

การออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแบบใหม่ของวงจรทดสอบ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ

New Circuit Parameter Design of Lightning Impulse Voltage Testing Circuit for Low-Inductance Loads

สุรศักดิ์ น้อยหอม พิรุฒธิ ยุทธโกวิท และ ศักดา มณีโรจน์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแบบใหม่สำหรับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อทดสอบโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เช่น ขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า ขดลวดเหนี่ยวนำชนิดแกนอากาศ เป็นต้น โดยใช้วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่เรียกว่าวงจรเกลนิงเงอร์ (Glaninger's circuit) ในการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อให้ได้ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันเป็นไปตามที่มาตรฐาน IEC60060-1:2010 ได้กำหนดไว้ โดยที่มาตรฐานได้กำหนดให้เวลาน้ำขึ้นเท่ากับ $1.2 \mu s \pm 30\%$ และเวลาหลังคลื่นเท่ากับ $50 \mu s \pm 20\%$ และมีค่ายอดกลับขึ้นแรงดันไม่เกิน 50% ของแรงดันสูงสุด จากการทดสอบวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบปกติจะไม่สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันให้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดได้เมื่อทดสอบกับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เนื่องจากเวลาหลังคลื่นจะน้อยกว่า $40 \mu s$ แต่วงจรเกลนิงเงอร์สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันให้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดได้ อย่างไรก็ตามวิธีการเลือกค่าองค์ประกอบของวงจรเกลนิงเงอร์แบบดั้งเดิมที่แนะนำให้เสนอในบทความก่อนหน้านี้พบว่ารูปคลื่นที่สร้างมีความผิดเพี้ยนไปจากมาตรฐานกำหนดอย่างมาก ดังนั้นในบทความนี้จึงได้นำเสนอการคำนวณค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแบบใหม่ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่เป็นระบบ และเพื่อยืนยันการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าจึงถูกตรวจสอบการทำงานด้วยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทำการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

คำสำคัญ : ความเหนี่ยวนำต่ำ, เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์, วงจรเกลนิงเงอร์, แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า, หม้อแปลงไฟฟ้า

Abstract

This paper presents new circuit parameter design of the lightning impulse voltage generator for testing low inductance load, such as low voltage winding of transformers and air core reactors using the impulse voltage generation circuit called Glaninger's circuit to generate the lightning impulse voltage in order to obtain lightning impulse voltage waveform according to IEC60060-1 standard requirement. The IEC standard defines the lightning impulse voltage waveform parameters and tolerance as follows; front time is $1.2 \mu s \pm 30\%$, time to half is $50 \mu s \pm 20\%$, and under-shoot shall not exceed 50% of the peak voltage.

From the experiment, the conventional impulse voltage generation circuit cannot generate the impulse voltage according to the IEC standard requirement when low inductance load was tested because time to half of the generated voltage will be less than 40 μs , but Glaninger's circuit can generate the impulse voltage of which waveform parameters according to the IEC standard requirement. However, it is found that in the previous literatures the approach to select the circuit parameters for Glaninger's circuit cannot provide the waveforms according to the standard requirement. Therefore, this paper presents the systematic parameters calculation of an impulse voltage generator. To verify the design in this paper, the designed parameters were simulated by computer program and practically tested in a high voltage laboratory.

Keywords: Impulse voltage generator, Glaninger's circuit, Low inductance loads, Lightning impulse voltage tests

1. บทนำ

ในการติดตั้งใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายและจำหน่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปมักติดตั้งใช้งานกลางแจ้ง ซึ่งอุปกรณ์ไฟฟ้าอาจจะได้รับความเสียหายจากแรงดันเกินที่เกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะแรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่า มาตรฐานจึงได้กำหนดให้มีการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse voltage) [1-2] ก่อนทำการติดตั้งใช้งานจริง เพื่อเป็นการยืนยันว่าอุปกรณ์สามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ได้ตามระดับการประสานสัมพันธ์ฉนวน (Insulation coordination) ที่สอดคล้องกับระดับแรงดันใช้งานของอุปกรณ์นั้น

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบจากแรงดันเกินที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ซึ่งวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าอาศัยหลักการความสัมพันธ์ระหว่างตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ โดยจะแบ่งออกเป็นตัวเก็บประจุอิมพัลส์ ตัวเก็บประจุโหลด ตัวต้านทานหน้าคลื่น และตัวต้านทานหลังคลื่น ประกอบเป็นวงจรเพื่อสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC60060-1:2010 ซึ่งมาตรฐานกำหนดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ให้มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ และเวลาหลังคลื่น $50 \mu\text{s} \pm 20\%$

[1] รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเมื่อวัตถุทดสอบเป็นโหลด

ชนิดตัวเก็บประจุ จะสามารถใช้วิธีการปรับค่าความต้านทานหน้าคลื่น และค่าความต้านทานหลังคลื่นได้ แต่เมื่อเปลี่ยนวัตถุทดสอบเป็นโหลดชนิดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เมื่อใช้วิธีการปรับค่าความต้านทานหน้าคลื่น และค่าความต้านทานหลังคลื่นในบางกรณีรูปคลื่นยังผิดเพี้ยนไปจากที่มาตรฐานกำหนด เพื่อให้การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้ แกลนิงเกอร์และนักวิจัย [3] ได้นำเสนอวงจรและวิธีการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า เพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำได้ อย่างไรก็ตามพบว่า วงจรที่ออกแบบนั้นยังให้รูปคลื่นที่สร้างมีความผิดเพี้ยนไปจากมาตรฐานกำหนดอย่างมาก

ในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบขององค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่สามารถใช้กับโหลดที่เป็นค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ($0.4 \text{ mH} \leq L \leq 4 \text{ mH}$) เพื่อให้ได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐานกำหนด โดยใช้วิธีการปรับค่าความต้านทานหน้าคลื่น ค่าความต้านทานหลังคลื่น เพิ่มตัวเหนี่ยวนำขนานกับตัวต้านทานหน้าคลื่น และเพิ่มตัวต้านทานขนานกับโหลด จากการจำลองการออกแบบองค์ประกอบทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

และจากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง วิธีการที่นำเสนอสามารถใช้ในการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้ตามมาตรฐาน

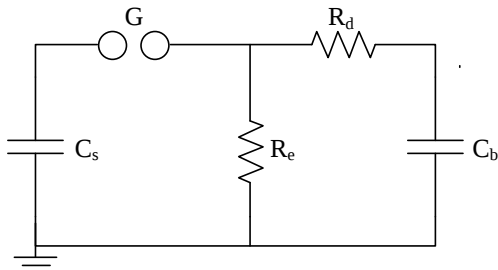
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

ในการทดสอบแรงดันสูง แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าถูกสร้างขึ้นโดยวงจรมาร์ก (Marx's circuit) [4] ที่ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน (C_s) ตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ตัวต้านทานปรับหลังคลื่น (R_e) และตัวเก็บประจุโหลด (C_b) ซึ่งค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่นและตัวเก็บประจุโหลดจะควบคุมเวลาหน้าคลื่น (T_1) ส่วนค่าความต้านทานปรับหลังคลื่นและค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์จะควบคุมเวลาหลังคลื่น (T_2) โดยที่เวลาหน้าคลื่น และเวลาหลังคลื่นต้องสอดคล้องตามมาตรฐาน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$T_1 = k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \quad (1)$$

$$T_2 = k_1 R_e (C_b + C_s) \quad (2)$$



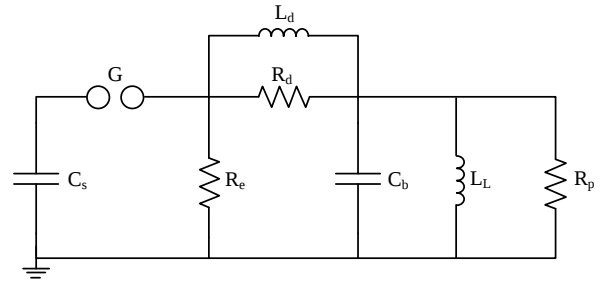
รูปที่ 1 วงจรพื้นฐานในการสร้างแรงดันอิมพัลส์

วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พื้นฐานเมื่อทำการทดสอบกับโหลดชนิดตัวเหนี่ยวนำต่ำพบว่า วงจรกำเนิดแรงดันสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด โดยที่เวลาหลังคลื่นจะน้อยกว่า $40 \mu s$

2.2 วงจรของเกลนิงเกอร์

จากวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พื้นฐานเกลนิงเกอร์ (Glaninger) [3], [5] ได้แนะนำให้เพิ่มค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า คือ เพิ่มตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกับตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) และเพิ่มตัวต้านทานขนาน

วัตถุทดสอบ (R_p) ดังที่ได้มีการแสดงไว้ในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นวงจรที่ถูกพัฒนาเพื่อให้สร้างแรงดันอิมพัลส์ที่สามารถทดสอบกับโหลดชนิดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ โดยที่วงจรเกลนิงเกอร์ ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน (C_s) ตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ตัวต้านทานปรับหลังคลื่น (R_e) ตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (L_d) และตัวต้านทานขนานโหลดทดสอบ (R_p)



รูปที่ 2 วงจรของเกลนิงเกอร์ (Glaninger's circuit)

สาเหตุของช่วงเวลาหลังคลื่นที่สั้นกว่าปกติเกิดจากการทดสอบวัตถุทดสอบที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการแกว่งของแรงดันเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำของวัตถุทดสอบ เพื่อให้เวลาหลังคลื่นยาวขึ้นทำการต่อตัวเหนี่ยวนำ (L_d) เข้ากับวงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์โดยต่อขนานกับตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ซึ่งอยู่ในส่วนของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์โดยแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งตัวเหนี่ยวนำที่ต่อเข้ามานั้นมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำในช่วงเวลาหลังคลื่นเนื่องจากอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ ทำหน้าที่ปล่อยประจุให้ไหลผ่านตัวต้านทานปรับหลังคลื่นได้ดียิ่งขึ้น ทำให้เวลาหลังคลื่นมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามการแกว่งของแรงดันนี้อาจทำให้เกิดยอดกลับหัว (Under-shoot) ซึ่งบางกรณีอาจมีค่าเกิน 50% ของค่ายอดแรงดันอิมพัลส์และไม่เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด จึงต้องปรับค่าความต้านทานปรับหลังคลื่นเพื่อทำให้แรงดันค่ายอดกลับหัวลดลง และต่อตัวต้านทานขนานกับวัตถุทดสอบ (R_p) เพื่อลดการเกิดส่วนพุ่งเกิน (Over shoot) ให้มีค่าลดลงโดยการเลือกค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าเป็นไปตามสมการที่ (3) ถึง (6)

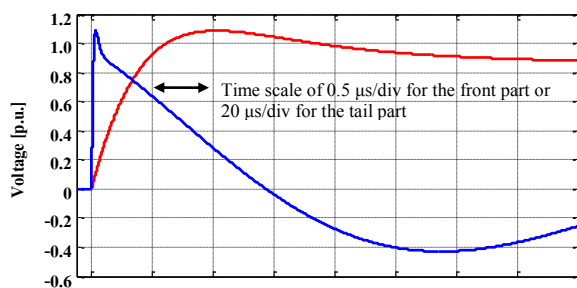
$$C_s \approx \frac{T_2^2}{L_d} \quad (3)$$

$$R_d = \frac{0.4 \times 10^{-6}}{C_b} \quad (4)$$

$$L_d = 1.25R_d \quad (5)$$

$$R_p = \frac{R_d L_L}{L_d} \quad (6)$$

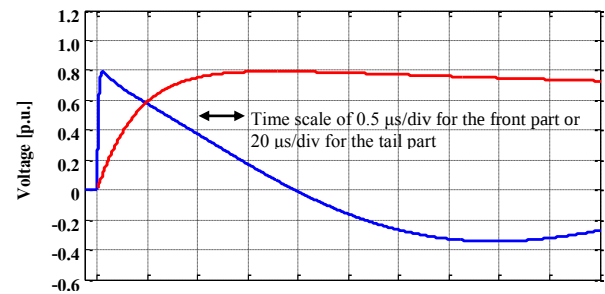
เพื่อยืนยันความผิดพลาดของการออกแบบที่แนะนำให้เสนอ ให้พิจารณาโพลที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำขนาด 1.2 mH ขนานกับตัวเก็บประจุขนาด 10 nF เมื่อใช้สมการที่ (3) ถึง (6) ในการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า คือ ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) มีค่า 1.5 μF ค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) มีค่า 40 Ω ค่าความเหนี่ยวนำขานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (L_d) มีค่า 50 μH ค่าความต้านทานขานวัตถุทดสอบ (R_p) มีค่า 1000 Ω และหาค่าความต้านทานปรับหลังคลื่นจากสมการที่ (2) มีค่า 50 Ω เมื่อนำค่าองค์ประกอบเหล่านี้ไปใช้ในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ดังรูปที่ 3 พบว่า แรงดันที่สร้างขึ้นผิดเพี้ยนไปจากมาตรฐานกำหนดอย่างมาก คือ เวลาหน้าคลื่นมีค่า 0.68 μs เวลาหลังคลื่นมีค่า 30 μs เกิดส่วนพุ่งเกิน (Over-shoot) 20% และแรงดันขดกลับชั่ว (Under-shoot) 47.64%



รูปที่ 3 รูปคลื่นแรงดันจากการคำนวณค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่แนะนำให้เสนอโดย Feser

จากการคำนวณค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในบทความที่แนะนำให้เสนอมีการปรับแต่งค่าที่ทำการออกแบบเพื่อปรับปรุงรูปคลื่น โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า คือ ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) มีค่า 2.2 μF ค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) มีค่า 65 Ω ค่าความเหนี่ยวนำขานความต้านทานปรับหน้าคลื่น (L_d) มีค่า 400 μH ค่าความต้านทานขานวัตถุทดสอบ (R_p) มีค่า 200 Ω และค่าความต้านทานปรับหลังคลื่น มีค่า 55 Ω เมื่อนำค่าองค์ประกอบเหล่านี้ไปใช้ในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ดังรูปที่ 4

พบว่ารูปคลื่นแรงดันที่สร้างขึ้นมีค่าเวลาหน้าคลื่น 1.5 μs เวลาหลังคลื่นมีค่า 38.11 μs ซึ่งยังมีความผิดเพี้ยนไปจากที่มาตรฐานกำหนด แม้ว่าการปรับแต่งค่าในบทความ [3] เหมือนจะได้รูปคลื่นใกล้เคียงมาตรฐานกำหนด แต่ยังขาดที่มาและวิธีการปรับแต่งค่าอย่างเป็นระบบ



รูปที่ 4 รูปคลื่นแรงดันจากการปรับค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์ตามบทความที่ Feser แนะนำเสนอ

เพื่อให้ได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานกำหนด บทความนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแบบใหม่ของวงจรแกลนิงเกอร์ที่ใช้เป็นวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า

2.3 วิธีการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์แบบใหม่

กรณีที่ทราบค่าความเหนี่ยวนำโพลโดยวิธีการวัด จะสามารถคำนวณหาตัวเก็บประจุอิมพัลส์ที่น้อยที่สุดที่ทำให้เวลาหลังคลื่นมีค่ามากกว่า 40 μs โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (7) และกำหนดให้ $T_2 \approx T/8$ ซึ่งมีค่ามากกว่า 40 μs แสดงในสมการที่ (8) จะสามารถหาค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ได้จากสมการที่ (9)

$$T = 2\pi\sqrt{L_L C_s} \quad (7)$$

$$\frac{T_2}{8} \geq 40 \times 10^{-6} \quad (8)$$

$$C_s \geq \left(\frac{320 \times 10^{-6}}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{L_L} \quad (9)$$

จากค่าตัวเก็บประจุจากขดลวดที่ทราบค่าจากการวัด หรือคำนวณได้นั้น สามารถนำไปหาค่าความต้านทานหน้าคลื่นโดยใช้ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (10)

$$T_1 = k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \quad (10)$$

โดยกำหนดให้เวลาน้ำคลื่น T_L มีค่าเท่ากับ $1.2 \mu s$ และค่า $k_2 = 2.96$ จะได้ค่าความต้านทานหน้าคลื่น (R_d) ตามสมการที่ (11)

$$R_d = \frac{0.4 \times 10^{-6}}{C_b} \quad (11)$$

ซึ่ง R_d ที่ถูกเลือกใช้จะทำให้หน้าทีลดการแกว่งของสัญญาณ และส่วนพุ่งเกินของรูปคลื่นสัญญาณแรงดัน

หลังจากได้ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ และค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่นแล้ว ค่าความเหนี่ยวนำที่มากที่สุดสามารถนำมาต่อขนานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นที่ใช้ในวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้จากสมการที่ (12)

$$L_d \leq \frac{R_d}{10} \sqrt{L_L C_s} \quad (12)$$

ซึ่งในความเป็นจริงจะไม่สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำทุกค่าที่คำนวณได้ ในทางปฏิบัติจึงเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำเฉพาะค่า เช่น $100 \mu H$, $150 \mu H$, $200 \mu H$, $250 \mu H$ และ $300 \mu H$

หลังจากที่เลือกค่าความเหนี่ยวนำที่ต่อขนานความต้านทานปรับหน้าคลื่นแล้วจะสามารถหาค่าความต้านทานขนานวัตถุทดสอบ โดยยอมให้แรงดันที่เกิดขึ้นได้ไม่เกิน 5% ซึ่งหาได้จากสมการที่ (13)

$$1.1 \left(\frac{L_L}{L_L + L_d} \right)^2 = \frac{\left(\frac{1}{R_d} \right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L_d} \right)^2}{\left(\frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_p} \right)^2 + \left(\omega C_b - \frac{1}{\omega L_L} - \frac{1}{\omega L_d} \right)^2} \quad (13)$$

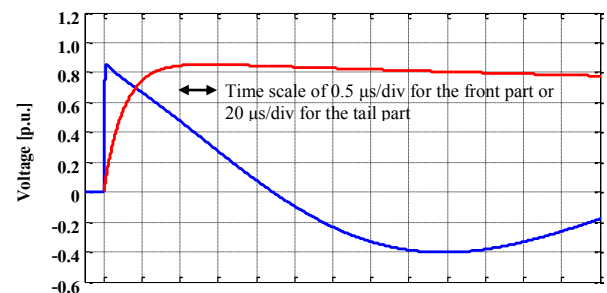
โดยที่ ω คือ ความเร็วเชิงมุมเรโซแนนซ์ระหว่าง L_d และ C_b

การใช้วงจรของแกลนิงเกอร์นั้นจะทำให้เกิดค่าแรงดันยอดกลับขั้วมีค่าสูง ดังนั้นค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_c) ต้องมีค่าที่ต่ำพอซึ่งทำให้เกิดการหน่วงทำให้แรงดันยอดกลับขั้วมีค่าต่ำกว่า 50% ตามที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (14)

$$R_c \leq 2.5 \sqrt{\frac{(L_d + L_L)}{C_s}} \quad (14)$$

เพื่อยืนยันการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบใหม่ โดยกำหนดให้ใช้ค่าความเหนี่ยวนำโหลดขนาด 1.2 mH ขนานกับ

ตัวเก็บประจุโหลดที่มีค่า 10 nF เพื่อให้สอดคล้องกับบทความที่เคยนำเสนอก่อนหน้านี้ ในการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าโดยใช้สมการที่ (9) ถึง (14) ได้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าคือ ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์มีค่า $3 \mu F$ ค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่นมีค่า 40Ω ค่าความเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นมีค่า $250 \mu H$ ค่าความต้านทานขนานวัตถุทดสอบมีค่า 200Ω และค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่นมีค่า 50Ω เมื่อนำค่าองค์ประกอบเหล่านี้ไปใช้ในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ดังรูปที่ 5 จะได้ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์คือ เวลาน้ำคลื่นมีค่า $1.04 \mu s$ เวลาหลังคลื่นมีค่า $45.27 \mu s$ มีค่าแรงดันยอดกลับขั้ว 47.26% ของแรงดันยอดสูงสุด และมีประสิทธิภาพถึง 85.36% ซึ่งเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด



รูปที่ 5 รูปคลื่นแรงดันจากการคำนวณค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์ที่ออกแบบใหม่

เพื่อยืนยันการออกแบบการคำนวณค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบใหม่จึงได้จำลองค่าโหลดทดสอบ เพื่อทดสอบการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า

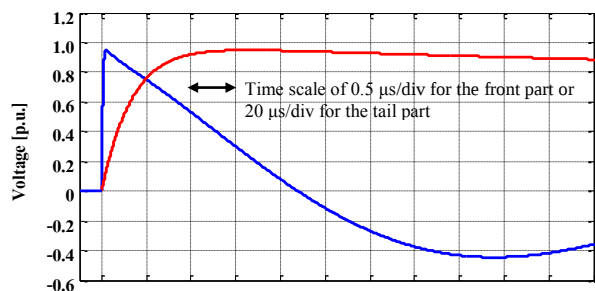
3. การออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์

การออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์ ถูกแบ่งออกเป็น 5 กรณี โดยแต่ละกรณีจะมีวัตถุทดสอบที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่แตกต่างกันโดยอยู่ในขอบเขต $0.4 \text{ mH} \leq L \leq 4 \text{ mH}$ ดังแสดงในตารางที่ 1

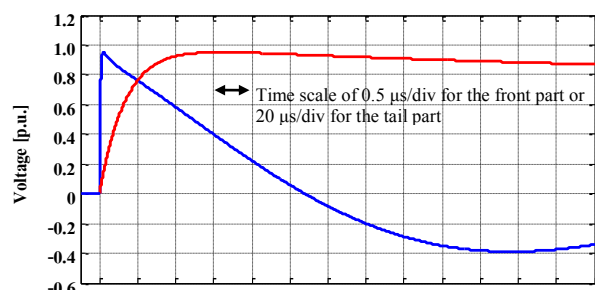
ตารางที่ 1 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
ฟ้าผ่าสำหรับวงจรแกแลนิงเกอร์

กรณี	C_s (μF)	R_d (Ω)	L_d (μH)	R_p (Ω)	R_e (Ω)
1) $L_L = 4 \text{ mH}$ $C_b = 8.5 \text{ nF}$	1	50	300	500	150
2) $L_L = 3.164 \text{ mH}$ $C_b = 8.5 \text{ nF}$	2	55	250	517	70
3) $L_L = 1.5 \text{ mH}$ $C_b = 4 \text{ nF}$	3	115	250	400	50
4) $L_L = 1 \text{ mH}$ $C_b = 4 \text{ nF}$	6	113	150	300	20
5) $L_L = 0.4 \text{ mH}$ $C_b = 4 \text{ nF}$	12	115	100	200	10

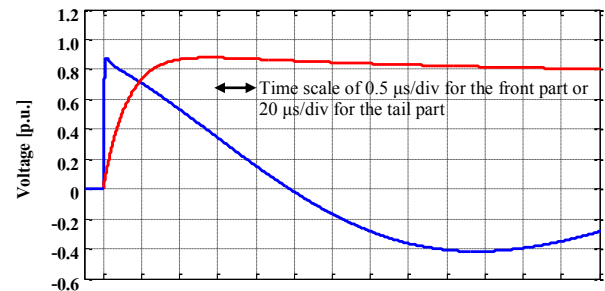
จากค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าตามทีออกแบบทั้ง 5
กรณี ได้จำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยโปรแกรม
คอมพิวเตอร์ในค่าต่อหนึ่งหน่วย (Per unit) เทียบกับ
แรงดันอัดประจุ (หรือแรงดันอัดประจุมีค่าเท่ากับ 1 p.u.)
แสดงดังรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 10



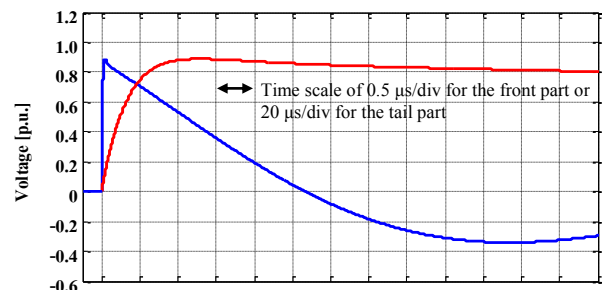
รูปที่ 6 รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้
ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกแลนิงเกอร์ในกรณีที่ 1



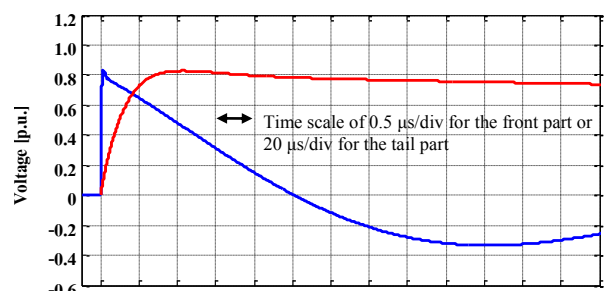
รูปที่ 7 รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้
ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกแลนิงเกอร์ในกรณีที่ 2



รูปที่ 8 รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้
ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกแลนิงเกอร์ในกรณีที่ 3



รูปที่ 9 รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้
ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกแลนิงเกอร์ในกรณีที่ 4



รูปที่ 10 รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้
ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกแลนิงเกอร์ในกรณีที่ 5

จากรูปคลื่นสัญญาณแรงดันอิมพัลส์ที่จำลอง โดย
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถหาค่าองค์ประกอบของรูป
คลื่นสัญญาณแรงดันอิมพัลส์ได้ดังแสดงในตารางที่ 2

จากการจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในโปรแกรม
คอมพิวเตอร์ โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ออกแบบ
ใหม่ พบว่าประสิทธิภาพของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดัน
อิมพัลส์มีค่ามากกว่า 80% ค่าองค์ประกอบของรูป
คลื่นสัญญาณแรงดันอิมพัลส์ที่ได้อยู่ในช่วงตามที่
มาตรฐานกำหนด คือ ค่าเวลาหน้าคลื่นอยู่ในช่วง
0.84 – 1.56 μs ค่าเวลาหลังคลื่นอยู่ในช่วง 40 – 60 μs

ส่วนพุ่งเกินไม่เกิน 5% และแรงดันขดกลับขั้วน้อยกว่า 50% ของแรงดันสูงสุด

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าจากการจำลองวงจรแกแลนิงเกอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

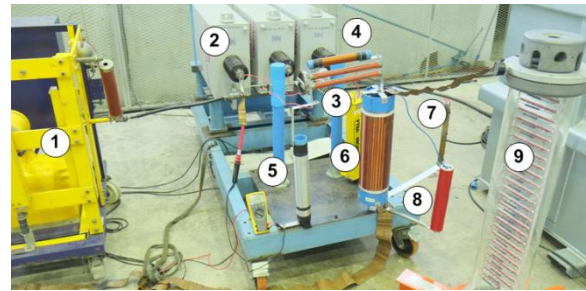
กรณี	ประสิทธิภาพ (%)	แรงดันขดกลับขั้ว (%)	เวลาหน่วงคลื่น T_1 (μ s)	เวลาหลังคลื่น T_2 (μ s)
1) $L_L = 4$ mH $C_b = 8.5$ nF	94.85	47.07	1.31	45.15
2) $L_L = 3.164$ mH $C_b = 8.5$ nF	95.14	40.88	1.30	52.04
3) $L_L = 1.5$ mH $C_b = 4$ nF	87.88	48.58	1.07	51.17
4) $L_L = 1$ mH $C_b = 4$ nF	88.82	38.32	1.13	50.48
5) $L_L = 0.4$ mH $C_b = 4$ nF	82.84	40.36	0.96	49.41

4. การทดสอบวงจรแกแลนิงเกอร์

เพื่อยืนยันการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า จึงทำการทดสอบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ออกแบบในห้องปฏิบัติการ

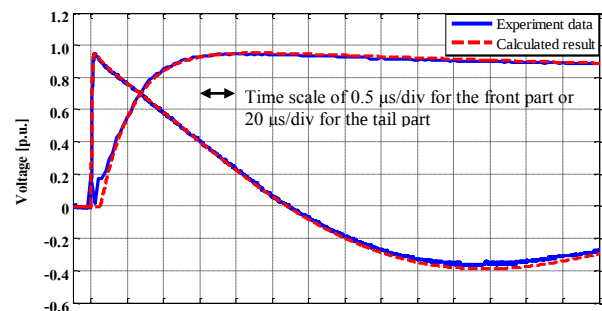
4.1 การทดสอบกับอุปกรณ์ทดสอบจำลอง

ในการทดสอบกับอุปกรณ์ทดสอบจำลองใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานตัวเก็บประจุเป็นโหลดทดสอบ และเลือกค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าตามกรณีที่ 2 และกรณีที่ 4 ซึ่งในกรณีที่ 2 กำหนดให้ใช้ค่าความเหนี่ยวนำโหลดที่มีค่า 3.164 mH ขนานตัวเก็บประจุโหลดที่มีค่า 8.5 nF และใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าต่างๆ ดังตารางที่ 1 ซึ่งผลการทดสอบพบว่าค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด โดยที่เวลาหลังคลื่นมีค่า 52 μ s และมีขดแรงดันกลับขั้วน้อยกว่า 50% ของแรงดันสูงสุด ซึ่งแสดงวงจรการทดสอบในรูปที่ 11 และผลการทดสอบในรูปที่ 12



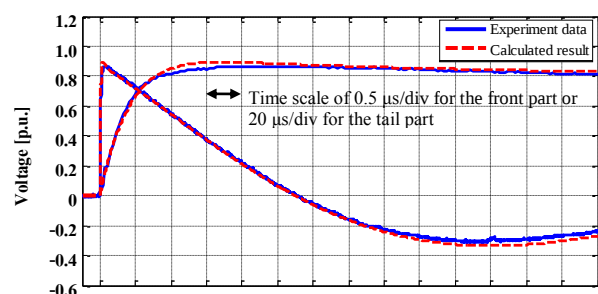
รูปที่ 11 วงจรการทดสอบในห้องปฏิบัติการของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกแลนิงเกอร์ในกรณีที่ 2

1)หม้อแปลงชาร์จประจุ 2)ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ 3)ตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น 4)ตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น 5)ตัวต้านทานปรับหลังคลื่น 6)ตัวเหนี่ยวนำโหลด 7)ตัวเก็บประจุโหลด 8)ตัวต้านทานขนานโหลดทดสอบ 9)โอซิลอสโคปวัดรูปคลื่นสัญญาณ



รูปที่ 12 รูปคลื่นแรงดันจากการทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกแลนิงเกอร์ในกรณีที่ 2

กรณีที่ 4 ใช้ค่าความเหนี่ยวนำโหลดที่มีค่า 1 mH ขนานตัวเก็บประจุโหลดที่มีค่า 4 nF และใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าต่างๆ ดังตารางที่ 1 ซึ่งผลการทดสอบพบว่าค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด โดยที่ช่วงเวลาหลังคลื่นมีค่า 51.2 μ s และมีขดแรงดันกลับขั้วน้อยกว่า 50% ของแรงดันสูงสุด แสดงผลการทดสอบในรูปที่ 13



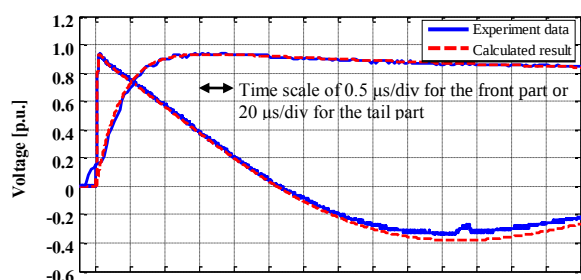
รูปที่ 13 รูปคลื่นแรงดันจากการทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกแลนิงเกอร์ในกรณีที่ 4

4.2 การทดสอบกับหม้อแปลงแรงดันต่ำ

ในการทดสอบใช้หม้อแปลงแยกขด (Isolating transformer) ที่ใช้ในระบบ 220V ที่มีค่าความเหนี่ยวนำ โหลด 2.888 mH และค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 30 pF เพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ทำการวิเคราะห์ ก่อนหน้านี้จึงทำการต่อขานานตัวเก็บประจุโหลดที่มีค่า 8.5 nF เพื่อให้สามารถใช้ตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการได้ (55 Ω) และใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าต่างๆ ดังตารางที่ 1 กรณีที่ 2 ซึ่งผลการทดสอบพบว่าค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด โดยที่เวลาหลังคลื่นมีค่า 51.67 μ s และมียอดแรงดันกลับขั้วน้อยกว่า 50% ของแรงดันสูงสุด ซึ่งแสดงรูปวงจรการทดสอบในรูปที่ 14 และผลการทดสอบในรูปที่ 15



รูปที่ 14 วงจรการทดสอบในห้องปฏิบัติการของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เมื่อทดสอบหม้อแปลงแรงดันต่ำ



รูปที่ 15 รูปคลื่นแรงดันทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์กับหม้อแปลงแรงดันต่ำ

5. สรุปผลการทดสอบ

จากการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์แบบใหม่ และการทดสอบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ทดสอบโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำพบว่าค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแบบใหม่ที่ทำให้การออกแบบวงจรแกลนิงเกอร์สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อทดสอบ

โหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า 80% และรูปคลื่นที่ได้สอดคล้องตามที่มาตรฐาน IEC60060-1:2010 ได้กำหนดไว้ คือ ช่วงเวลาน้ำคลื่นอยู่ในเวลา 1.2 μ s $\pm$ 30% และเวลาหลังคลื่น 50 μ s $\pm$ 20% ซึ่งจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการมีผลที่ใกล้เคียงกัน โดยมีเวลาหลังคลื่นมากกว่า 40 μ s และมียอดแรงดันกลับขั้วที่น้อยกว่า 50% ของแรงดันสูงสุด ซึ่งการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ได้นำเสนอสามารถหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่เป็นระบบมากขึ้น และมีขั้นตอนในการหาที่ชัดเจน ทำให้ง่ายต่อการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในการทดสอบจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ละครวิศวกรรม จำกัด ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการทดสอบจริง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC 60060-1, High-voltage Test Techniques. Part 1: General Definitions and Test Requirements, 3rd ed., Sep., 2010.
- [2] IEEE Standard 4TM-2013, IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques, 2013.
- [3] K. Feser, "Circuit Design of Impulse Generators for the Lightning Impulse Voltage Testing of Transformers", www.haefely.com.
- [4] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, High Voltage Engineering: Fundamentals, 2nd ed., Newnes, August, 2000.
- [5] W. Schrader and W. Schufft, "Impulse Voltage Test of Power Transformers", paper No. 13, Workshop 2000, Alexandria, Virginia, Sep., 2000.