



การวัดกระแสอิมพัลส์

การวัดกระแสอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นขนาด 75 kA เพื่อตรวจสอบขนาดและรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เปรียบเทียบกับที่มาตรฐานกำหนด จำเป็นต้องออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ขึ้นมาใหม่ เนื่องจากอุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ที่มีใช้ในห้องปฏิบัติการมีขนาดสูงสุด 50 kA

ในปัจจุบันอุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์มีอยู่มากมายหลายชนิด แต่ละชนิดมีหลักการการทำงานที่ต่างกันไปเช่นชั้นที่แบบแกนร่วม (Coaxial shunt) ขนาดของชั้นที่วัดกระแสจะใหญ่ห่อหุ้มตามขนาดกระแสใช้งาน ทำให้ไม่สะดวกในการใช้งาน อีกทั้งยังไหลดวงจรที่จะวัดอีกด้วย สำหรับอุปกรณ์วัดกระแสอีกชนิดหนึ่งที่สามารถวัดกระแสอิมพัลส์ค่าสูง และมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างรวดเร็ว โดยใช้หลักการของหม้อแปลงกระแส (Current transformer) แบบพิเศษได้แก่ โรกอสกีคอยล์ (Rogowski coil) ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดที่จะออกแบบสร้าง เนื่องจากโรกอสกีคอยล์มีข้อดีดังนี้ [13]

1) โรกอสกีคอยล์สามารถใช้วัดกระแสอิมพัลส์ที่มีขนาดสูงๆ ได้ถูกต้อง เนื่องจากไม่ได้ใช้แกนเหล็กทำให้ไม่เกิดการอิ่มตัว และการที่ค่ามิวของอลูมิเนียมที่ต่ำกว่า M ไม่ขึ้นกับกระแสที่ต้องการวัด ทำให้โรกอสกีคอยล์มีความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

2) การวัดกระแสอิมพัลส์ที่มีขนาดสูงๆ โรกอสกีคอยล์ไม่จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่ นั่นคือโรกอสกีคอยล์ชุดเดิมสามารถวัดกระแสอิมพัลส์ได้หลายขนาด

3) โรกอสกีคอยล์สามารถใช้วัดกระแสอิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงๆ ได้เพราะเมื่อใช้แกนอากาศทำให้ไม่เกิด Hysteresis loss (ขึ้นกับ f) และ Eddy current loss (ขึ้นกับ f^2)

4) การวัดโดยใช้โรกอสกีคอยล์จะไม่ไปรบกวนวงจรที่ต้องการวัด ทำให้ผลการวัดที่ได้ถูกต้อง และเนื่องจากไม่มีการต่อถึงกันทางไฟฟ้าทำให้มีความปลอดภัยแก่ผู้ใช้งาน

5) กรณีที่โรกอสกีคอยล์เป็นแบบยืดหยุ่นได้ (Flexible) ทำให้การใช้งานง่ายขึ้นโดยไม่ต้องไปปลดวงจรที่ต้องการวัดออก

6) สร้างง่าย และราคาถูกกว่าอุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ของต่างประเทศ

ในบทนี้จะกล่าวถึง มาตรฐานการวัดกระแสอิมพัลส์ หลักการทำงานของโรกอสกีคอยล์ การออกแบบสร้างคอยล์ และโรกอสกีคอยล์ชนิดแพสซีฟ ได้แก่ โรกอสกีคอยล์ชนิด self integrator และ โรกอสกีคอยล์ชนิด RC integrator

4.1 มาตรฐานการวัดกระแสอิมพัลส์

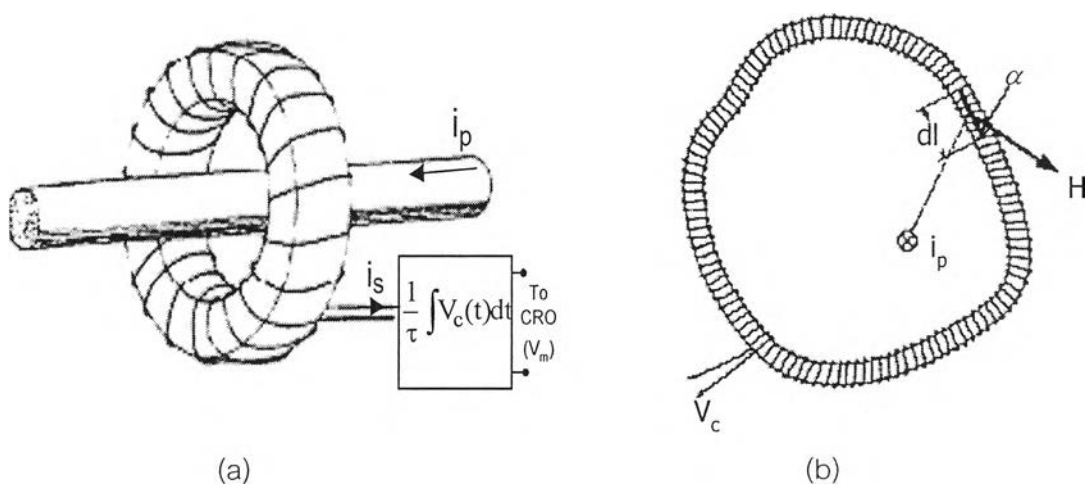
ตามมาตรฐาน IEC Publ. No. 60-2 [12] ได้กำหนดคุณสมบัติของระบบวัดกระแสอิมพัลส์ดังนี้

- 1) ความผิดพลาดในการวัดค่ายอดกระแสไม่เกิน $\pm 3\%$
- 2) ความผิดพลาดในการวัดค่าทางเวลาที่เป็นตัวกำหนดลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ไม่เกิน $\pm 10\%$

4.2 หลักการทำงานของโรกอปสกีคอยล์

โรกอปสกีคอยล์เป็นอุปกรณ์วัดกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็กคล้องผ่านขดลวดที่พันรอบแกนที่ไม่เป็นแม่เหล็กของโรกอปสกีคอยล์ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันขึ้นที่ปลายของขดลวดดังรูป 4.1 (a) เมื่อนำแรงดันดังกล่าวไปผ่านตัว integrate ที่เหมาะสมก็จะได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัดอย่างถูกต้อง ในรูปที่ 4.1 (b) แสดงหลักการวัดกระแสของโรกอปสกีคอยล์ [14] โดยมีขดลวด n รอบต่อเมตร และพื้นที่หน้าตัด A วางอยู่ล้อมรอบตัวนำที่มีกระแส i_p ไหล เมื่อพิจารณาในช่วงความยาว dl จะได้จำนวนรอบ $n \cdot dl$ และจะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่มาคล้องในช่วงความยาว dl เป็น $d\phi$ ซึ่งมีค่า

$$d\phi = \mu_0 \cdot H \cdot A \cdot n \cdot dl \cdot \cos \alpha \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.1 (a) การวัดกระแสด้วยโรกอปสกีคอยล์

(b) หลักการวัดกระแสของโรกอปสกีคอยล์

เมื่อ integrate รอบขดลวดจะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่มาคล้องขดลวดทั้งหมด

$$\phi = \int d\phi = \mu_0 \cdot n \cdot A \cdot \int H \cdot \cos \alpha \cdot dl \quad (4.2)$$

จากกฎของแอมแปร์ $\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i_p$ และจากรูป 4.1 (b) จะได้

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot \cos\alpha \cdot d\mathbf{l} = i_p \quad (4.3)$$

แทน (4.3) ลงใน (4.2) จะได้

$$\phi = \mu_0 \cdot n \cdot A \cdot i_p \quad (4.4)$$

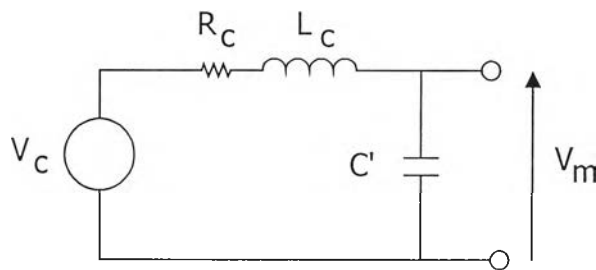
จากกฎของฟาราเดย์

$$V_c = \frac{d\phi}{dt} = \mu_0 \cdot n \cdot A \cdot \frac{di_p}{dt} = M \frac{di_p}{dt} \quad (4.5)$$

ให้ $M = \mu_0 \cdot n \cdot A$

จากสมการที่ (4.5) จะเห็นว่าการวัดกระแสอิมพัลส์ของโรกอปส์ก็คอยล์นั้นต้องทำการ integrate แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดจึงจะได้เป็นกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัด

ขดลวดโรกอปส์ก็คอยล์สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 4.2 [14] โดยสามารถหาค่า L_c จากสมการ (4.6) และค่า C' จากสมการ (4.7) [14]



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลของโรกอปส์ก็คอยล์

$$L_c = \mu_0 \cdot n^2 \cdot l \cdot A = MN \quad (4.6)$$

$$C' = \frac{16 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\pi \cdot \ln\left(\frac{A}{a}\right)} \quad (4.7)$$

$$R_c = \frac{\sigma_w \cdot l_w}{A_w} \quad (4.8)$$

โดยที่ V_c = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced voltage, V)

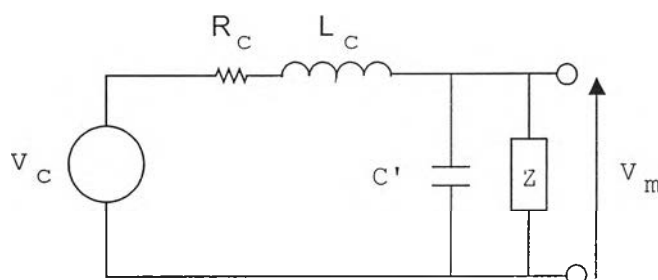
R_c = ความต้านทานของขดลวด (Ω)

L_c = ความเหนี่ยวนำของขดลวด (H)

C' = ความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวด (F)

a = พื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่ใช้พันย้อนกลับ (m^2)

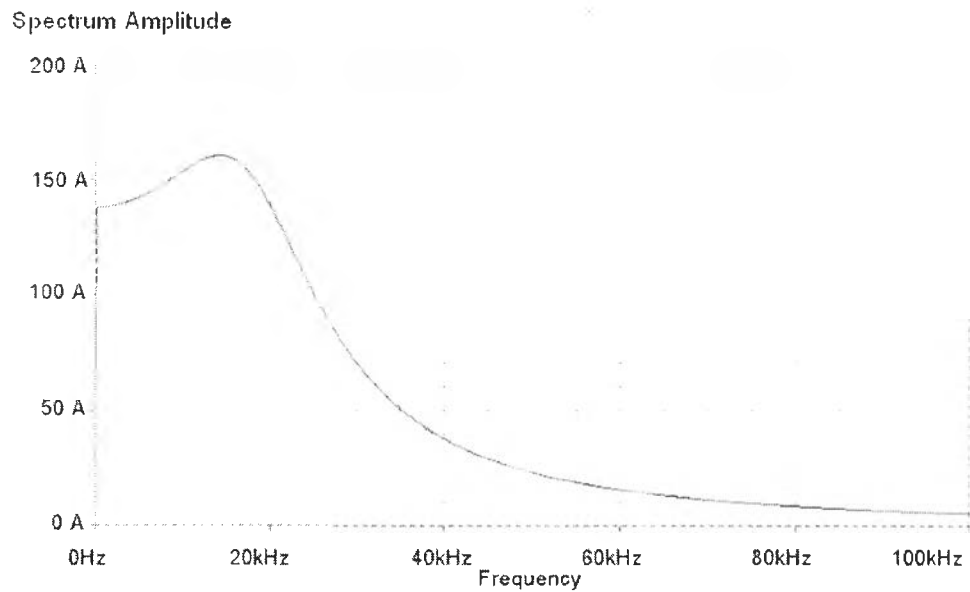
- A = พื้นที่หน้าตัดของแกนการพันขดลวด
 N = จำนวนรอบขดลวดทั้งหมด
 n = จำนวนรอบขดลวดต่อความยาวแกน
 ϵ_r = เปรอริมิตติวิตี้สัมพัทธ์ของแกน (Relative permittivity)
 σ_w = ความนำไฟฟ้าของลวด
 A_w = พื้นที่หน้าตัดของลวด
 l_w = ความยาวของลวด



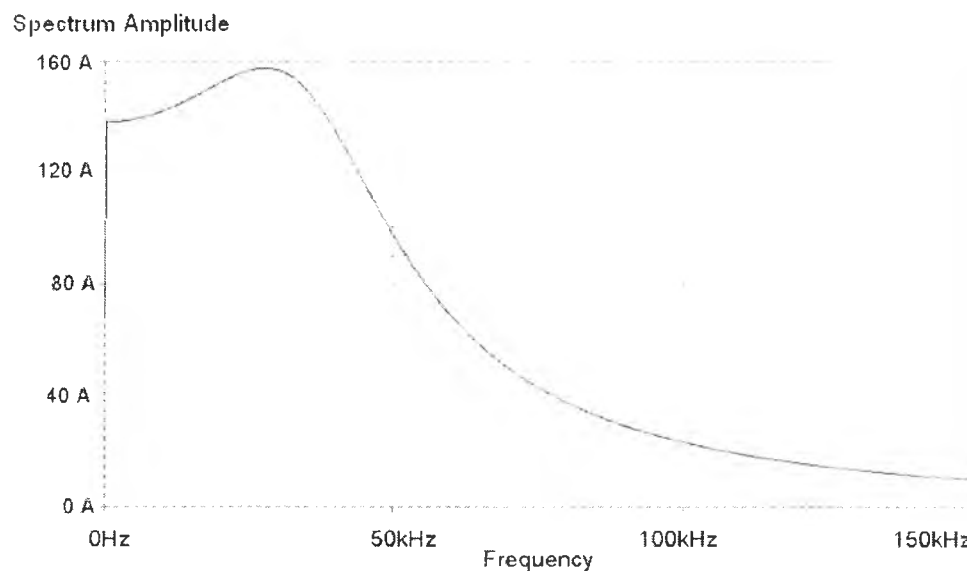
รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลเมื่อต่ออิมพีแดนซ์ขาออก

แรงดันขาออกของโรกอปสก็คล้ายขึ้นกับ อิมพีแดนซ์ขาออก Z ที่ต่อกับวงจรดังรูปที่ 4.3 ดังนั้นสามารถเลือก Z โดยใช้องค์ประกอบทางไฟฟ้าชนิดแพสซีฟเช่น R , L , C มาประกอบกัน หรือใช้วงจรแอกทีฟ เช่น ออปแอมป์มาต่อเป็นวงจร integrate ในงานวิจัยนี้จะใช้การ integrate เป็นแบบแพสซีฟ 2 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบกัน เนื่องจากสร้างง่ายและราคาถูก ได้แก่ ชนิด self integrator และ RC integrator โดยอิมพีแดนซ์ขาออกที่ใส่จะมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์ X_c เพราะค่าความจุไฟฟ้าของขดลวดแต่ละรอบรวมกันมีค่าต่ำมากๆ (หน่วยเป็น pF)

การออกแบบ integrator ก่อนอื่นจะต้องพิจารณาผลตอบเชิงความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัดก่อน โดยการใช้โปรแกรม PSPICE [8] ทำการแปลงฟูเรียร์กระแสอิมพัลส์รูปคลื่น $8/20 \mu\text{s}$ และ $4/10 \mu\text{s}$ ที่ระดับ 75 kA ดังรูปที่ 4.4 ผลตอบเชิงความถี่ของกระแสอิมพัลส์ (a) รูปคลื่น $8/20 \mu\text{s}$ และ (b) รูปคลื่น $4/10 \mu\text{s}$



(a)



(b)

รูปที่ 4.4 ผลตอบเชิงความถี่ของกระแสมัลส์ (a) รูปคลื่น 8/20 μs และ (b) รูปคลื่น 4/10 μs

จากผลตอบเชิงความถี่ของรูปคลื่นกระแสมัลส์พบว่า รูปคลื่น 8/20 μs มีองค์ประกอบทางความถี่ส่วนใหญ่อยู่ที่ความถี่ 12.5 kHz และสำหรับรูปคลื่น 4/10 μs จะมีองค์ประกอบทางความถี่ส่วนใหญ่อยู่ที่ความถี่ 25 kHz ดังนั้นการออกแบบโรกอปัสต์ก็คอยล์จะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขดังนี้ [14]

- 1) ผลตอบสนองความถี่ของอินทิเกรเตอร์ต้องให้ความถี่ในช่วงต้องการวัดผ่านได้มากที่สุด
- 2) ค่าคงตัวเวลาในการ integrate τ ซึ่งแสดงถึงความกว้างพัลส์ (Pulse width) โดยค่าที่ได้จากการ integrate จะผิดพลาดไม่เกิน 10% เมื่อค่าคงตัวเวลาในการ integrate มีค่าน้อยกว่า 10 เท่าของความกว้างสัญญาณพัลส์ที่ต้องการวัด

4.3 การออกแบบสร้างคอยล์

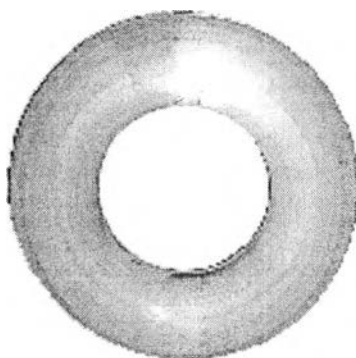
การออกแบบสร้างคอยล์ เพื่อให้การวัดกระแสอิมพัลส์ใกล้เคียงกับรูปคลื่นจริงมากที่สุด จะต้องคำนึงถึง วัสดุที่ใช้ทำแกนขดลวดที่ต้องไม่อิ่มตัวเมื่อนำไปวัดกระแสสูง การพันขดลวดเพื่อป้องกันผลของสนามแม่เหล็กจากภายนอก และการชิลด์เพื่อป้องกันผลการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าจากภายนอก

คอยล์ที่ทำการออกแบบสร้างประกอบด้วย แกนขดลวด ขดลวด และการชิลด์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 แกนขดลวด

โรกอปสก็คคอยล์ออกแบบมาเพื่อวัดกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเช่น กระแสอิมพัลส์ โดยอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ ด้วยคุณสมบัติที่เด่นกว่าอุปกรณ์วัดที่อาศัยเทคนิคเดียวกัน เช่น หม้อแปลงกระแสที่ใช้แกนเป็นสารแม่เหล็ก ซึ่งจะเกิดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กได้ ขณะที่โรกอปสก็คคอยล์ใช้แกนเป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก ทำให้ไม่เกิดการอิ่มตัวของแกนขดลวด ดังนั้นเมื่อนำโรกอปสก็คคอยล์ไปวัดกระแสที่มีขนาดกระแสสูงๆ ทำให้รูปคลื่นกระแสที่วัดได้ถูกต้อง

โรกอปสก็คคอยล์ที่ออกแบบจะใช้แกนที่ทำด้วยอะคริลิค ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก โดยกลึงเป็นรูปทอรอยด์ดังรูปที่ 4.5



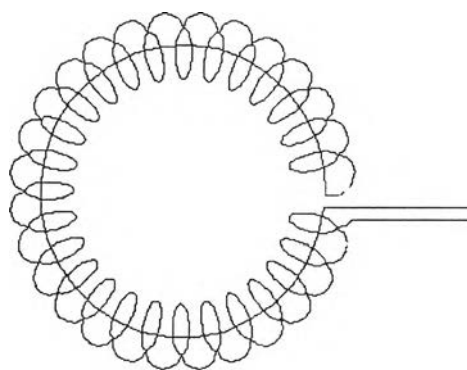
รูปที่ 4.5 แกนขดลวด

4.3.2 ขดลวด

การวัดกระแสอิมพัลส์ของโรกอปสก็คคอยล์อาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กตามกฎของแอมแปร์ โดยการวัดจะมีความถูกต้องก็ต่อเมื่อพื้นที่หน้าตัด และความหนาแน่นของรอบ

คงที่ตลอดช่วงความยาวแกน ดังนั้นในการพันขดลวดจึงต้องคำนึงถึงความสม่ำเสมอของพื้นที่หน้าตัดและรอบด้วย

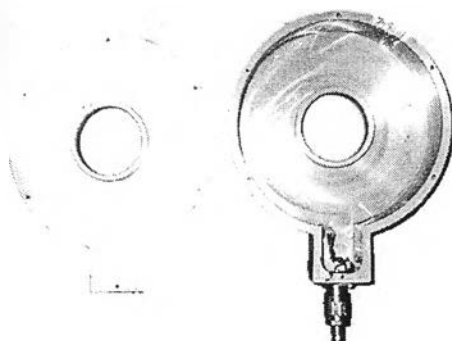
รูปคลื่นกระแสที่วัดได้จะมีความถูกต้องแม่นยำก็ต่อเมื่อ สนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในขดลวดต้องมาจากแหล่งกำเนิดที่ต้องการวัดเพียงอย่างเดียว ไม่มีผลจากสนามแม่เหล็กภายนอก ด้วยเหตุนี้ลักษณะการพันขดลวดของโรกอปสก็คอยล์จึงมีความพิเศษ คือต้องมีการพันย้อนกลับเข้าไปในแกนของขดลวด เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน [15] ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การพันขดลวด

4.3.3 การชิลด์

ในขณะที่ทำการวัดกระแสอิมพัลส์ นอกจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสอิมพัลส์แล้ว ก็ยังจะเกิดสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาขนาดสูงเกิดขึ้นด้วย ทำให้เกิดการคาบเกี่ยวแบบคาปาซิทีฟ (Capacitive coupling) ขึ้นในตัวนำมีผลให้การวัดผิดพลาดไป ดังนั้นเพื่อให้ผลที่วัดได้ถูกต้องจึงต้องมีการชิลด์สนามไฟฟ้างกล่าว กล่องชิลด์โรกอปสก็คอยล์ที่เลือกใช้ทำจากอะลูมิเนียมดังรูปที่ 4.7

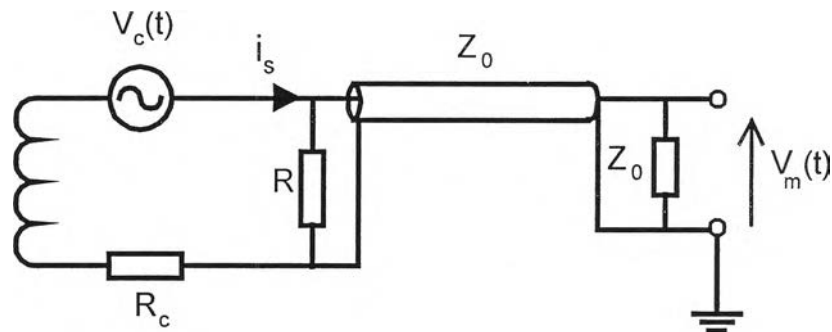


รูปที่ 4.7 กล่องชิลด์สนามไฟฟ้า

4.4 โรกอปสกีคอล์ยชนิด self integrator

4.4.1 หลักการโรกอปสกีคอล์ยชนิด self integrator

วงจร self integrator คือ วงจรที่ต่อขาออกของโรกอปสกีคอล์ยด้วยความต้านทานค่าต่ำ โดยมีเงื่อนไขคือ $\omega L_c \gg (R + R_c)$ [15] ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลโรกอปสกีคอล์ยชนิด self integrator

ความหมายในรูปวงจร :

V_c = แรงดันเหนี่ยวนำ

L_c = ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอปสกีคอล์ย

R_c = ความต้านทานของขดลวดโรกอปสกีคอล์ย

R = ความต้านทานโหลด

Z_0 = เสรีจิมพีแดนซ์ของสายวัดและแมทชิงอิมพีแดนซ์

V_m = แรงดันที่วัดได้

จากรูปที่ 4.8 สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระแส กับแรงดันเหนี่ยวนำ ได้ดังนี้ [15]

$$V_c = M \frac{di_p}{dt} = L_c \frac{di_s}{dt} + i_s (R_c + R) \quad (4.9)$$

เนื่องจากการวัดกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงเช่น กระแสอิมพัลส์ จะได้ว่า

$$L_c \frac{di_s}{dt} \gg i_s (R_c + R) \quad \text{ดังนั้น}$$

$$V_c(t) = L_c \frac{di_s}{dt} \quad (4.10)$$

ทำการ integrate จะได้กระแสที่เหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด

$$i_s(t) = \frac{1}{L_c} \int V_c(t) dt \quad (4.11)$$

และแรงดันที่วัดได้

$$V_m(t) = i_s(t) \cdot R \quad (4.12)$$

แทน i_s จาก (4.11) ลงใน (4.12) จะได้

$$V_m(t) = \frac{R}{L_c} \int V_c(t) dt \quad (4.13)$$

แทนค่า $V_c(t)$ จาก (4.9) ลงใน (4.13) จะได้

$$V_m(t) = \frac{R}{L_c} M \cdot i_p(t) \quad (4.14)$$

จากสมการที่ (4.14) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้ กับกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัด ในการออกแบบสร้างโรกอปสกีคอยล์ นอกจากต้องคำนึงถึงขนาดแรงดันที่วัดได้แล้ว ยังต้องคำนึงถึงผลตอบสนองของวงจรมีขงวงจรด้วย จากสมการที่ (4.9) ทำการแปลงลาปลาซ

$$M i_p(s) = I_s(s) [sL_c + R_c + R] \quad (4.15)$$

จัดรูปใหม่เป็น

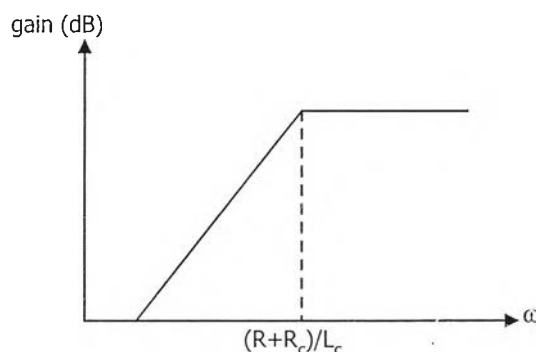
$$\frac{I_s(s)}{I_p(s)} = \frac{Ms}{sL_c + R_c + R} \quad (4.16)$$

จาก $V_m(s) = I_s(s) \cdot R$ จะได้

$$\frac{V_m(s)}{I_p(s)} = \frac{R \cdot Ms}{R + R_c + L_c s} = \frac{(R \cdot M / L_c) s}{s + (R + R_c) / L_c} \quad (4.17)$$

จากสมการที่ (4.17) สามารถเขียนผลตอบสนองของวงจรมีขงวงจร self integrator ที่เป็นวงจรรองความถี่สูงผ่านดังรูปที่ 4.9 โดยมีความถี่หักมุม

$$\omega_1 = \frac{R + R_c}{L_c} \quad (4.18)$$



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองของวงจรมีขงวงจร self integrator

4.4.2 การออกแบบสร้างโรกอปสกีคอยล์ชนิด self integrator

โรกอปสกีคอยล์ชนิด self integrator ที่ออกแบบสร้างขึ้น จะอาศัยหลักการดังได้กล่าวแล้ว โดยแรงดันที่ต้องการวัดได้ $V_m = 10 \text{ V}$ สำหรับค่ายอดกระแสอิมพัลส์ $\hat{I} = 100 \text{ kA}$ โรกอปสกีคอยล์ที่สร้างขึ้นจะใช้ลวดทองแดงอาบฉนวน ที่ทนอุณหภูมิได้สูงถึง $105 \text{ }^\circ\text{C}$ [7] เนื่องจากการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอปสกีคอยล์ จะไม่มีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากับวงจรที่ต้องการวัด ทำให้พลังงานที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำมีขนาดต่ำ การจำลองการทำงานของโรกอปสกีคอยล์โดยใช้ PSPICE [8] ได้พลังงานที่เกิดขึ้นด้านคอยล์ 1.2 J ดังนั้นปัจจัยสำคัญในการเลือกขนาดลวดขึ้นกับเงื่อนไขที่ต้องการคือ $\omega L_c \gg (R + R_c)$ นั่นคือกรณีของโรกอปสกีคอยล์ชนิด self integrator จะต้องการค่าความเหนี่ยวนำ L_c ที่สูง ขณะที่ความต้านทาน R_c ต่ำ การเพิ่มจำนวนรอบจะทำให้ได้ค่า L_c ที่เพิ่มขึ้นมากกว่าการเพิ่มของ R_c ดังนั้นจึงเลือกใช้ลวดขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm เนื่องจากสามารถพันให้สม่ำเสมอได้ด้วยมือ รายละเอียดการคำนวณมิติของโรกอปสกีคอยล์แสดงอยู่ในภาคผนวก ข ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ของโรกอปสกีคอยล์ชนิด self integrator ดังนี้

$$\text{จำนวนรอบของขดลวด, } N = 304 \text{ รอบ}$$

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

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

$$\text{ความต้านทานขดลวด, } R_c = 3.0 \text{ } \Omega$$

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

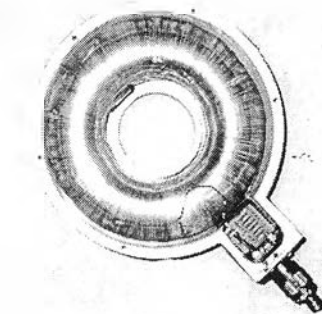
ดังนั้นจำนวนรอบของขดลวดต่อความยาว, $n = 304/21.36 = 14.2 \text{ รอบ / cm}$ จะได้

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

ดังนั้นจะได้

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

ซึ่งจะทำได้โดยใช้ความต้านทาน $0.5 \text{ } \Omega$ ขนานกัน 14 ตัว โรกอปสกีคอยล์ที่สร้างเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 4.10



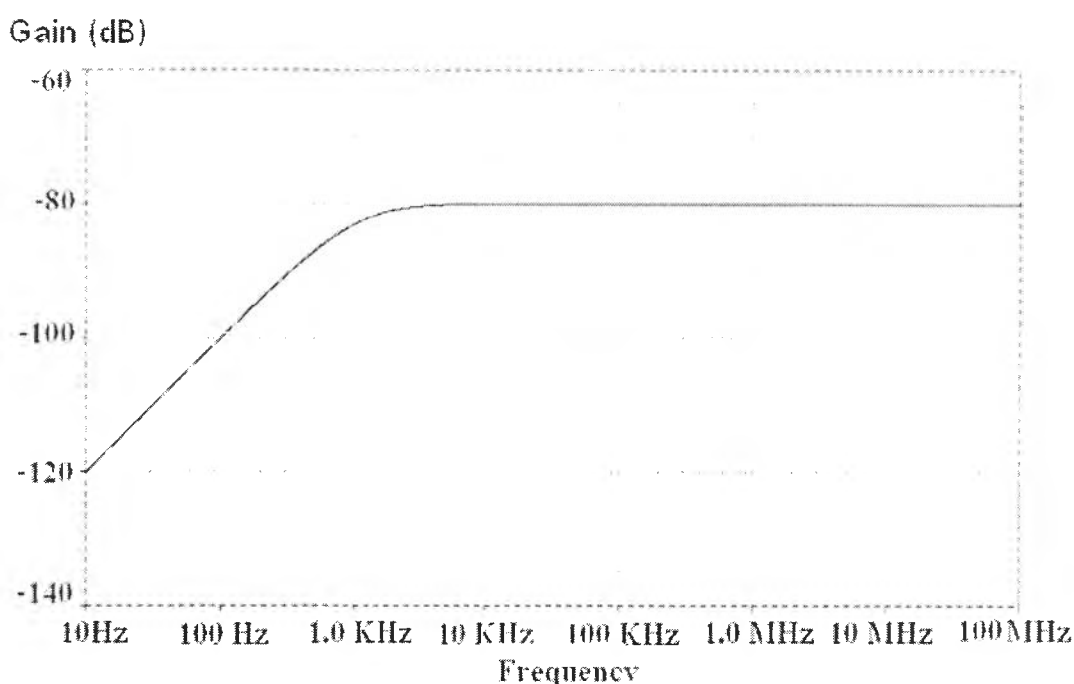
รูปที่ 4.10 โรกอปสกีคอยล์ชนิด self integrator

ความถี่หักมุมด้านความถี่ต่ำของโรกอปสกีคอยล์ชนิด self integrator ที่สร้างขึ้น

$$\omega_l = \frac{R + R_c}{L_c}$$

$$= 4.67 \times 10^3 \text{ rad/s} \quad \text{หรือ} \quad f_l = 743 \text{ Hz}$$

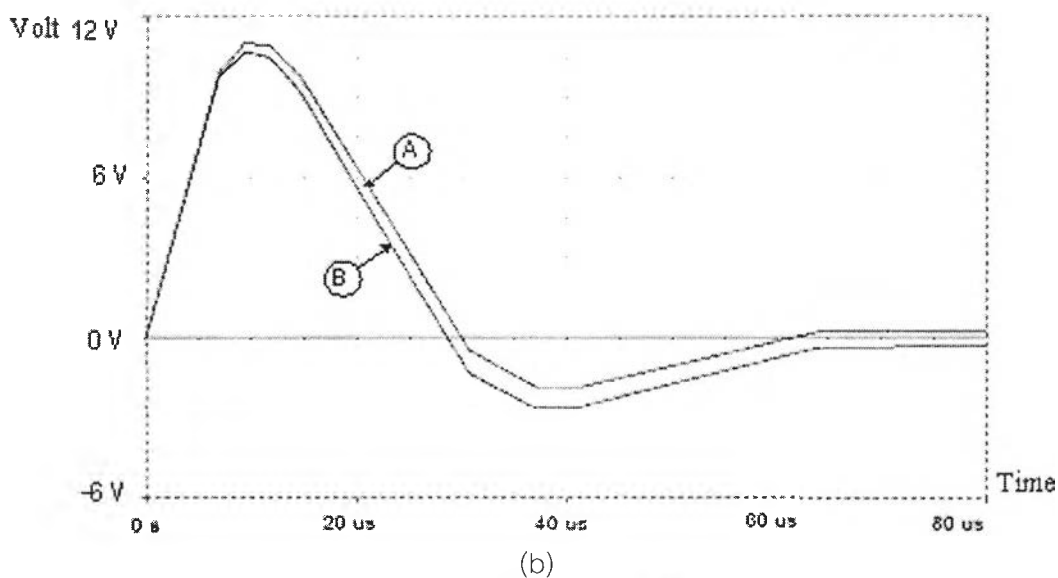
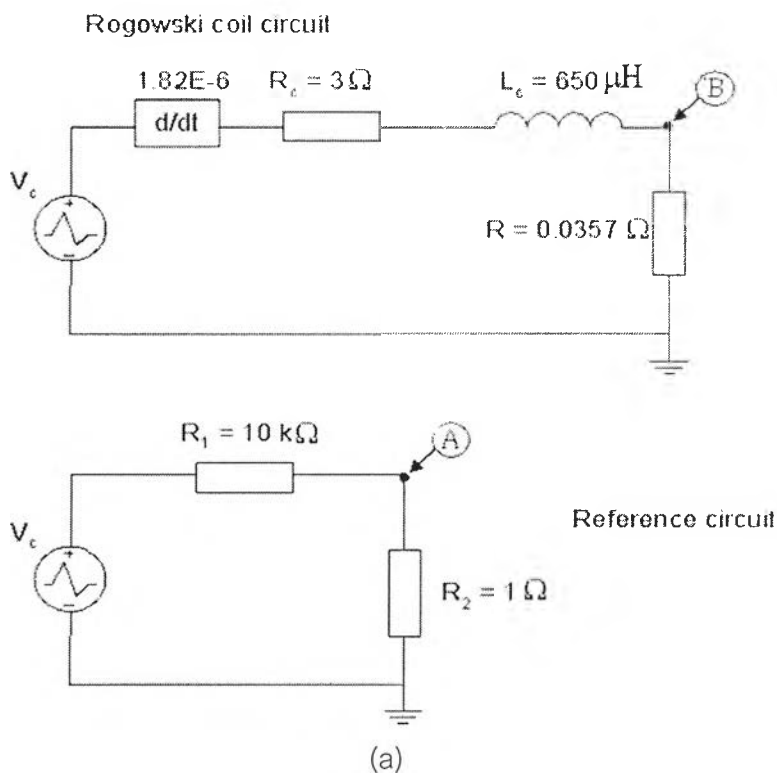
โรกอปสกีคอยล์ชนิด self integrator ที่สร้างขึ้นจะมีกราฟผลตอบแทนของความถี่ของวงจรที่คำนวณได้จากโปรแกรม PSPICE [8] ดังรูปที่ 4.11 โดยมีค่าคงตัวเวลา $\tau = L / (R + R_c) = 216 \mu\text{s}$ ซึ่งมีค่ามากกว่า 10 เท่าของความกว้างพัลส์ที่ต้องการวัดได้ตามเงื่อนไข



รูปที่ 4.11 ผลตอบแทนของความถี่ของโรกอปสกีคอยล์ชนิด self integrator

จากผลตอบแทนของความถี่ดังรูปที่ 4.11 พบว่าโรกอปสกีคอยล์ชนิด self integrator ที่สร้างขึ้นนั้น จะมีผลตอบแทนของความถี่เป็นแบบความถี่สูงผ่าน โดยมีแบนด์วิดท์ (-3dB) เริ่มตั้งแต่ 1 kHz เป็นต้นไป

รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่วัดได้จากโรกอปสกีคอยล์ที่สร้างขึ้น สามารถจำลองได้โดยใช้โปรแกรม PSPICE [8] แต่เนื่องจากในโปรแกรม PSPICE ไม่มีฟังก์ชันที่เปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน การจำลองจึงใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขนาด 100 kV โดยสร้างจากการประมาณเชิงเส้นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs ขนาด 100 kA ผ่านดิฟเฟอเนเชียลที่มีอัตราขยาย 1.82×10^{-6} เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากวงจรอ้างอิงซึ่งมีอัตราขยาย = $10\text{V} / 100\text{kA} = -80 \text{ dB}$ ดังรูปที่ 4.12 (a) วงจรที่ใช้ในการจำลอง และ (b) รูปคลื่นกระแสที่จำลองได้



A - Reference, B - โรกอสกีคอยล์

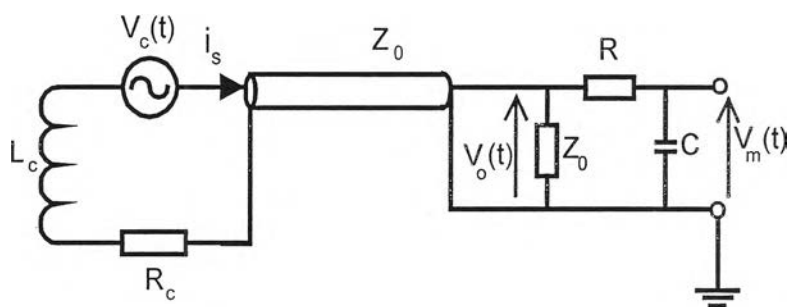
รูปที่ 4.12 การจำลองรูปคลื่นที่ได้จากโรกอสกีคอยล์ self integrator

จากผลการจำลองรูปคลื่นที่วัดได้จากโรกอสกีคอยล์ที่ออกแบบนั้น พบว่ามีความใกล้เคียงกับรูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัดโดยมีความคลาดเคลื่อนทางเวลาอยู่ 9% ซึ่งจะทำให้การทดสอบและประเมินผลต่อไป

4.5 โรกอปสกีคอยล์ชนิด RC integrator

4.5.1 หลักการโรกอปสกีคอยล์ชนิด RC integrator

วงจร RC integrator คือ วงจรที่ต่อความต้านทานค่าสูง ($R \gg Z_0$) อนุกรมเข้ากับตัวเก็บประจุ แล้ววัดแรงดันขาออกที่ตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งมีผลตอบสนองของความถี่เป็นวงจรรองความถี่แถบผ่าน โดยมีเงื่อนไขด้านความถี่สูง คือ $\omega_c L_c \ll Z_0$ และ ด้านความถี่ต่ำ $1/\omega_c C \ll R$ [14]



รูปที่ 4.13 วงจรสมมูลโรกอปสกีคอยล์ชนิด RC integrator

จากรูปที่ 4.13 จะได้ความสัมพันธ์ของกระแส กับ แรงดันเหนี่ยวนำ [14]

$$V_c = M \frac{di_p}{dt} = L_c \frac{di_s}{dt} + i_s Z_0 + V_o \quad (4.19)$$

เนื่องจากเงื่อนไขด้านความถี่สูง คือ $\omega_c L_c \ll Z_0$ ดังนั้นจาก (4.19) จะได้

$$V_c = M \frac{di_p}{dt} = i_s Z_0 + V_o \quad (4.20)$$

และทางด้าน RC จะได้

$$V_o = i_s \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right) \quad (4.21)$$

จากเงื่อนไข $\frac{1}{\omega C} \ll R$ จะได้

$$V_o = i_s R \quad (4.22)$$

แทน (4.22) ลงในสมการที่ (4.20)

$$V_c = M \frac{di_p}{dt} = i_s Z_0 + i_s R \quad (4.23)$$

เนื่องจากค่า $R \gg Z_0$ ดังนั้น

$$M \frac{di_p}{dt} = i_s \cdot R \quad (4.24)$$

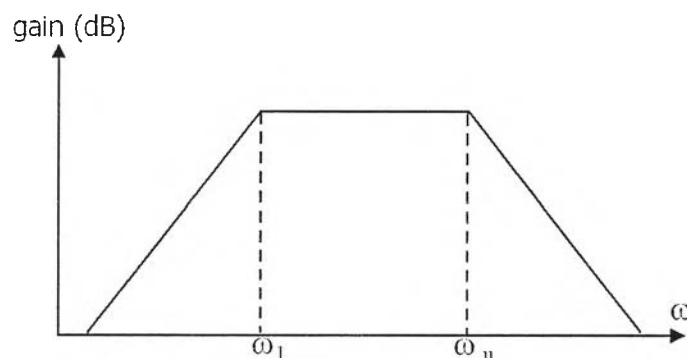
แทน $i_s = C \frac{dV_m}{dt}$ ในสมการที่ (4.24) จะได้

$$M \frac{di_p}{dt} = RC \frac{dV_m}{dt} \quad \text{หรือจะได } V_m(t) = \frac{M}{RC} i_p(t) \quad (4.25)$$

จากสมการที่ (4.25) สามารถเขียนผลตอบสนองความถี่ของวงจร RC integrator ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่แถบผ่านได้ดังรูปที่ 4.14 ที่มีความถี่หักมุมด้านความถี่สูง (ω_u) ดังสมการที่ (4.26) และ ความถี่หักมุมด้านความถี่ต่ำ (ω_l) ดังสมการที่ (4.27)

$$\omega_u \ll \frac{Z_o}{L_c} \quad (4.26)$$

$$\omega_l \gg \frac{1}{RC} \quad (4.27)$$



รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองความถี่ของโรกอปสกีคอยล์ชนิด RC integrator

4.5.2 การออกแบบสร้างโรกอปสกีคอยล์ชนิด RC integrator

โรกอปสกีคอยล์ชนิด RC integrator ที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้ จะอาศัยหลักการดังได้กล่าวแล้ว โดยแรงดันที่ต้องการวัดได้ $V_m = 10$ V สำหรับค่าขดกระแสอิมพัลส์ $i_p = 100$ kA ซึ่งการพันลวดจะใช้ลวดทองแดงอาบฉนวนที่ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 105 °C [16] แต่เนื่องจากพลังงานที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำมีขนาดต่ำ ดังนั้นปัจจัยสำคัญในการเลือกขนาดลวดจะขึ้นกับเงื่อนไขที่ต้องการคือ $\omega L_c \ll Z_o$ จึงเลือกใช้ลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 mm ที่ให้ค่า L_c ที่ต่ำพอ รายละเอียดการคำนวณมิติของโรกอปสกีคอยล์ได้ในภาคผนวก ข ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$\text{จำนวนรอบของขดลวด, } N = 21 \text{ รอบ}$$

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

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

ความต้านทานขดลวด, $R_c = 0.01 \Omega$

ความเหนี่ยวนำขดลวด, $L_c = 2.25 \mu\text{H}$

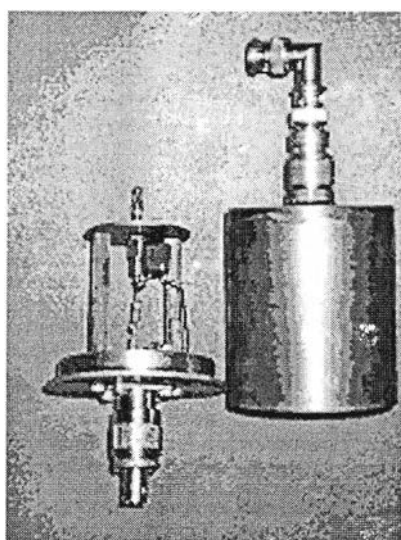
ดังนั้นจำนวนรอบของขดลวดต่อความยาว, $n = 21/21.36 = 1$ รอบ / cm จะได้

$$M = \mu_0 \cdot n \cdot A = 0.14 \mu\text{H}$$

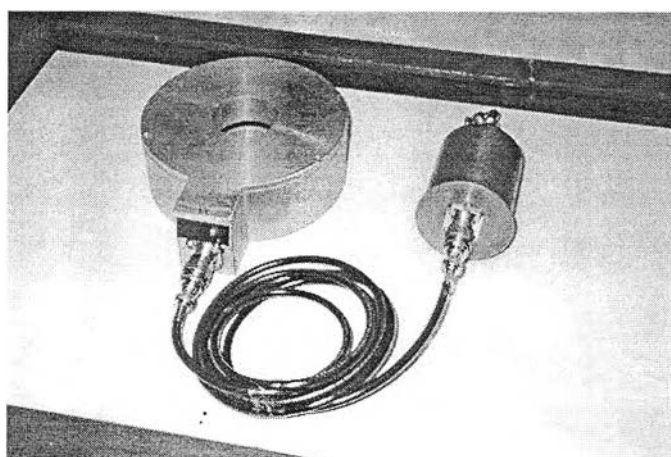
ดังนั้นจาก (4.23) เมื่อเลือกใช้ $C=0.1 \mu\text{F}$ ซึ่งเป็นขนาดที่มีขายทั่วไป ก็จะได้

$$R = \frac{M \cdot I_p}{V_m \cdot C} = 14 \text{ k}\Omega$$

โดยจะเลือกใช้ $R = 10 \text{ k}\Omega$ ซึ่งเป็นขนาดที่มีขายทั่วไปเช่นกัน โรกอปสก็คอยล์ที่สร้างเสร็จแล้วแสดงดังในรูปที่ 4.15 (a) RC Integrator และ (b) โรกอปสก็คอยล์ชนิด RC Integrator



(a)



(b)

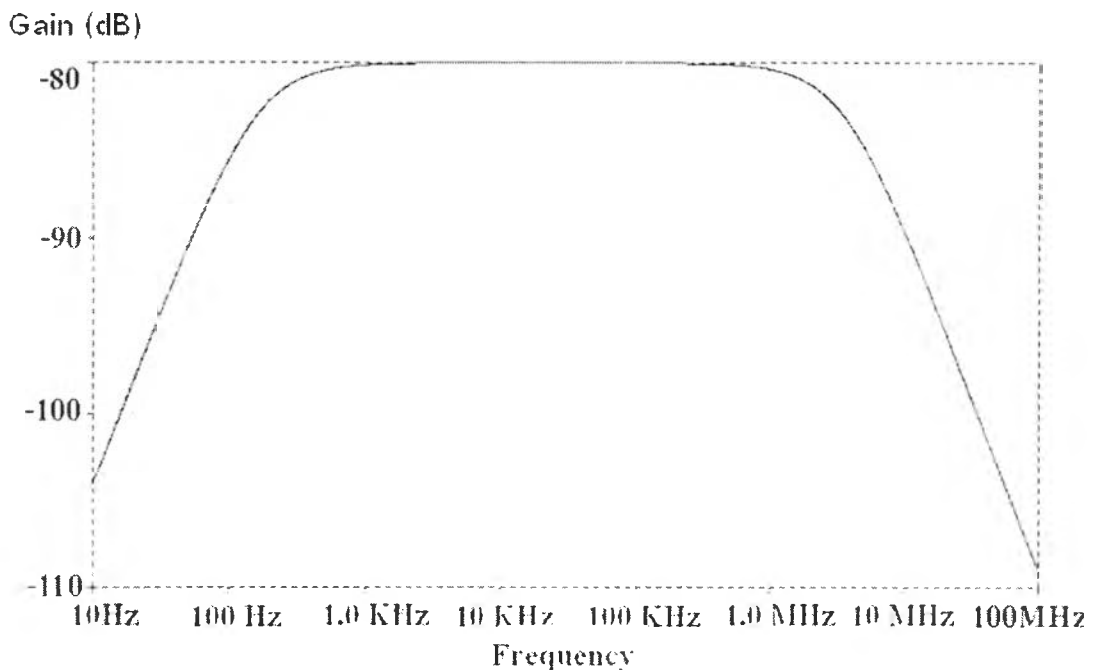
รูปที่ 4.15 (a) RC Integrator (b) โรกอปสก็คอยล์ชนิด RC Integrator

ความถี่หักมุมด้านความถี่ต่ำของโรกอปสกีคอยล์ชนิด RC integrator ที่สร้างขึ้นมีความถี่หักมุมด้านความถี่ต่ำ (ω_l) และ ความถี่หักมุมด้านความถี่สูง (ω_u) ดังนี้

$$\omega_l \gg \frac{1}{RC} = 1/(10 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6}) = 1000 \text{ rad/s หรือ } f_l \gg 159 \text{ Hz}$$

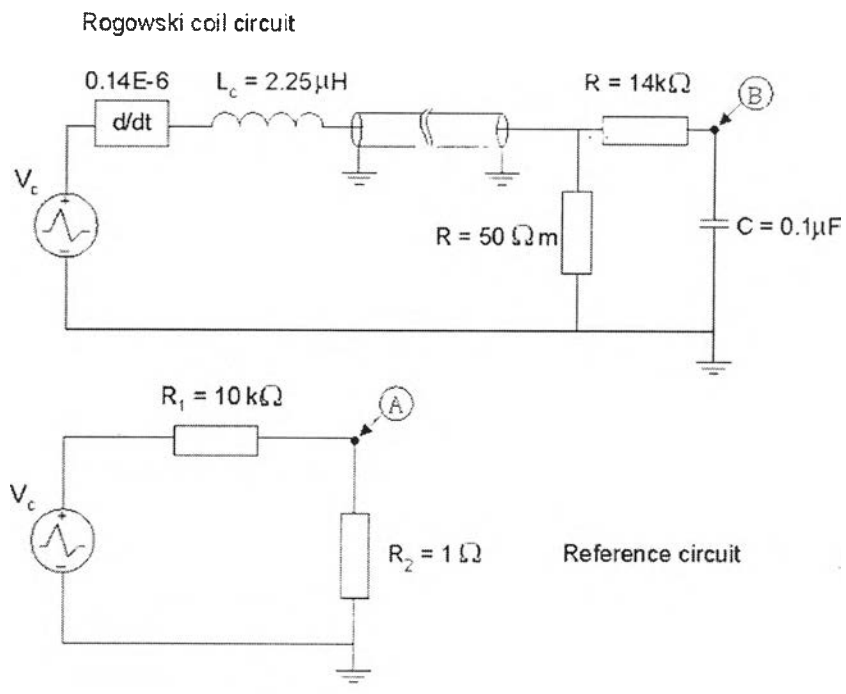
$$\omega_u \ll \frac{Z_o}{L_c} = 50/(2.25 \times 10^{-6}) = 22.22 \times 10^6 \text{ rad/s หรือ } f_u \ll 3.54 \text{ MHz}$$

โรกอปสกีคอยล์ที่สร้างขึ้นจะมีผลตอบสนองของความถี่ของวงจร ที่คำนวณได้จากการใช้โปรแกรม PSPICE [8] ดังรูป 4.16 และได้ค่าคงตัวเวลาของวงจร $\tau = RC = 1000 \mu\text{s}$ ซึ่งมีค่ามากกว่า 10 เท่าของความกว้างพัลส์ได้ตามเงื่อนไข

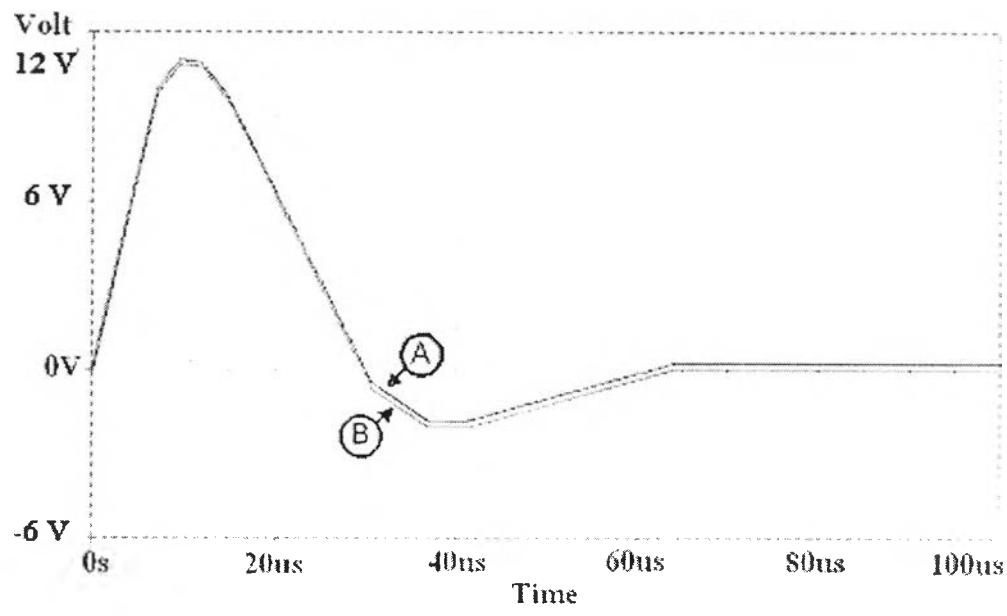


รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองของความถี่ของโรกอปสกีคอยล์ชนิด RC integrator

จากผลตอบสนองความถี่ดังในรูปที่ 4.16 สามารถทำการจำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่วัดได้จากโรกอปสกีคอยล์ที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม PSPICE [8] เนื่องจากในโปรแกรม PSPICE ไม่มีฟังก์ชันที่เปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันได้ การจำลองจึงใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขนาด 100 kV โดยสร้างจากการประมาณเชิงเส้นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $8/20 \mu\text{s}$ ขนาด 100 kA ผ่านดิฟเฟอเนเชียลที่มีอัตราขยาย 0.14×10^6 เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากวงจรอ้างอิงซึ่งมีอัตราขยาย $= 10\text{V} / 100\text{kA} = -80 \text{ dB}$ ดังรูปที่ 4.17 (a) วงจรที่ใช้ในการจำลอง และ (b) รูปคลื่นกระแสที่จำลองได้



(a)



(b)

A - Reference , B - โรกอบปลักคอยล์

รูปที่ 4.17 การจำลองรูปคลื่นที่ได้จากโรกอบปลักคอยล์ชนิด RC integrator

จากผลการจำลองรูปคลื่นที่วัดได้จากโรกอบปลักคอยล์ที่ออกแบบนั้น พบว่ามีความใกล้เคียงกับรูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัด โดยมีความคลาดเคลื่อนทางเวลาอยู่ 0.5% ซึ่งจะทำให้การทดสอบและประเมินผลต่อไป

4.6 การทดสอบและประเมินผลโรกอบสก็คอยล์

การทดสอบดูว่าโรกอบสก็คอยล์ที่ออกแบบสร้างขึ้นมีคุณสมบัติได้ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้หรือไม่ ก่อนนำไปใช้วัดกระแสอิมพัลส์ ทำได้โดยการทดสอบวัดเปรียบเทียบ

การทดสอบวัดเปรียบเทียบเป็นการทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด (Assigned scale factor) และหาพฤติกรรมพลศาสตร์ (Dynamic behavior) ตามมาตรฐาน IEC Publ No. 60-2 [12]

การทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด และการหาพฤติกรรมพลศาสตร์จะเป็นการทดสอบเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงที่ระดับกระแส 20% ของกระแสพิกัด ดังนั้นในกรณีที่กระแสพิกัดของอุปกรณ์วัดมีค่าสูงถึง 100 kA ก็สามารถทำการทดสอบไว้ที่ระดับกระแส 20 kA ในการทดสอบจะอ่านค่าแรงดันจากระบบที่ต้องการวัด และกระแสอินพุทจากระบบวัดอ้างอิง โดยต้องทดสอบไม่น้อยกว่า n ค่า ($n \geq 10$) ตามเงื่อนไขที่มาตรฐานกำหนดไว้คือ

สเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดจะหาได้จากค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยกระแสที่อ่านได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบซึ่งกำหนดให้เป็น F_i การทดสอบทำถึง n ค่าแล้วหาค่าเฉลี่ย F_m ที่จะถือเป็นค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ เมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) ดังสมการที่ (4.28) ต้องน้อยกว่า 1% ของ F_m

$$s = \sqrt{\frac{\sum (F_i - F_m)^2}{n-1}} \quad (4.28)$$

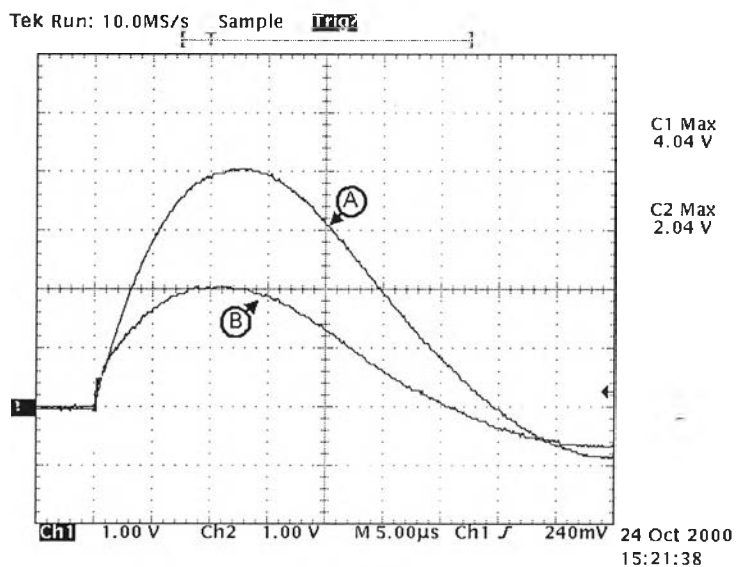
และกรณีพฤติกรรมพลศาสตร์จะพิจารณาจากพารามิเตอร์ทางเวลา ที่แต่ละค่าจะต้องแตกต่างจากค่าที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงไม่เกิน 10% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า 1% ของค่าเฉลี่ย

4.6.1 การทดสอบและประเมินผลโรกอบสก็คอยล์ชนิด self integrator

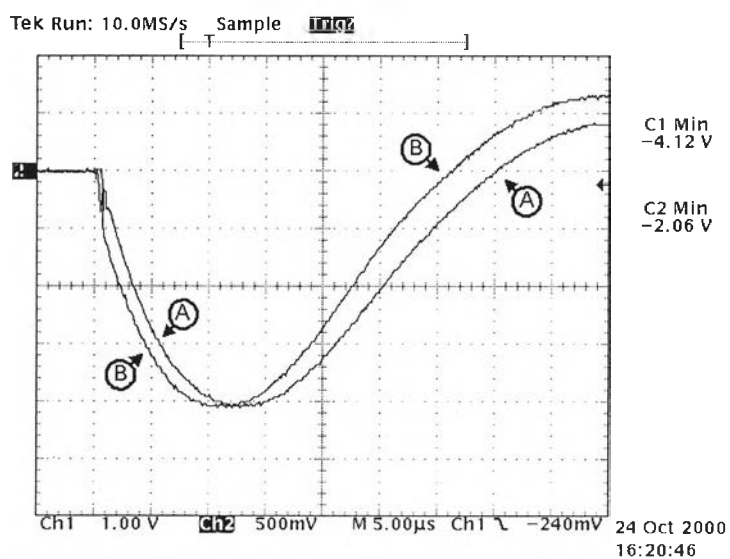
ผลการทดสอบโรกอบสก็คอยล์ชนิด self integrator ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ตัวอย่างรูปคลื่น $8/20 \mu s$ ที่ได้จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 4.18 จากผลการทดสอบพบว่าโรกอบสก็คอยล์ชนิด self integrator ที่ออกแบบสร้างขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนทางเวลาเกินจากเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด โดยเวลาหลังคลื่นมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 10.11% เนื่องจากแบนด์วิดท์ของโรกอบสก็คอยล์ชนิด self integrator จากรูปที่ 4.11 เริ่มตั้งแต่ 1 kHz นั่นคือองค์ประกอบของสัญญาณ ณ ความถี่ต่ำกว่านี้จะถูกลดทอน ทำให้รูปคลื่นสัญญาณกระแสอิมพัลส์ที่วัดจากโรกอบสก็คอยล์ ชนิด self integrator มีเวลาหน้าคลื่น และเวลาหลังคลื่นคลาดเคลื่อนไปจากรูปคลื่นจริง โดยเฉพาะหลังคลื่น ที่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยองค์ประกอบความถี่ต่ำ

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดเปรียบเทียบโรกอปสกีคอยล์ชนิด self integrator ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s

ขั้วแรงดัน	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 - โรกอปสกีคอยล์

รูปที่ 4.18 ตัวอย่างรูปคลื่นเปรียบเทียบของโรกอปสกีคอยล์ชนิด self integrator รูปคลื่น 8/20 μ s

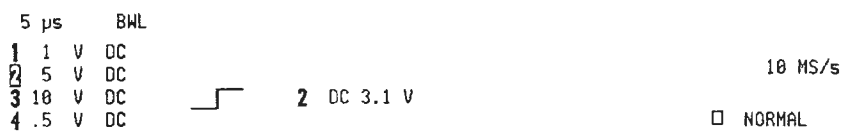
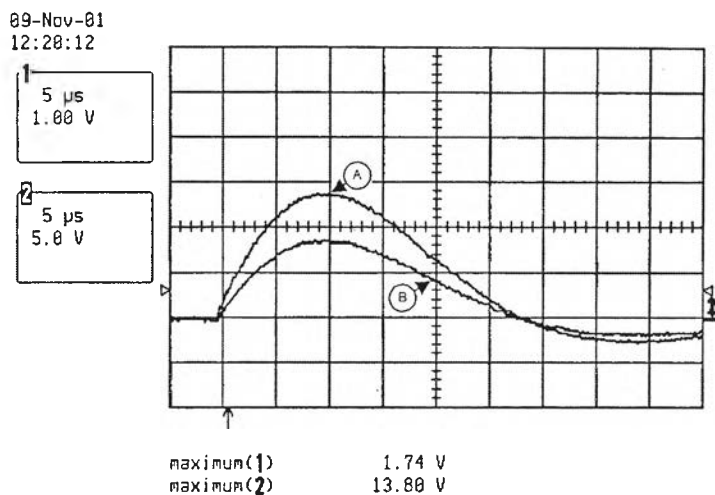
จากผลการทดสอบพบว่าโรกออสกัยคอยล์ชนิด self integrator ที่ออกแบบสร้างขึ้นยังมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ไม่ผ่านตามมาตรฐานกำหนดอยู่ ดังนั้นจะทำการเปรียบเทียบกับผลของโรกออสกัยคอยล์ชนิด RC integrator เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นต่อไป

4.6.2 การทดสอบและประเมินผลโรกออสกัยคอยล์ชนิด RC integrator

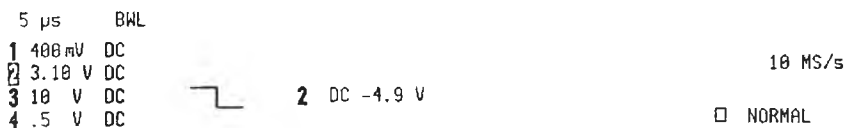
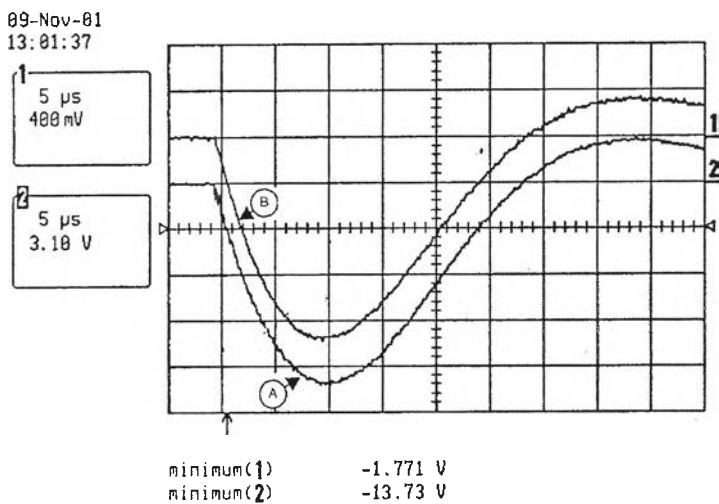
ผลการทดสอบ โรกออสกัยคอยล์ชนิด RC integrator ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s ดังตารางที่ 4.2 และ รูปคลื่น 4/10 μ s ดังตารางที่ 4.3 ตัวอย่างรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบวัดปรับเทียบ แสดงในรูปที่ 4.19 รูปคลื่น 8/20 μ s และ รูปที่ 4.20 สำหรับรูปคลื่น 4/10 μ s จากผลการทดสอบพบว่าโรกออสกัยคอยล์ชนิด RC integrator ที่ออกแบบสร้างขึ้นให้ผลการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดคือ ค่าเฉลี่ยของสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) น้อยกว่า 1% และพฤติกรรมพลศาสตร์ที่พิจารณาจากพารามิเตอร์ทางเวลามีค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำมาก คือเวลาหน้าคลื่นมีค่าความคลาดเคลื่อน 1 % และเวลาหลังคลื่นมีค่าความคลาดเคลื่อน 0.07 % จากที่มาตรฐานกำหนดให้คลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 10 % เนื่องจากแบนด์วิดท์ของโรกออสกัยคอยล์ชนิด RC integrator ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ของรูปคลื่นที่ต้องการวัดคือเริ่มตั้งแต่ 159 Hz - 3.54 MHz ทำให้องค์ประกอบของสัญญาณทั้งความถี่ต่ำและความถี่สูง ที่จะถูกลดทอนนั้นมีค่าน้อยกว่าโรกออสกัยคอยล์ชนิด self integrator

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดปรับเทียบโรกออสกัยคอยล์ชนิด RC integrator ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s

ชั่วแรงแต้น	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



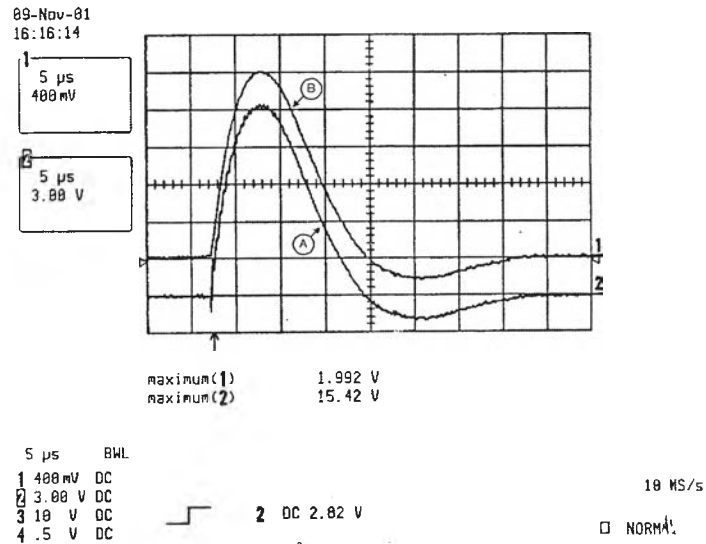
(b) ขั้วลบ

A - Reference , B - โรกอปัสก์คอยล์

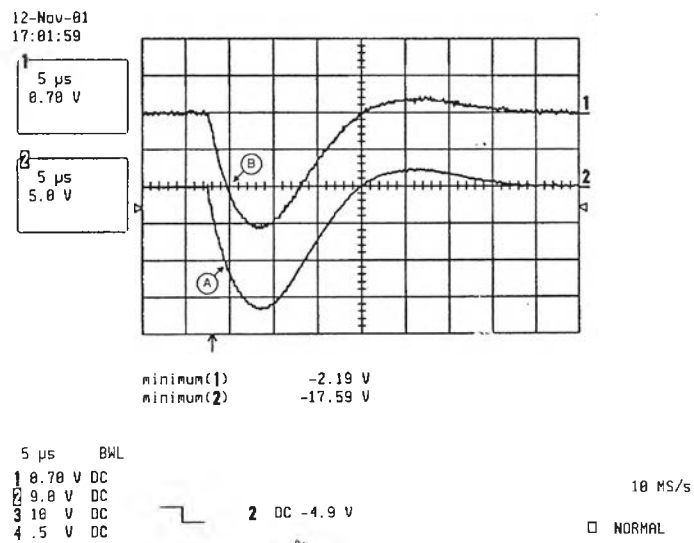
รูปที่ 4.19 ตัวอย่างรูปคลื่นเปรียบเทียบของโรกอปัสก์คอยล์ชนิด RC integrator รูปคลื่น 8/20 μ s

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดเปรียบเทียบโรกอปสติกคอยล์ชนิด RC integrator ด้วยรูปคลื่น 4/10 μ s

ชื่อแรงดัน	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) ชั่วบวก



(b) ชั่วลบ

A - Reference , B - โรกอปสติกคอยล์

รูปที่ 4.20 ตัวอย่างรูปคลื่นเปรียบเทียบของโรกอปสติกคอยล์ชนิด RC integrator รูปคลื่น 4/10 μ s

จากผลการทดสอบพบว่า ไรกอปัสทีคอยล์ชนิด RC integrator ที่ออกแบบสร้างขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนทางเวลาได้ตามมาตรฐาน ดังนั้นจะใช้ไรกอปัสทีคอยล์ชนิด RC integrator เป็นอุปกรณ์วัดกระแสิมพัลส์ สำหรับการทดสอบสร้างกระแสิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดกระแสิมพัลส์ ทั้งรูปคลื่น 8/20 μs และ 4/10 μs รวมทั้งการทดสอบใช้งานจริงได้แก่ การทดสอบกับดักเสิร์จ เพื่อหาค่าแรงดันค้างเหลือ โดยใช้กระแสิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 μs และการทดสอบความคงทนต่อกระแสิมพัลส์ของกับดักเสิร์จ โดยใช้กระแสิมพัลส์รูปคลื่น 4/10 μs