

**การศึกษาผลกระทบของตัวความต้านทานปรับหน้าคลื่นที่มีผลต่อ
ค่าแรงดันพุ่งเกินของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μ s
The Effects of the Front Resistor that Affect
Overshoot of 1.2/50 μ s Impulse Voltage Waveform**

กวิตม์ มีเจริญ^{1*} และ ศุภกิตติ์ โชติโก¹

Kavit Meecharoen^{1*} and Supakit Chotigo¹

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการแก้ปัญหาแรงดันพุ่งเกิน(Overshoot) ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μ s ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ สาเหตุหลักมาจากการออสซิลเลชัน (Oscillation) ของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พบว่าตัวแปรหลักที่ทำให้เกิดการออสซิลเลชันของรูปคลื่นคือค่าความเหนี่ยวนำ (L) ที่มีอยู่ในค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ดังนั้นเพื่อลดความเหนี่ยวนำ บทความนี้ได้ออกแบบตัวต้านทานโดยนำลดความต้านทานแต่ละขนาดมาพันโดยใช้วิธีการพันสวนทางกันเพื่อให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนั้นหักล้างกัน หลังจากนั้นนำตัวต้านทานที่ได้ไปขนานกัน 2 ตัวอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานตามที่ 18 Ω , 21 Ω , และ 25 Ω โดยค่าความเหนี่ยวนำที่มีค่าตั้งแต่ 1.8-7.0 μ H โดยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในปัจจุบันมีตัวต้านทานหน้าคลื่น ซึ่งมีค่า $R = 18 \Omega$, $L = 4 \mu$ H และมีแรงดันพุ่งเกินอยู่ที่ 10.4% ในบทความนี้ได้ทำการปรับค่าความต้านทานตามที่ได้กล่าวมาและพบว่า ค่าความต้านทาน $R = 25 \Omega$, $L = 2.5 \mu$ H มีผลของค่าแรงดันพุ่งเกินมีค่าลดลงเหลือ 0.3% จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวความต้านทานปรับหน้าคลื่นที่มีออกแบบใหม่นี้ช่วยแก้ปัญหาค่าแรงดันพุ่งเกินที่เกิดขึ้นในวงจรแรงดันอิมพัลส์ได้

ABSTRACT

This paper presents the method to solve the overshoot of 1.2/50 us impulse voltage waveform of the impulse voltage generator. The main cause is due to oscillation of impulse voltage generator circuit. The main variable for causing the oscillation is the inductance of the front resistor (R_d). Therefore, to reduce this inductance, this paper designs the new front resistor by wiring the resistance wire each size in opposite way then connecting two of the new resistor in parallel to get the front resistor with the value of 18 Ω , 21 Ω , and 25 Ω . These resistors have the value of inductance in the range of 1.8-7.0 μ H. The existing impulse voltage generator uses the front resistor which has $R = 18 \Omega$, $L = 4 \mu$ H. And, it has the overshoot of 10.4%. This paper changes the value of this front resistor and finds that the front resistor with the value of $R = 25 \Omega$, $L = 2.5 \mu$ H. The overshoot also reduces to 0.3%. Finally, it can concludes that the new front resistor design can reduce the overshoot of impulse voltage waveform in the impulse voltage generator.

Key words: Impulse Voltage, Overshoot, Inductance

* Corresponding author; e-mail address: kavit.mee@gmail.com

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 10140

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi 10140

คำนำ

ปัจจุบันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 4 ขั้นตอนขนาด 400 kV 8 kJ [3] ที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนและใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆซึ่งในรูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีผลของการเกิดออสซิลเลชัน (Oscillation) และแรงดันพุ่งเกิน (Overshoot) โดยมีอัตราส่วนค่าแรงดันพุ่งเกินอยู่ที่ 10.4% ซึ่งมีค่าองค์ประกอบต่างๆในวงจรดังนี้ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) ในแต่ละขั้นเท่ากับ 0.4 μF , ตัวเก็บประจุโหลด (C_b) เท่ากับ 5 nF, ความต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ในแต่ละขั้นเท่ากับ 18 Ω , และความต้านทานปรับหางคลื่น (R_e) ในแต่ละขั้นเท่ากับ 180 Ω โดยทดสอบที่ค่าระดับแรงดันต่างๆดังรูปที่ 1 ซึ่งในความต้านทานนั้นจะมีค่าความเหนี่ยวนำเกิดขึ้นด้วยจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เกิดการออสซิลเลชันและการเกิดแรงดันพุ่งเกิน

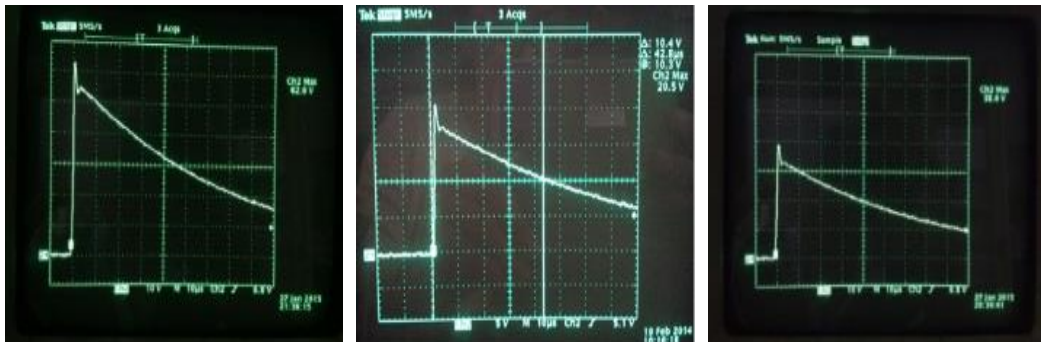


Figure 1 effect overshoot of impulse voltage wave form

ด้วยเหตุนี้ จึงนำไปสู่การวิจัยศึกษาผลกระทบของตัวต้านทานปรับรูปคลื่นที่ส่งผลต่อแรงดันพุ่งเกินของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs เพื่อจะได้แก้ปัญหแรงดันพุ่งเกินที่เกิดขึ้นในรูปคลื่น โดยจะทำการศึกษาและแก้ไขผลกระทบของการเกิดค่าแรงดันพุ่งเกินในระบบเครื่องกำเนิดแรงดันที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำของระบบเครื่องกำเนิด ทั้งนี้เพื่อจะได้นำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาในการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้น โดยใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ ตามหลักการของวงจรมาร์กซ์ (Marx's circuit) (สำรวย , 2549) ดังรูปที่ 2 ความหมายของสัญลักษณ์ในวงจร จะเหมือนกับวงจรพื้นฐานในวงจรรูปที่ 1 ตัวเก็บประจุ C_s' ทุกตัวจะได้รับการอัดประจุในลักษณะที่ต่อกันแบบขนานด้วยแรงดัน U_0' เมื่อส่งสัญญาณพัลส์ผ่านไกสวิตช์ ทำให้สปาร์กแก๊ปของขั้นแรกทำงานก่อน สปาร์กแก๊ปขั้นต่อไปก็จะเกิดสปาร์กตามลำดับ เป็นผลให้ตัวเก็บประจุ C_s' ทั้งหมดต่อกันแบบอนุกรม และได้แรงดันสูงเป็นทวีคูณของจำนวนขั้น เมื่อสปาร์กแก๊ปเกิดสปาร์กหมดทุกคู่ C_s' จะต่อกันเป็นอนุกรม ฉะนั้น C_b จะได้รับประจุผ่านความต้านทานหน่วง R_d' ต่อกันแบบอนุกรม และในที่สุดทั้ง C_s' และ C_b ต่างก็จะดีสชาร์จปล่อยประจุผ่าน R_e' และ R_d' ต่อไป ค่าองค์ประกอบต่างๆ ถ้าคิดเทียบให้เป็นวงจรขั้นเดียว ดังวงจรพื้นฐานจะได้ค่ารวมดังนี้

ความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันที่สามารถสร้างได้ดังสมการที่ (1)

$$U_0 = nU_0' \quad (1)$$

ความสัมพันธ์ของค่าเก็บประจุอิมพัลส์ต่อชั้นดังสมการที่ (2)

$$C_s = \frac{C_s'}{n} \quad (2)$$

ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่นและหลังคลื่นดังสมการที่ (3) และ (4)

$$R_d = nR_d' \quad (3)$$

$$R_e = nR_e' \quad (4)$$

เมื่อ	U_0	คือ ค่าแรงดันอัดประจุกระแสตรง	U_0'	คือ ค่าแรงดันอัดประจุกระแสตรงต่อชั้น
	C_s	คือ ค่าเก็บประจุอิมพัลส์	C_s'	คือ ค่าเก็บประจุอิมพัลส์ต่อชั้น
	n	คือ จำนวนชั้น	C_b	คือ ค่าเก็บประจุโหลด
	R_d	คือ ความต้านทานปรับหน้าคลื่น	R_d'	คือ ความต้านทานปรับหน้าคลื่นต่อชั้น
	R_e	คือ ความต้านทานปรับหางคลื่น	R_e'	คือ ความต้านทานปรับหางคลื่น

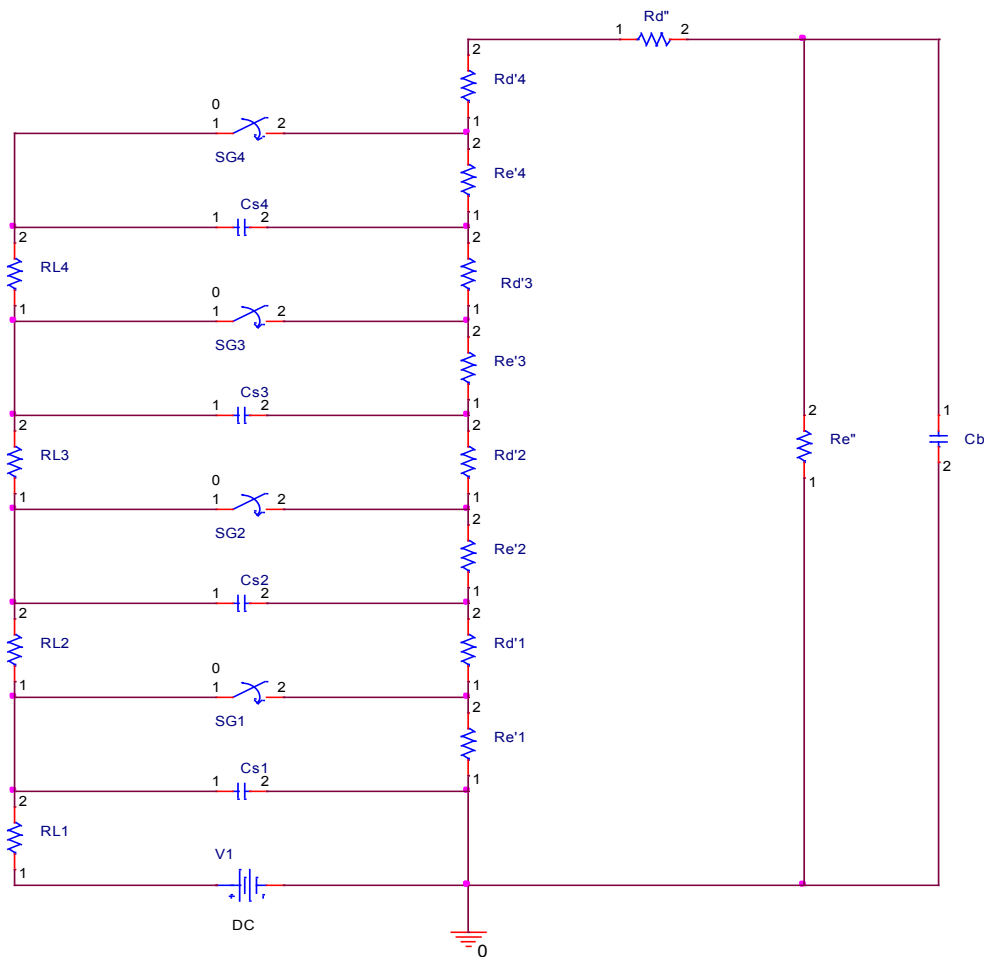


Figure 2 circuit impulse voltage generator 4 step by OrCAD program

การคำนวณหาความต้านทานปรับรูปคลื่น

ตัวต้านทานที่ทำหน้าที่ปรับหน้าคลื่น R_d และปรับหางคลื่น R_e จะกำหนดด้วยรูปคลื่น 1.2/50 μs ค่าเก็บประจุอิมพัลส์ C_s และค่าเก็บประจุโหลด C_b ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการสามารถคำนวณความต้านทานของช่องคาบเวลาหน้าคลื่น (T_f) ได้ตามสมการที่ (5)

$$T_1 = k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \quad (5)$$

และสามารถคำนวณความต้านทานของช่วงคาบเวลาหลังคลื่น (T_2) ได้ตามสมการที่ 6

$$T_2 = k_1 R_e (C_b + C_s) \quad (6)$$

ซึ่งค่า k_1 และ k_2 เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับรูปคลื่น โดยที่ค่า k_1 และ k_2 ในรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs นั้นจะมีค่าคงตัวดังนี้

$$k_1 = 0.73 \text{ และ } k_2 = 2.96$$

การคำนวณที่กล่าวมาข้างต้น ถือว่าวงจรที่ใช้คำนวณไม่มีค่าความเหนี่ยวนำ (L) ในทางปฏิบัติรูปคลื่นที่ได้มักจะแตกต่างไปจากทฤษฎีโดยเฉพาะค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและค่ายอดแรงดัน เนื่องจากค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นมานั้นมักจะมีความเหนี่ยวนำเกิดขึ้นซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยค่าความเหนี่ยวนำนี้อาจทำให้เกิดออสซิลเลชันได้ และจะเกิดผลมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำที่มีอยู่ซึ่งจะต้องมีการคำนวณค่าความต้านทาน R_d นั้นใหม่ได้ตามสมการที่ (7)

$$R_d \geq 2 \sqrt{L \left(\frac{C_b + C_s}{C_b C_s} \right)} \quad (7)$$

การพันตัวความต้านทาน R_d และ R_e

ความต้านทานของ R_d และ R_e มีคุณสมบัติคือการปรับรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งควรที่จะต้องออกแบบเพื่อให้ไม่ให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำหรือให้มีค่าความเหนี่ยวนำให้น้อยที่สุด และสามารถทนค่ากำลังไฟฟ้าให้ได้ (สำรวย , 2535) โดยการออกแบบความต้านทานจะให้ลดความต้านทานเปลี่ยมาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ความต้านทานที่เหมาะสมและลดค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากภายในขดลวด จากนั้นให้นำมาพันบนกระบอกแกนพีวีซี และระหว่างชั้นการพันของขดลวดต้องขึ้นด้วยฉนวนซึ่งจะใช้เส้นเอ็นไนลอน โดยพันสองชั้นสวนทางกัน เพื่อเป็นการลดค่าความเหนี่ยวนำให้หักล้างกัน เมื่อพันชั้นแรกเรียบร้อยแล้วจะต้องขึ้นด้วยฉนวนที่สามารถทนกำลังไฟฟ้าสูงๆได้แล้วจึงพันชั้นที่สอง และในการพันแต่ละชั้นต้องให้ได้ค่าความต้านทานให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อที่ให้อะไรไฟฟ้านั้นในแต่ละชั้นไหลผ่านได้เท่าๆกัน โดยขดลวดที่ใช้ในการพันความต้านทานจะใช้ขนาดดังต่อไปนี้ดังตารางที่ 1 โดยจะมีค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำที่อยู่ในเส้นลวดต่างกันไป

Table 1 resistance and inductance of resistance wire

Size resistance wire (No.)	Resistance (Ω/m)	inductance ($\mu H/m$)
24	5.1	2.4
27	11.4	2.4
32	36.2	4.0

โดยได้มีการออกแบบให้พันตัวความต้านทานแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะดังนี้

1. ใช้ลวดเบอร์ 24 พันค่าความต้านทานที่ 36 Ω , 42 Ω และ 50 Ω
2. ใช้ลวดเบอร์ 27 พันค่าความต้านทานที่ 36 Ω , 42 Ω และ 50 Ω
3. ใช้ลวดเบอร์ 32 พันค่าความต้านทานที่ 36 Ω , 42 Ω และ 50 Ω

โดยตัวต้านทานที่พันขึ้นมาจะต้องมีความทนต่อพลังงานที่ไหลผ่านได้ด้วย ซึ่งพลังงานที่ป้อนผ่านความต้านทานที่เกิดขึ้นในเวลาสั้นๆ นั้นทำให้เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้น ขดลวดที่ใช้จึงจำเป็นต้องทนพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นได้ด้วย โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$W = mc\Delta T \quad (8)$$

- เมื่อ W คือ พลังงานที่ป้อนผ่านความต้านทาน (kJ)
 m คือ มวลสารของเส้นลวดที่ประกอบเป็นความต้านทาน
 c คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg $^{\circ}$ K)
 ΔT คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็น $^{\circ}$ C

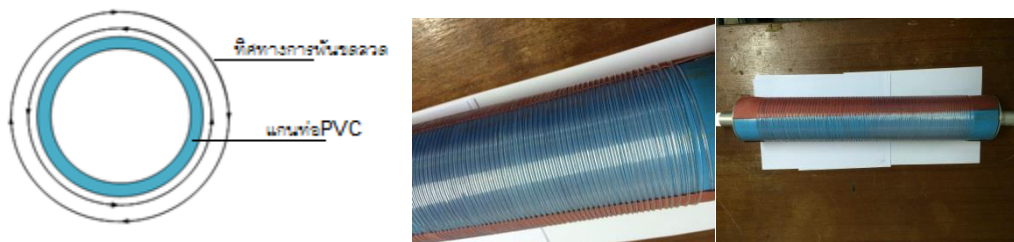


Figure 3 structure wiring of resistance wire

การติดตั้งค่าความต้านทาน

หลังจากพันตัวความต้านทานเรียบร้อยแล้วจะต้องติดตั้งตัวความต้านทาน โดยให้ตัวความต้านทานทั้ง 2 ตัวขนานกันในแต่ละชั้นเพื่อที่จะได้ค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_p) ดังรูปที่ 4 เพราะด้วยขนาดลวดเบอร์ 27 และ 32 ที่ใช้พันตัวความต้านทานนั้นมีขนาดเล็กทำให้ทนพลังงานที่ป้อนผ่านความต้านทานไม่เพียงพอ จึงต้องทำการขนานตัวความต้านทานดังกล่าว



Figure 4 installation resistor

เมื่อนำตัวต้านทานที่มีค่า 36 Ω , 42 Ω และ 50 Ω มาขนานกันจะได้ค่าความต้านทานตามค่าที่กำหนดซึ่งจะได้ค่าความเหนี่ยวนำดังตารางที่ 2 โดยค่าที่ 18 Ω ใช้ค่าความต้านทานจากวงจรเดิม ค่าที่ 21 Ω ได้จากการคำนวณหาสมการที่ (5) และค่าที่ 25 Ω ได้จากการทดลองโดยใช้ข้อมูลตามทฤษฎีสมการที่ (7) ซึ่งจะได้นำค่าพารามิเตอร์นี้ไปใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมเพื่อสังเกตลักษณะของรูปคลื่นก่อนนำไปทดลองจริงกับชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

Table 2 resistance and inductance from wiring of resistance wire

Size resistance wire (No.)	Resistance of resistor	Inductance of resistor	Parallel resistance	Parallel inductance
24	36 Ω	8 μ H	18 Ω	4 μ H
	42 Ω	11 μ H	21 Ω	5.5 μ H
	50 Ω	14 μ H	25 Ω	7 μ H
27	36 Ω	6 μ H	18 Ω	3 μ H
	42 Ω	7 μ H	21 Ω	3.5 μ H
	50 Ω	8 μ H	25 Ω	4 μ H
32	36 Ω	3.5 μ H	18 Ω	1.8 μ H
	42 Ω	4 μ H	21 Ω	2 μ H
	50 Ω	5 μ H	25 Ω	2.5 μ H

ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากการคำนวณค่าความต้านทานตามสมการที่(5)และ(6)โดยมีค่าองค์ประกอบต่างดังนี้ $C_s = 0.4\mu$ F และ $C_b = 20$ nF จะได้ค่า $R_d = 21.2\Omega$ และค่า $R_e = 163.0 \Omega$ ซึ่งจะได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน โดยลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์พื้นฐานนั้นจะเป็นลักษณะของรูปคลื่นที่ไม่มีผลของการเกิดฮิสเทรีซิสเกิดขึ้น(IEEE Std4 , 2013)

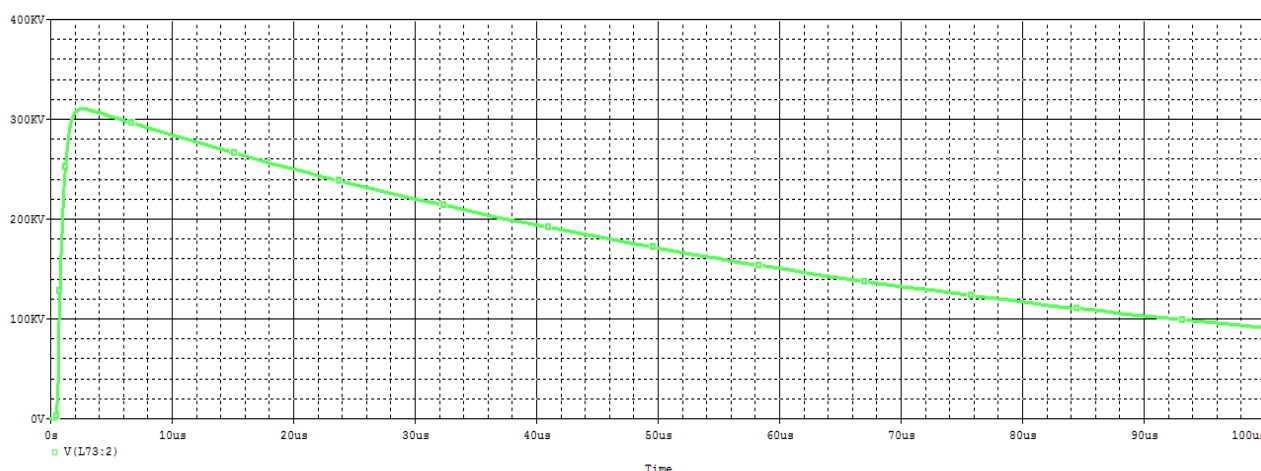


Figure 5 impulse voltage waveform without oscillations or overshoots calculate by equation

เมื่อจำลองการสร้างแรงดันอิมพัลส์พื้นฐานโดยใช้โปรแกรม ORCAD โดยค่าองค์ประกอบต่างๆที่ได้จากการคำนวณนั้นจะไม่มีค่าความเหนี่ยวนำเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยลักษณะของรูปคลื่นจึงเป็นดังรูปที่ 5 ซึ่งในความเป็นจริงแล้วจะต้องมีค่าความเหนี่ยวนำที่อยู่ในตัวต้านทานที่พันอยู่ด้วย จากตารางที่ 2 จะได้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาใช้ในการจำลองการสร้างแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μ s โดยใช้โปรแกรม ORCAD โดยเปรียบเทียบกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการคำนวณดังรูปที่ 6-8 และสามารถหาอัตราส่วนของแรงดันพุ่งเกินได้จากสมการที่ (9) (M.Hinow,2010)

$$\beta' = \frac{U_e - U_b}{U_e} \quad (9)$$

เมื่อ U_e คือ ค่าแรงดันทดสอบสูงสุดที่วัดได้

U_b คือ ค่าแรงดันสูงสุดพื้นฐาน(จำลองจากโปรแกรม)

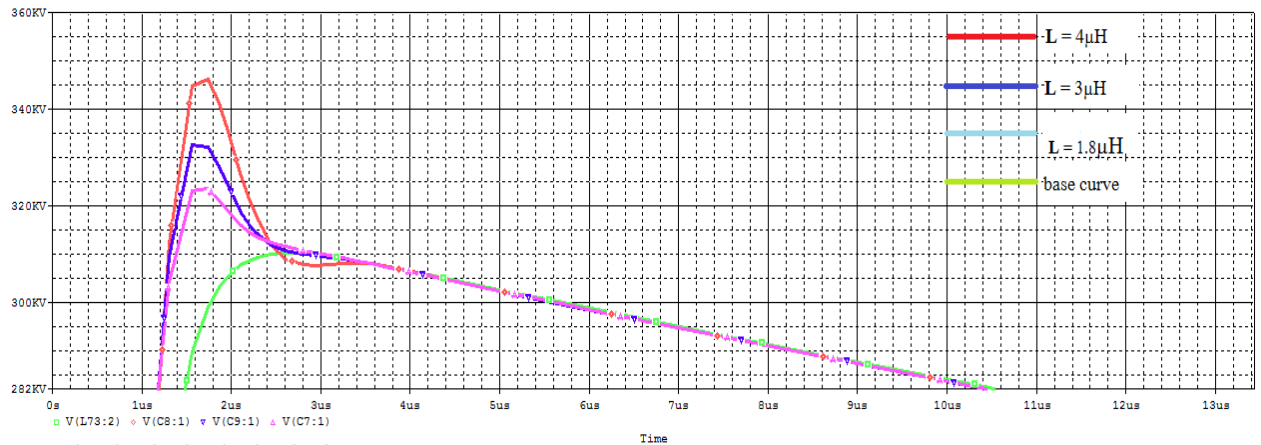


Figure 6 impulse waveform of resistance 18Ω L=4μH, L=3μH, L=1.8μH

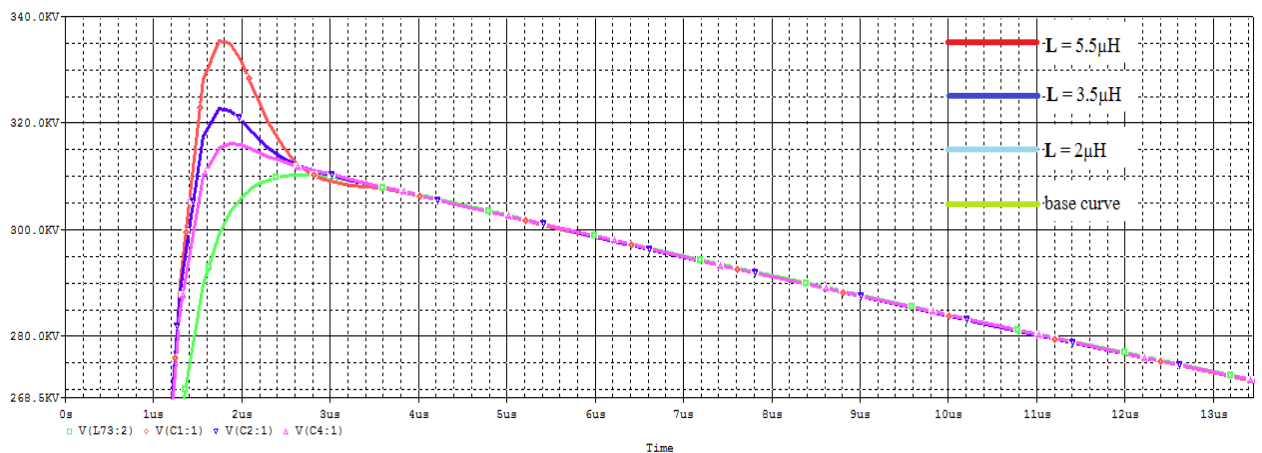


Figure 7 impulse waveform of resistance 21Ω L=5.5μH, L=3.5μH, L=2μH

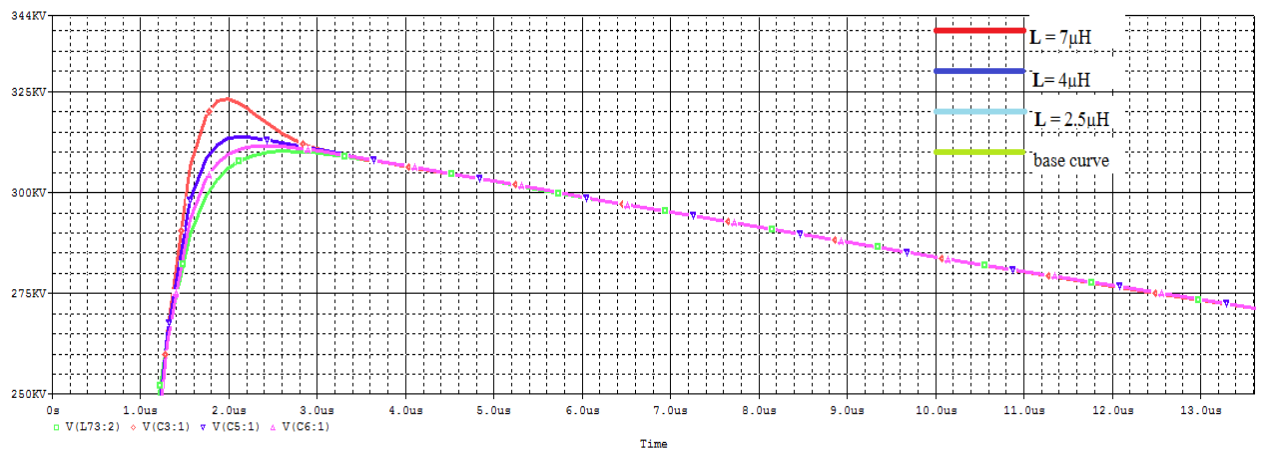


Figure 8 impulse waveform of resistance 25Ω L=7μH, L=4μH, L=2.5μH

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

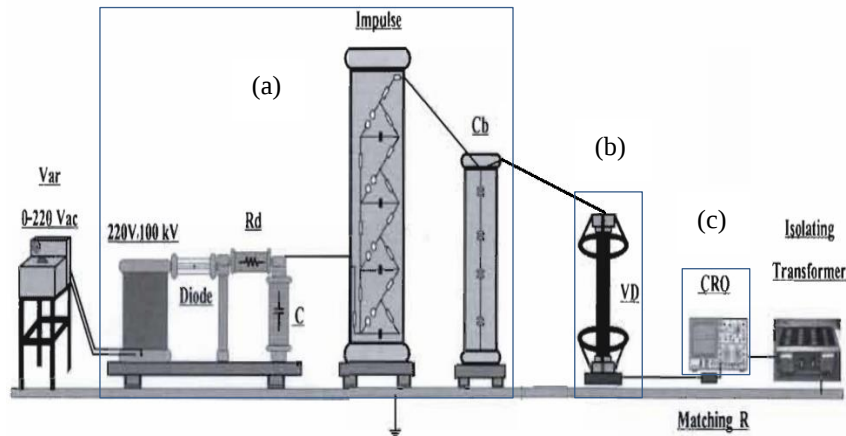


Figure 9 testing circuit

(a) Impulse generator 4 ชั้น ขนาด 400kV 8kJ

(b) Voltage divider ratio = 5000 : 1 Volt

(c) Oscilloscope Tektronix TDS 340

(d) LCR Meter ANDO TYPE AG-4311

ขั้นตอนการทดสอบ

เริ่มโดยการตรวจสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ให้พร้อมใช้งาน หลังจากนั้นตั้งค่าระยะแกว่งทรงกลมให้ได้แรงดันตามที่ต้องการแล้วจ่ายแรงดันอิมพัลส์เพื่อเก็บผลการทดสอบที่ค่าแรงดันต่างๆ เมื่อทำการเก็บข้อมูลแล้วให้ทำการเปลี่ยนตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นที่ได้เตรียมไว้ เพื่อจ่ายแรงดันอิมพัลส์แล้วเก็บผลทดสอบที่ค่าแรงดันต่างๆต่อไปจนครบ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

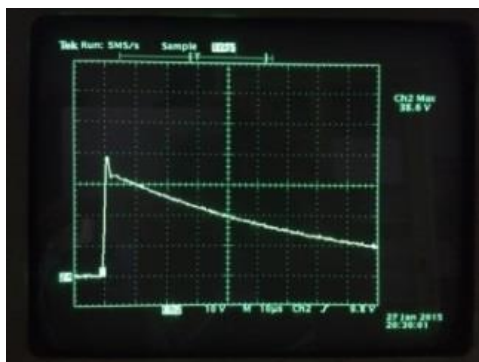


Figure 10 waveform recorded

$R = 18 \Omega$, $L = 4 \mu H$



Figure 11 waveform record

$R = 18 \Omega$, $L = 3 \mu H$

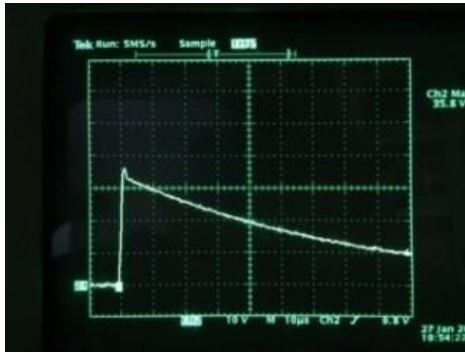


Figure 12 waveform record

$$R = 21 \, \Omega, L = 2 \, \mu\text{H}$$

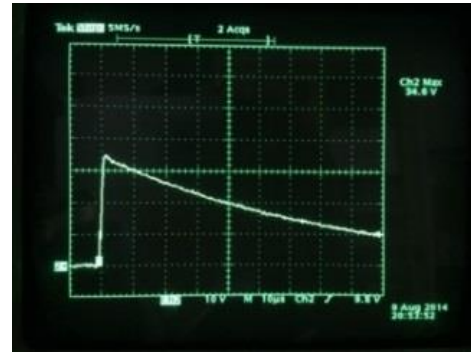


Figure 13 waveform record

$$R = 25 \, \Omega, L = 2.5 \, \mu\text{H}$$

หลังจากได้ทำการจำลองผลโดยให้โปรแกรมOrCADได้พบว่าลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ค่าของแรงดันพุ่งเกินนั้นลดลงและเมื่อนำตัวต้านทานมาใช้ในวงจรจริงซึ่งจากรูปที่ 10 ลักษณะของรูปคลื่นนั้นมีความแรงดันพุ่งเกินสูงถึง 10.4% และเมื่อใช้ค่าความต้านทานที่ออกแบบโดยลดผลของค่าความเหนี่ยวนำลง 18 Ω , 21 Ω และ 25 Ω ผลของแรงดันพุ่งเกินมีค่าลดลงที่ 6.1%, 1.9% และ 0.3% ตามรูปที่ 11-13 โดยสามารถหาอัตราส่วนของแรงดันพุ่งเกินได้จากสมการที่(9)

Table 3 Comparison ratio overshoot with base curve by OrCAD program

Size resistance wire (No.)	resistance	inductance	U_e (kV)	T_1/T_2 (μs)	Overshoot ratio
24	18 Ω	4 μH	346	0.8/48.8	10.4%**
	21 Ω	5.5 μH	334	0.8/56.2	7.2%
	25 Ω	7 μH	323	1.0/54.6	4.0%
27	18 Ω	3 μH	330	0.8/48.4	6.1%
	21 Ω	3.5 μH	321	0.8/56.2	3.4%
	25 Ω	4 μH	313	1.1/54.4	1.0%
32	18 Ω	1.8 μH	323	0.8/48.4	4.0%
	21 Ω	2 μH	316	0.8/56.4	1.9%
	25 Ω	2.5 μH	311	1.1/54.6	0.3%

** parameter of impulse waveform recorded $R = 18 \, \Omega, L = 4 \, \mu\text{H}$

สรุป

1. จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันเมื่อนำไปใช้ในวงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์จริง
2. ตัวต้านทานที่ออกแบบขึ้นมาใหม่สามารถลดอัตราส่วนค่าแรงดันพุ่งเกินจาก 10.4%เหลือ 0.3%
3. ขนาดขดลวดและลักษณะการพันตัวต้านทานมีผลช่วยลดความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นได้

เอกสารอ้างอิง

IEEE Std4 2013. Standard Techniques for High Voltage Testing.

สำรวย สังข์สะอาด 2535. การพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400kV 1 kJ.

วิศวกรรมสารเล่มที่ 4 หน้า 80-87

สำรวย สังข์สะอาด. 2549. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

M. Hinow. 2010. Lightning Impulse Voltage and Overshoot Evaluation Proposed in Drafts of IEC

60060-1 and Future UHV Testing. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation

Vol. 17, No. 5