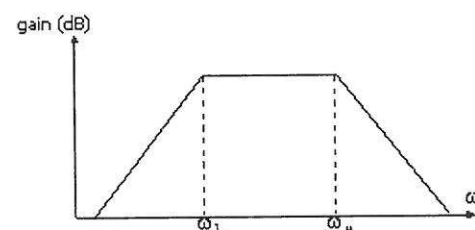
$$\text{เนื่องจากค่า } R \gg Z_0 \text{ ก็จะได้ } M \frac{di_p}{dt} = i_s \cdot R \quad (24)$$

$$\text{แทน } i_s = C \frac{dV_m}{dt} \text{ ใน (24) จะได้}$$

$$V_m(t) = \frac{M}{RC} \cdot i_p(t) \quad (25)$$

จากสมการที่ (25) สามารถเขียนผลตอบสนองทางความถี่ได้เป็นวงจรกรองความถี่แบบผ่านดังรูปที่ 11 ที่มีความถี่จำกัดด้านความถี่สูง (ω_u) และความถี่จำกัดด้านความถี่ต่ำ (ω_l) ดังนี้

$$\omega_u \ll Z_0/L_c \quad (26) \text{ และ } \omega_l \gg 1/RC \quad (27)$$



รูปที่ 11 ผลตอบสนองทางความถี่ของโรกอปสกีคอลลีชนิด RC integrator

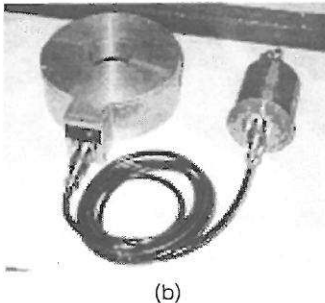
5.2 การออกแบบสร้างโรกอสก๊อคอยล์ชนิด RC integrator

โรกอสก๊อคอยล์ชนิด RC integrator ที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้จะอาศัยหลักการดังที่ได้กล่าวแล้ว โดยแรงดันที่ต้องการวัดได้ $V_m = 10 \text{ V}$ สำหรับค่ายอดกระแสลิมิต $i_p = 100 \text{ kA}$ โรกอสก๊อคอยล์ที่สร้างขึ้นจะใช้ลวดทองแดงอบจนวนที่ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 90°C [7] การเลือกขนาดลวดขึ้นกับมีเงื่อนไขคือ $\omega L \ll Z_0$ ดังนั้นจึงใช้ลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 mm . ที่ให้ค่า L_c ที่ต่ำพอ

จำนวนรอบของขดลวด, $N = 21$ รอบ
พื้นที่หน้าตัดของแกนอากาศ, $A = 10.18 \text{ cm}^2$
ความยาวของแกนอากาศ, $l = 21.36 \text{ cm}$
ความต้านทานขดลวด, $R_c = 0 \text{ } \Omega$
ความเหนี่ยวนำขดลวด, $L_c = 2.25 \text{ } \mu\text{H}$
ดังนั้นจำนวนรอบของขดลวดต่อความยาว,
 $n = 21/21.36 = 1$ รอบ/cm จะได้ $M = 0.14 \text{ } \mu\text{H}$

$$\text{ใช้ } C = 0.1 \text{ } \mu\text{F} \text{ จะได้ } R = \frac{M \cdot I_p}{V_m \cdot C} = 14 \text{ K}\Omega$$

ดังนั้นจะได้โรกอสก๊อคอยล์ที่สร้างเสร็จดังในรูปที่ 12



รูปที่ 12 โรกอสก๊อคอยล์ชนิด RC Integrator

โรกอสก๊อคอยล์ชนิด RC integrator ที่สร้างขึ้นมีความถี่จำกัดด้านความถี่ต่ำ และ ความถี่จำกัดด้านความถี่สูง ดังนี้

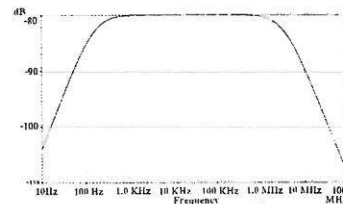
$$\omega_u \ll \frac{Z_0}{L_c} = 22.22 \times 10^6 \text{ rad/s}, f_u \ll 3.54 \text{ MHz}$$

$$\omega_l \gg \frac{1}{RC} = 1000 \text{ rad/s หรือ } f_l \gg 159 \text{ Hz}$$

และผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร โดยใช้โปรแกรม

PSPICE [8] ซึ่งมีค่าคงตัวทางเวลา $\tau = \frac{1}{RC} = 250 \text{ } \mu\text{s}$ ซึ่งมีค่า

มากกว่า 10 เท่าของความกว้างพัลส์ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ผลตอบสนองทางความถี่ของโรกอสก๊อคอยล์ชนิด RC integrator

6. การทดสอบและประเมินผลโรกอสก๊อคอยล์

การทดสอบวัดเปรียบเทียบเป็นการทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด (assigned scale factor) และหาพฤติกรรมพลศาสตร์ (dynamic behavior) ตามมาตรฐาน IEC Publ No. 60-2 [4] โดยทดสอบเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงที่ระดับกระแส 20% ของกระแสพิกต์ ดังนั้นกรณีกระแสพิกต์อุปกรณ์วัดมีค่า 100 kA ก็สามารถทดสอบที่กระแส 20 kA การทดสอบจะอ่านค่าแรงดันจากระบบที่ต้องการวัด และกระแสอินพุทจากระบบวัดอ้างอิงทดสอบไม่น้อยกว่า n ค่า ($n \geq 10$) ใช้เงื่อนไขตามที่มาตรฐานกำหนด

สเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดหาได้จากค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยกระแสที่อ่านได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบกำหนดให้เป็น F_i สเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด F_m หากจากค่าเฉลี่ยของ F_i โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) ต้องน้อยกว่า 1% ของ F_m

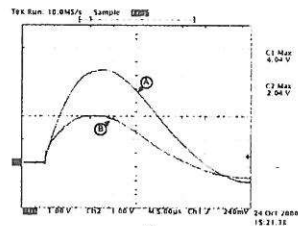
$$s = \sqrt{\frac{\sum (F_i - F_m)^2}{n-1}}$$

พฤติกรรมพลศาสตร์จะพิจารณาจากพารามิเตอร์ทางเวลาที่แต่ละค่าจะต้องแตกต่างจากค่าที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงไม่เกิน 10% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต้องมีค่าน้อยกว่า 1% ของ ค่าเฉลี่ย

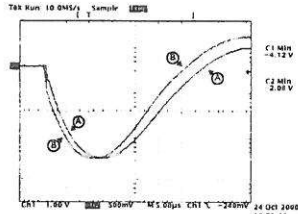
6.1 การประเมินผลโรกอสก๊อคอยล์ชนิด Self integrator

ผลการทดสอบโรกอสก๊อคอยล์ชนิด Self integrator ด้วยรูปคลื่น 8/20 μs ดังตารางที่ 1 ตัวอย่างรูปคลื่นดังรูปที่ 14 พบว่าโรกอสก๊อคอยล์ชนิด Self integrator ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนทางเวลาเกินจากเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดในส่วนของเวลาหลังคลื่นอยู่ที่ 10.11% เนื่องจากแบนด์วิดท์ตามรูปที่ 9 ซึ่งเริ่มตั้งแต่ 979 kHz นั่นคือองค์ประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่านี้จะถูกลดทอนทำให้รูปคลื่นที่ได้มีเวลาหน้าคลื่นและเวลาหลังคลื่นคลาดเคลื่อนไป ตารางที่ 1 ผลเปรียบเทียบโรกอสก๊อคอยล์ชนิด Self integrator ด้วยรูปคลื่น 8/20 μs

ชั่วแรงดัน	Scale factor, F_m	s (%)	$\Delta \hat{I}$ (%)	ΔT_1 (%)	ΔT_2 (%)
บวก	9913	0.10	2.92	-8.02	-9.01
ลบ	10000	0.06	1.95	-7.53	-10.11



(a) ขั้วบวก



(b) ขั้วลบ

A - Reference, B - โรกอปสกีค้อยล์

รูปที่ 14 ตัวอย่างรูปคลื่น 8/20 μ s ของโรกอปสกีค้อยล์ชนิด Self integrator

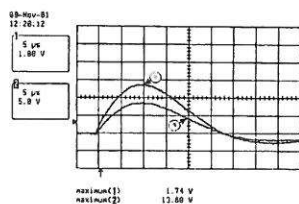
ผลการทดสอบพบว่าโรกอปสกีค้อยล์ชนิด Self-integrator ที่ออกแบบสร้างขึ้นยังมีความคลาดเคลื่อนที่ไม่ผ่านตามมาตรฐาน

6.2 การประเมินผลโรกอปสกีค้อยล์ชนิด RC integrator

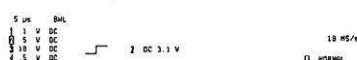
ผลการทดสอบโรกอปสกีค้อยล์ชนิด RC integrator ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s ดังตารางที่ 2 ตัวอย่างรูปคลื่นดังรูปที่ 15 พบว่าโรกอปสกีค้อยล์ชนิด RC integrator ให้ผลอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดคือ ค่าเฉลี่ยของสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) น้อยกว่า 1% และ พฤติกรรมพลศาสตร์ซึ่งพิจารณาจากค่าทางเวลาที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำ คือเวลาหน่วงคลื่นคลาดเคลื่อน 1% และ เวลาหลังคลื่นคลาดเคลื่อน 0.07% ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดไว้ 10% เนื่องจากแบนด์วิดท์ในรูป 13 ที่ครอบคลุมช่วงความถี่รูปคลื่นที่ต้องการวัดคือ 159 Hz - 3.54 MHz ทำให้มีการลดทอนน้อยมาก

ตารางที่ 2 ผลเปรียบเทียบโรกอปสกีค้อยล์ชนิด RC integrator ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s

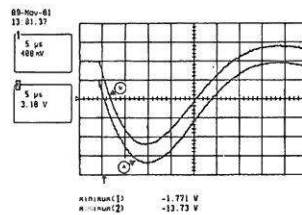
ขั้วแรงดัน	Scale factor, F_m	s (%)	$\Delta \hat{I}$ (%)	ΔT_1 (%)	ΔT_2 (%)
บวก	11017	0.08	2.12	+1.01	-0.07
ลบ	10866	0.01	0.47	+1.01	-0.07



(a) ขั้วบวก



(b) ขั้วลบ



(b) ขั้วลบ

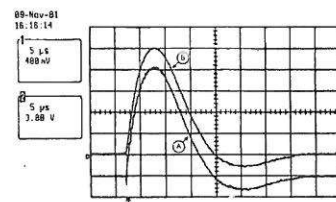
A - Reference, B - โรกอปสกีค้อยล์

รูปที่ 15 ตัวอย่างรูปคลื่น 8/20 μ s ของโรกอปสกีค้อยล์ชนิด RC integrator

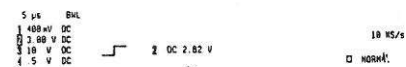
จากผลทดสอบการวัดกระแสแอมป์รูปคลื่น 8/20 μ s พบว่า โรกอปสกีค้อยล์ชนิด RC integrator มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ดังนั้นจะทดสอบต่อด้วยกระแสแอมป์รูปคลื่น 4/10 μ s ได้ผลดังตารางที่ 3 และตัวอย่างรูปคลื่นดังรูปที่ 16

ตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบโรกอปสกีค้อยล์ชนิด RC integrator ด้วยรูปคลื่น 4/10 μ s

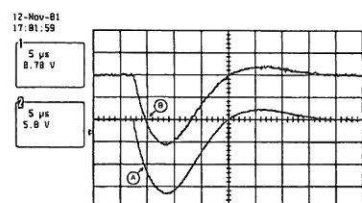
ขั้วแรงดัน	Scale factor, F_m	s (%)	$\Delta \hat{I}$ (%)	ΔT_1 (%)	ΔT_2 (%)
บวก	10841	0.03	0.74	-0.72	-0.83
ลบ	11023	0.06	2.68	-0.72	-0.83



(a) ขั้วบวก



(b) ขั้วลบ



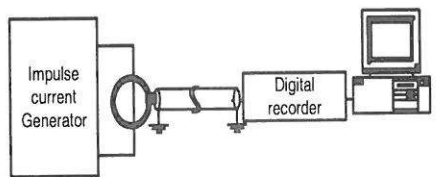
(b) ขั้วลบ

A - Reference, B - โรกอปสกีค้อยล์

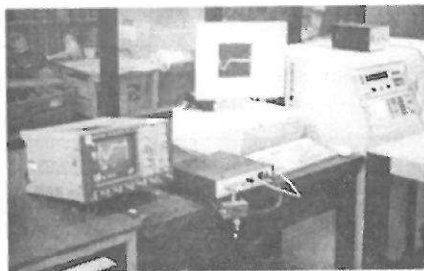
รูปที่ 16 ตัวอย่างรูปคลื่น 4/10 μ s ของโรกอปสกีค้อยล์ชนิด RC integrator

ผลการทดสอบพบว่าโรกอปสก็ค้อยล์ชนิด RC integrator มีค่าความคลาดเคลื่อนทางเวลาได้ตามมาตรฐาน ดังนั้นจึงนำโรกอปสก็ค้อยล์ชนิด RC integrator มาทดสอบวัดกระแสพัลส์ที่ขนาดพิกัด 100 kA บันทึกรูปคลื่นกระแสด้วยเครื่องบันทึกแบบดิจิตอล (digital recorder) 100 MHz ดังวงจรในรูปที่ 17

ผลทดสอบการวัดกระแสพัลส์รูปคลื่น 4/10 μ s ที่ระดับ 100 kA ได้รูปคลื่นดังรูปที่ 18 โดยยังคงมีค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นเหมือนกับตอนเปรียบเทียบ

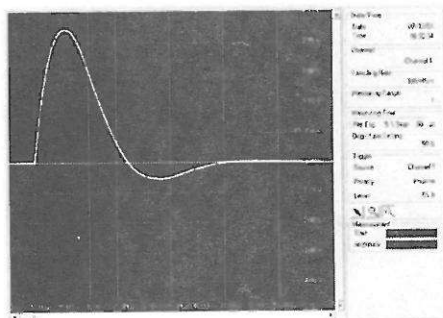


(a)

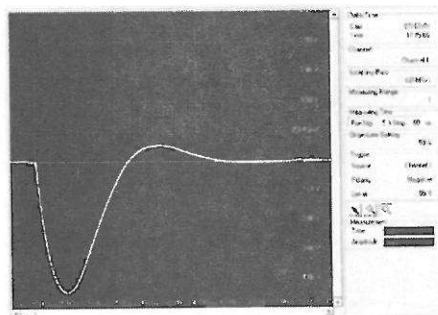


(b)

รูปที่ 17 (a) วงจรทดสอบ (b) เครื่องบันทึกแบบดิจิตอล



(a) ขั้วบวก



(b) ขั้วลบ

รูปที่ 18 รูปคลื่นกระแสพัลส์ 100 kA ที่วัดได้จากโรกอปสก็ค้อยล์ชนิด RC integrator โดยใช้ digital recorder

7. สรุปผล

จากผลการทดสอบโรกอปสก็ค้อยล์ที่ออกแบบสร้างขึ้นทั้ง 2 ชนิด พบว่า โรกอปสก็ค้อยล์ชนิด RC integrator ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดสอดคล้องตามมาตรฐาน [4] ได้แก่

1) ความผิดพลาดในการวัดค่ายอดกระแสไม่เกิน $\pm 3\%$ และ ความผิดพลาดในการวัดค่าทางเวลาอยู่ที่ประมาณ 1%

2) โรกอปสก็ค้อยล์ชนิด RC integrator มีพิกัดการวัดกระแสพัลส์ได้ถึง 100 kA

3) การวัดกระแสพัลส์โดยใช้โรกอปสก็ค้อยล์ที่ออกแบบสร้างขึ้นมีค่าใช้จ่ายในการสร้างถูกมาก เมื่อเทียบกับของต่างประเทศ อีกทั้งประสิทธิภาพและผลการทดสอบสามารถใช้งานได้เหมือนกัน

4) วัสดุที่ใช้ในการสร้างส่วนใหญ่ เป็นวัสดุที่ผลิตได้เองในประเทศ และผู้วิจัยออกแบบทำเอง

8. กิตติกรรมประกาศ

การออกแบบสร้างโรกอปสก็ค้อยล์ขนาดพิกัด 100 kA ลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยการสนับสนุนจากศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง และทุนผู้ช่วยวิจัยจากสำนักงาน สกว. จึงขอขอบคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC Publ No. 99-4:1998, Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c systems Part 4, Geneva
- [2] Ray, W.F.; Hewson, C.R. Pulsed Power 2000 , IEEE Symposium , 2000 , Page(s): 23/1 -23/4
- [3] IEC Publ No. 60-1 :1989, High Voltage Test Techniques Part.1, Geneva
- [4] IEC Publ. No. 60-2 1994, High Voltage Test Techniques Part.2, Geneva.
- [5] Ward, D.A.; Exon, J.La.T. Engineering Science and Education Journal Vol23,June 1993,Page(s):105-113
- [6] Adolf J. Schwab. High-voltage measurement techniques. The M.I.T Press, 1972.
- [7] Terrell Croft. American Electricians Handbook. New York: McGraw – Hill, 1953.
- [8] MicroSim Pspice, Evaluation version 6.2, MicroSim Corporation, 1995