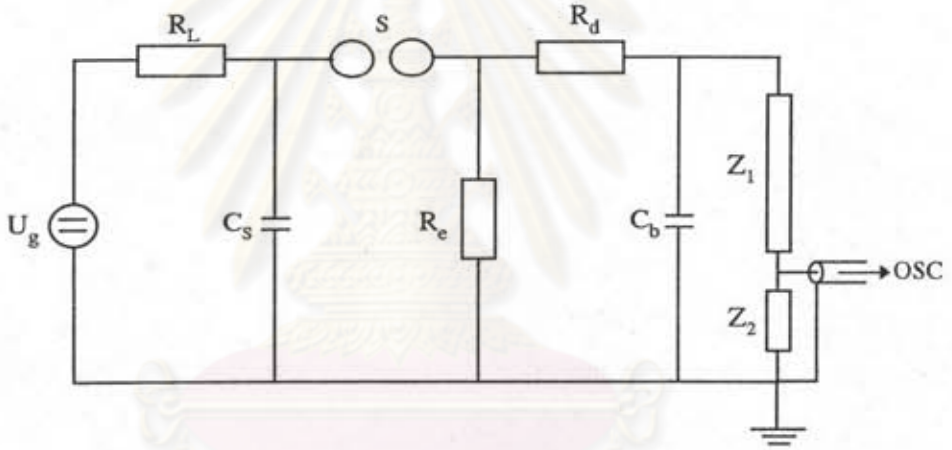
บทที่ 2

หลักการวัดแรงดันอิมพัลส์

2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์ในที่นี้จะหมายถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่สร้างจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ [5] ดังวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

โดยสัญญลักษณ์ต่างๆ มีความหมาย ดังนี้

U_g = แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย

R_L = ตัวความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

C_S = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

S = สปาร์กแกป

R_e = ตัวความต้านทานคายประจุ

R_d = ตัวความต้านทานหน่วง

C_b = ตัวเก็บประจุโหลด

Z_1 = อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์

Z_2 = อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์

เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่สร้างจากวงจรทรานเซียนต์ RC และสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันทางเวลาได้ว่า [5]

$$U(t) = \frac{U_0}{k} \cdot \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot \left[e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}\right] \qquad (2.1)$$

หรือ

$$U(t) = A \cdot \left[e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}\right] \qquad (2.2)$$

โดยที่ α_1, α_2 คือ รากของสมการ $s^2 + B_1 s + B_0 = 0$

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{B_1}{2} \mp \sqrt{\left(\frac{B_1}{2}\right)^2 - B_0} \qquad (2.3)$$

เมื่อ

$$B_0 = \frac{1}{R_d R_e C_b C_s}$$

$$B_1 = \frac{R_d C_s + R_e C_s + R_e C_b}{R_d R_e C_b C_s} \qquad (2.4)$$

และ A คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ $\frac{U_0}{k} \cdot \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)}$

จึงเห็นได้ว่า สมการของแรงดันอิมพัลส์จะแปรตามเวลาและมีค่าคงตัวเวลาอยู่ 2 ค่า คือ $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ โดยค่าเวลาคงตัว $1/\alpha_2$ จะมีผลต่อช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) และ ค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$ จะมีผลต่อช่วงเวลาหางคลื่น (T_2) ตามสมการ (2.5)

$$T_1 = \frac{k_2}{\alpha_2}$$

$$T_2 = \frac{k_1}{\alpha_1} \qquad (2.5)$$

เมื่อค่าคงที่ k_1, k_2, α_1, α_2 ขึ้นอยู่กับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ในกรณีของรูปคลื่นฟ้าผ่า 1.2/50 μs จะมีค่าคงที่ดังกล่าวเป็น [5]

$k_1 = 0.73$

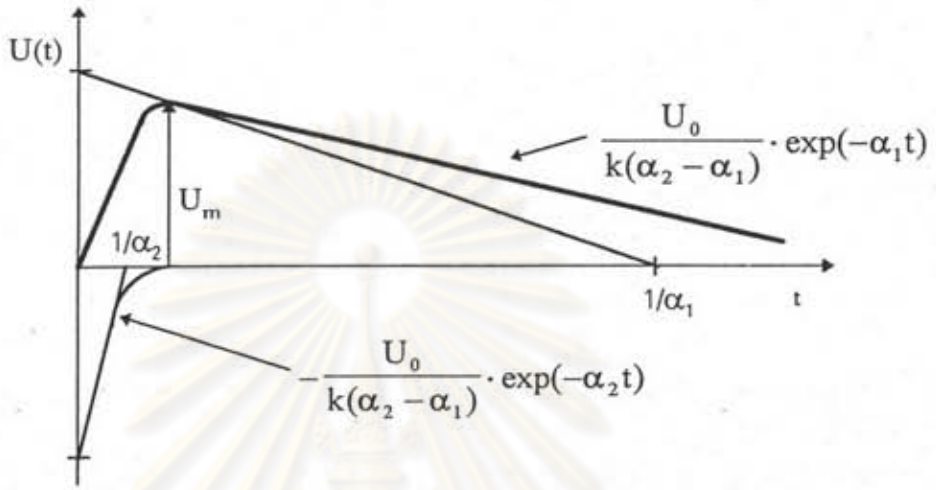
$k_2 = 2.96$

$1/\alpha_1 = 68.2$ μs

$1/\alpha_2 = 0.405$ μs

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

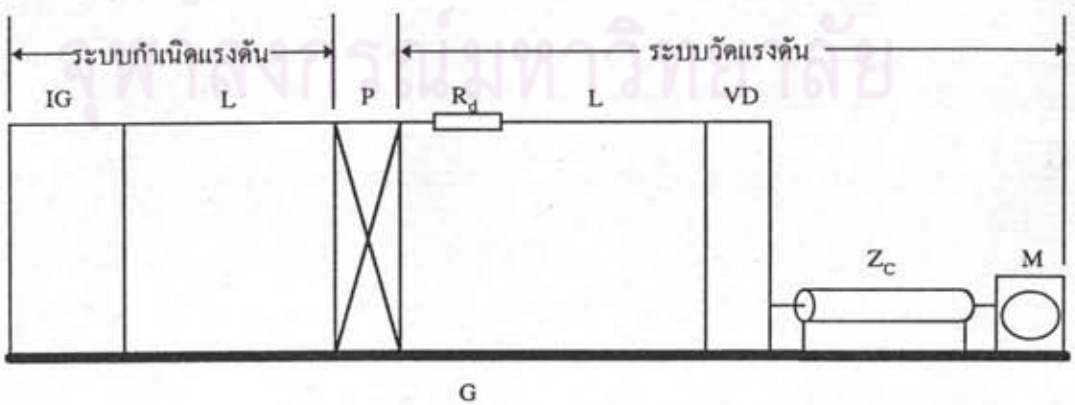
จะเห็นได้ว่าค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ นั้นมีค่าแตกต่างกันประมาณ 168 เท่า ทำให้ค่าคงตัวเวลาช่วงหน้าคลื่นไม่มีผลกระทบต่อค่าแรงดันในช่วงหางคลื่นที่ค่าเวลามากๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แรงดันอิมพัลส์ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา

2.2 วงจรพื้นฐานวัดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานการวัดแรงดันอิมพัลส์จะประกอบด้วยสายนำ (L) ต่อจากจุดที่ต้องการวัดแรงสูง เช่น วัสดุทดสอบ P ซึ่งอาจมีตัวความต้านทานหน่วง R_d อยู่ที่ต้นสายนำหรือที่อิเล็กโทรดแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ VD เคเบิลวัด Z_C อุปกรณ์วัดและบันทึกรูปคลื่น M และระบบวัดจะต้องมีระบบสายดิน G ที่ดี ดังในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรพื้นฐานของระบบทดสอบแรงดันทั่วไป

จากวงจรในรูปที่ 2.3 องค์ประกอบในระบบวัดแรงดันจะมีหน้าที่ต่างๆ ดังนี้

1) ตัวความต้านทานหน่วง ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งในภาวะทรานเซียนต์ที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำของสายนำกับค่าเก็บประจุของโวลเตจดิไวเดอร์ ตัวความต้านทานหน่วงที่ใช้เป็นแบบไร้ความเหนี่ยวนำ ซึ่งอาจต่อไว้ที่ต้นสายนำหรือที่อิเล็กโทรดแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ ในกรณีที่สายนำมีความยาวมาก การต่อตัวความต้านทานหน่วงที่ต้นสายนำ โดยให้มีค่าประมาณเท่ากับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำ จะหน่วงการแกว่งที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากันของสายนำกับวงจรกำเนิดแรงดันและโวลเตจดิไวเดอร์ [5,6]

2) สายนำระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจดิไวเดอร์ โดยทั่วไปโวลเตจดิไวเดอร์จะต้องอยู่ห่างจากอุปกรณ์ทดสอบโดยความยาวของสายนำจะต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงของโวลเตจดิไวเดอร์เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่มีต่อโวลเตจดิไวเดอร์ลง ขนาดของสายนำควรจะต้องมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรนา ซึ่งจะเป็นคลื่นรบกวนต่อระบบวัดแรงดันได้ ในวงจรทดสอบทั่วไป สายนำมักอยู่ในแนวระดับ ซึ่งเวลาคลื่นเดินทาง τ_L จะมีค่าขึ้นอยู่ความเร็วแสง c เนื่องจาก $Z_L = \sqrt{L_L / C_L}$ และ $\tau_L = \sqrt{L_L C_L} = l/c$ โดย L_L คือค่าความเหนี่ยวนำ, C_L คือค่าเก็บประจุและ l คือความยาวของสายนำ ตามลำดับ ดังนั้น จะได้ว่า $Z_L = l/cC_L$ ค่าเก็บประจุของสายนำสามารถคำนวณได้ โดยสมมติว่าสายนำเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง d วางอยู่สูง H เหนือระนาบดิน สมการหาค่าเก็บประจุของสายนำคือ [5]

$$C_L = \frac{2\pi\varepsilon_o l}{A} \qquad (2.6)$$

โดยที่ $A = \ln\left(\frac{4H}{d}\right) - \ln\frac{1}{2}\left(1+\sqrt{1+2(H/l)^2}\right)$

เนื่องจาก $c = 1/\sqrt{\mu_o\varepsilon_o}$ โดยที่ μ_o และ ε_o คือค่าเพอร์มีบิลิตีและค่าเพอร์มิตติวิตีของอวกาศตามลำดับ ดังนั้น จะได้ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำเป็น

$$Z_L = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}}A \approx 60A \qquad (2.7)$$

3) โวลเตจดิไวเดอร์ ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมาให้มีขนาดอยู่ในย่านที่อุปกรณ์วัดในภาคแรงต่ำสามารถวัดได้

4) เคเบิลวัด ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์มายังอุปกรณ์วัดเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปเป็นแบบแกนร่วม (coaxial cable) ที่มีการลดทอนของสัญญาณต่ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5) อุปกรณ์วัดและบันทึกรูปคลื่น อาจเป็นโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดหรือออสซิลโลสโคปโดยทั่วไป อุปกรณ์เหล่านี้จะอยู่ในห้องที่มีชีลด์เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก

6) ระบบสายดิน ทำหน้าที่เชื่อมจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบทดสอบให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำเพื่อให้แรงดันตกในสายดินมีค่าน้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้แถบโลหะบาง เช่น ทองแดงแผ่นบาง

2.3 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด

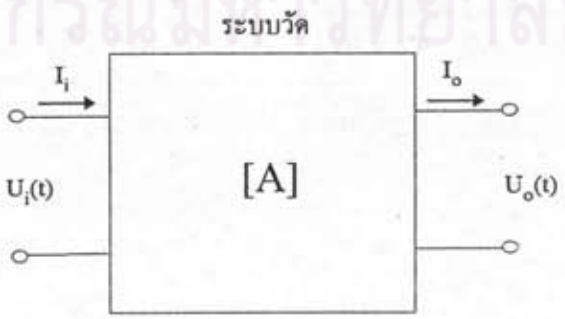
เพื่อให้ผลการวัดขนาดและลักษณะรูปคลื่นของแรงดันมีความถูกต้องจึงจำเป็นต้องมีระบบวัดที่ดี ซึ่งคุณสมบัติของระบบวัดแรงดันทั่วไปจะพิจารณาจากองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1) ผลตอบสนองรูปขั้น
2) สเกลแฟกเตอร์

2.3.1 ผลตอบสนองรูปขั้น

เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติการถ่ายโอน (transfer characteristic) ของโวลเตจดิไวเดอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ได้ดีขึ้น จึงควรที่จะได้ทราบถึงคำจำกัดความหรือความหมายที่เกี่ยวข้องบางประการเสียก่อน

โวลเตจดิไวเดอร์ถือเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นแบบพาสซีฟ ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยข่ายวงจร 4 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ข่ายวงจร 4 ขั้วที่เขียนแทนระบบวัด

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ขาเข้าและขาออกในเชิงความถี่ สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$\begin{bmatrix} U_i(s) \\ I_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(s) & A_{12}(s) \\ A_{21}(s) & A_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_o(s) \\ I_o(s) \end{bmatrix} \qquad (2.8)$$

เมื่อ s คือตัวแปลงลาปลาซ

ในกรณีที่ $I_o = 0$ จะสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ได้เป็น

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{A_{11}(s)} \qquad (2.9)$$

ค่า H(s) จะแทนผลตอบสนองแอมพลิจูดและเฟสของระบบในเชิงความถี่ ที่ความถี่ต่ำๆ แอมพลิจูดจะมีค่าคงที่ เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นแอมพลิจูดจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ความถี่ที่แอมพลิจูดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ± 3 dB เรียกว่าความถี่จำกัด (limit frequency) [7] ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ (normalized transfer function) จะสามารถเขียนแทนได้ด้วย

$$h(s) = \frac{A_{11}(0)}{A_{11}(s)} \qquad (2.10)$$

เนื่องจากโวลเตจดิไวเดอร์มักจะมีค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ค่อนข้างสูง ดังนั้น การหาผลตอบสนองแอมพลิจูด/ความถี่ (amplitude/frequency response) จึงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีที่นิยมในทางปฏิบัติคือ การหาผลตอบสนองรูปขั้น (step response) G(t) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{s}H(s)\right] \qquad (2.11)$$

จากผลตอบสนองรูปขั้นที่ได้จะสามารถคำนวณหาค่าแรงดันขาออก เมื่อทราบแรงดันขาเข้า $V_i(t)$ ใดๆ ได้จาก [5,6]

$$V_o(t) = \int_0^t V_i'(t-\tau) \cdot G(\tau) \cdot d\tau \qquad (2.12)$$

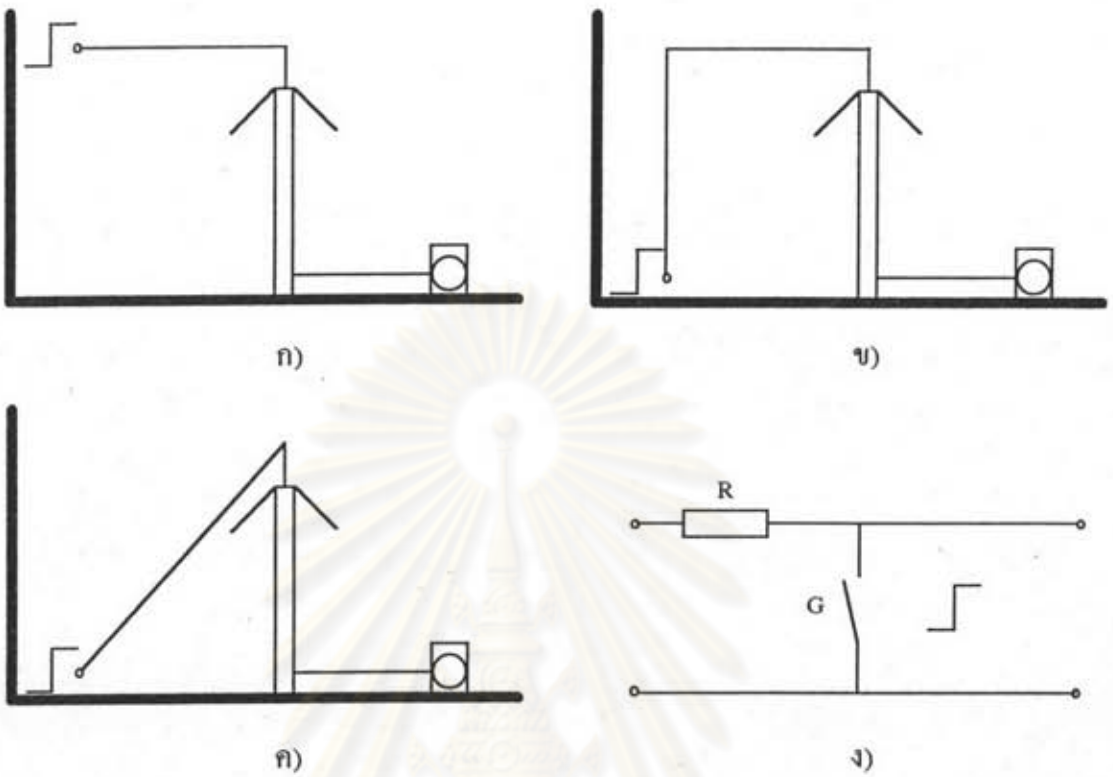
เมื่อ $V_i'(t-\tau)$ คือ อนุพันธ์ของ $V_i(t-\tau)$ เมื่อเทียบกับ τ

เวลาตอบสนองของระบบวัดสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ ดังแสดงในสมการ (2.13)

$$T_N = \lim_{s \to 0}\left[\frac{1-h(s)}{s}\right] \qquad (2.13)$$

โดยวงจรที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองรูปขั้นตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60-2(1994) [7] แสดงไว้ในรูปที่ 2.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขั้นสำหรับระบบวัดแรงดัน
โดยที่ G คือแกปสร้างแรงดันรูปขั้น

วงจรที่มาตรฐานแนะนำไว้คือ วงจรในรูปที่ 2.5ก) และพารามิเตอร์ผลตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้น มาตรฐานได้กำหนดนิยามไว้ดังนี้

1) พารามิเตอร์ผลตอบสนอง (response parameters) หมายถึง พารามิเตอร์ซึ่งได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้นโดยวิธีที่กำหนด

2) จุดเริ่มต้นเสมือนของผลตอบสนองรูปขั้น (virtual origrin of a step response, O_1) หมายถึง จุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากทาบกับส่วนที่ชันที่สุดของหน้าคลื่นของผลตอบสนองรูปขั้น ในกรณีที่มีการแกว่งบนหน้าคลื่น จะใช้เส้นเฉลี่ยลากผ่านส่วนที่เกิดการแกว่งและใช้เส้นนี้ในการหาเส้นตรงข้างต้น

3) ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ (normalized step response, g(t)) หมายถึง ผลตอบสนองรูปขั้นที่นอร์มัลไลซ์ให้ระดับอ้างอิงมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย (ดูรูปที่ 2.6ก)

4) อินทีกรัลผลตอบสนองรูปขั้น (step response integral) หมายถึง อินทีกรัลจาก O_1 ถึง t ของ 1 ลบด้วยผลตอบสนองรูปขั้น g(t) (ดูรูปที่ 2.6ข)

$$T(t) = \int_{o_1} (1 - g(\tau))d\tau$$

5) เวลาตอบสนองจากการทดลอง (experimental response time, T_N) หมายถึง ค่าของอินทีกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่ t_{max}

$$T_N = T(t_{max})$$

6) เวลาตอบสนองบางส่วน (partial response time, T_α) หมายถึง ค่าสูงสุดของอินทีกรัลผลตอบสนองรูปขั้น

7) เวลาตอบสนองเศษเหลือ (residual response time, $T_R(t_i)$) หมายถึง เวลาตอบสนองลบด้วยค่าของอินทีกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่เวลาที่กำหนด t_i โดย $t_i < t_{max}$

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i)$$

8) ส่วนพุ่งเกิน (overshoot, β) หมายถึง ค่าสูงสุดของผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ g(t) ที่เกินหนึ่งหน่วย

9) เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น (initial distortion time, T_O) หมายถึง พื้นที่ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยเส้นศูนย์, ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ g(t) และเส้นตรงที่ใช้หา O_1

10) เวลาเข้าสู่ภาวะคงตัว (settling time, t_s) หมายถึง เวลาที่สั้นที่สุดที่เวลาตอบสนองเศษเหลือ $T_R(t_i)$ มีค่าน้อยกว่า 2 % ของ t

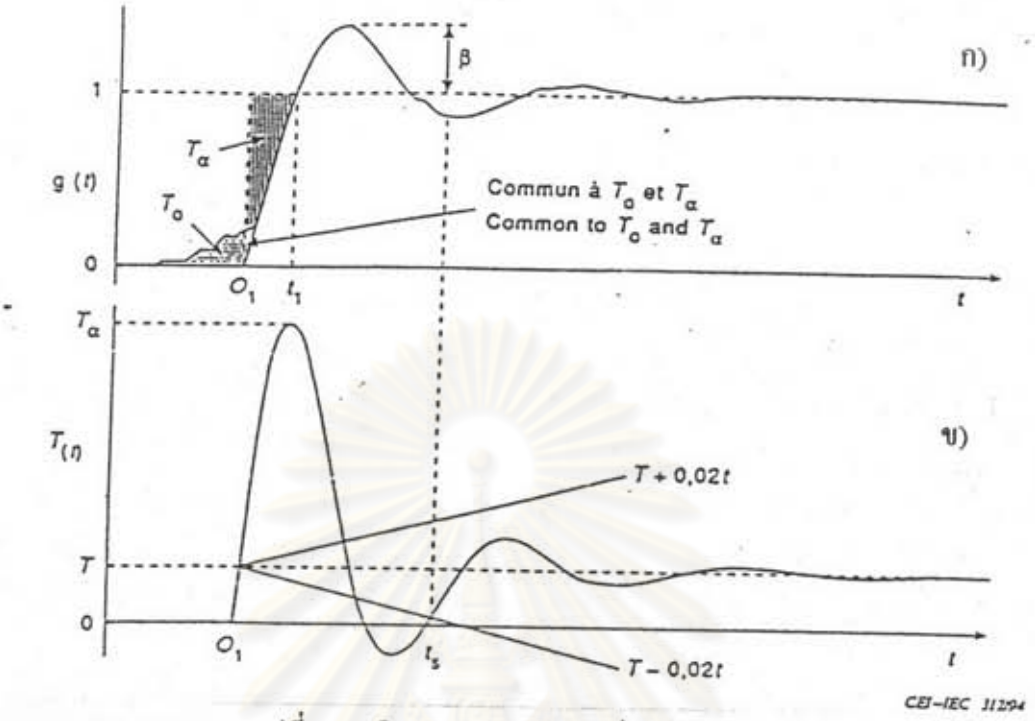
$$|T_N - T(t)| < 0.02t_s$$

สำหรับทุกๆ ค่าของ t ในช่วงจาก t_s ถึง t_{max}

เนื่องจากในมาตรฐานไม่ได้ระบุค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า แต่ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับพารามิเตอร์เหล่านี้ไว้ [7] ดังนี้

ในการณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ที่ค่าเวลาหน้าคลื่น T_1 ส่วนพุ่งเกิน β และเวลาตอบสนองบางส่วน T_α ควรอยู่ในเงื่อนไขที่ว่า β และ T_α/T_1 จะต้องอยู่ในบริเวณส่วนที่แรเงาของรูปที่ 2.7

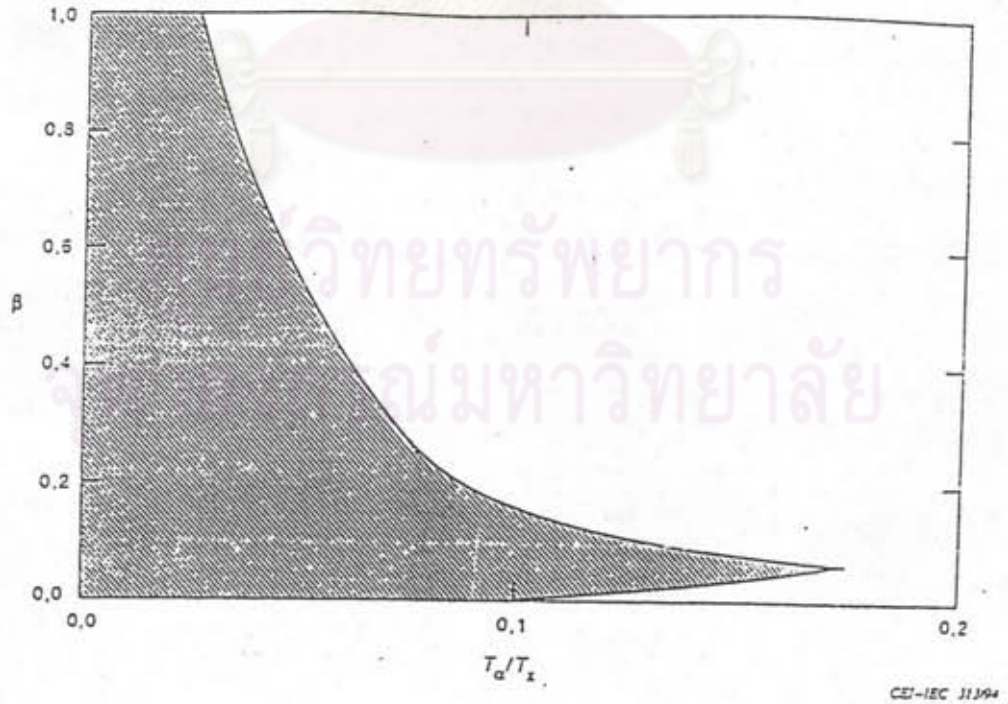
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง [7]

ก) เมื่อเทียบกับ g(t)

ข) เมื่อเทียบกับ T(t)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_X [7]

โดยที่ T_X คือ เวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการวัด

ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นในช่วงเวลาคลื่นตัด T_C พารามิเตอร์ผลตอบสนองควรอยู่ในเงื่อนไขต่อไปนี้

- เวลาตอบสนองและเวลาตอบสนองบางส่วนควรมีค่า

$$T_\alpha - 0.03T_C \leq T_N \leq 0.03T_C$$

- เวลาเข้าสู่ภาวะคงตัวควรมีค่า

$$t_s \leq T_C$$

- เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้นควรมีค่า

$$T_0 \leq 0.005T_C$$

2.3.2 สเกลแฟกเตอร์

2.3.2.1 ความหมายของสเกลแฟกเตอร์

ความหมายของสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัด มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [7] ได้นิยามไว้ ดังนี้

"สเกลแฟกเตอร์ หมายถึง ตัวประกอบที่นำไปคูณกับค่าแรงดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดเพื่อหาค่าแรงดันป้อนเข้า"

มาตรฐานได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1) ความไม่แน่นอน (uncertainty)

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น จะต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดค่ายอดไม่เกิน ± 3 %

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น จะต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดค่ายอดไม่เกิน ± 5 %

2) ความมีเสถียรภาพ (stability)

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ค่าสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ± 1 % ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ค่าสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ± 3 % ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน

2.3.2.2 การหาสเกลแฟกเตอร์

การหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์ สามารถหาได้จากวิธีใดวิธีหนึ่งต่อไปนี้

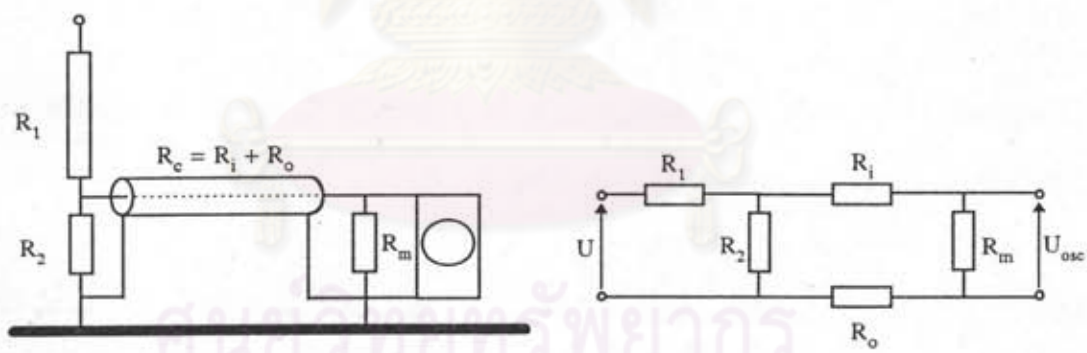
1) การวัดค่าแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อมกัน

2) ใช้วงจรบริดจ์

3) คำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

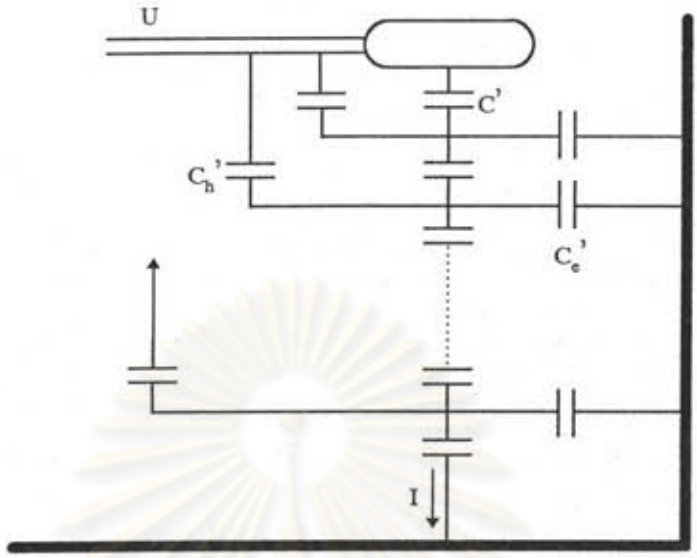
การหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์โดยการใช้วิธีคำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ มาตรฐาน IEC 60-2(1994) ได้ให้ข้อแนะนำไว้ ดังนี้

กรณีของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน ค่าความต้านทานของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำสามารถวัดได้โดยใช้แรงดันต่ำกระแสตรง ซึ่งอาจเป็น Wheatstone bridge หรือโอห์มมิเตอร์ที่มีค่าความแม่นยำสูง สำหรับเคเบิลวัดที่มีความยาวค่อนข้างมาก ค่าความต้านทานกระแสตรงของตัวนำ (ตัวนำในและชีลด์) จะทำให้เกิดการแบ่งแรงดันระหว่าง R_2 และ R_m ซึ่งอาจจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อม R_m ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ดังนั้น ค่าความต้านทานของเคเบิลวัดควรนำมาพิจารณาด้วย [5,6]



รูปที่ 2.8 ผลของความต้านทานของเคเบิลวัดที่มีต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน

ในกรณีของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ค่าเก็บประจุสเตรย์จะมีผลต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งตัวที่กำหนดสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์คือกระแสที่ไหลไปยังภาคแรงต่ำ รูปที่ 2.9 แสดงภาพสเกตช์ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ซึ่งประกอบด้วยค่าเก็บประจุย่อย C' ต่ออนุกรมกันและมีค่าเก็บประจุสเตรย์ C_h' และ C_e' ต่ออยู่ในจำนวนที่เท่ากัน



รูปที่ 2.9 ภาพสเกตช์ของค่าเก็บประจุสมมูล C_{eq} ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

ในภาวะคงตัว สามารถหาค่าเก็บประจุสมมูล (equivalent capacitance) C_{eq} ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงได้จากสมการ [5,6]

$$C_{eq} = \frac{I}{\omega U} \tag{2.14}$$

$$C_{eq} = C\frac{1+\frac{C_h}{4C}}{1+\frac{C_e}{6C}+\frac{C_h}{12C}} \tag{2.15}$$

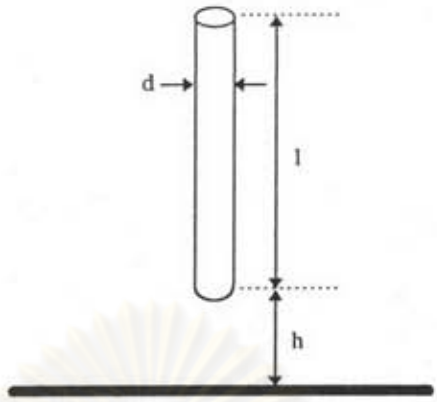
โดยที่ $C = C'/n$; $C_e = nC_e'$; $C_h = nC_h'$; $n >> 1$

เนื่องจาก C_h มีค่าน้อยกว่า C_e มาก ดังนั้น C_{eq} จึงมีค่าน้อยกว่า C เสมอ และถ้าให้ $C_h = 0$ จะสามารถประมาณ C_{eq} ได้เป็น

$$C_{eq} = C\frac{1}{1+\frac{C_e}{6C}}$$

$$C_{eq} = C\left(1-\frac{C_e}{6C}\right) \tag{2.16}$$

โดย C_e สามารถหาได้จากการคำนวณ [5] โดยสมมติให้ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงเป็นท่อโลหะทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ ดังภาพสเกตช์ในรูปที่ 2.10 ซึ่งสมการที่ใช้หาค่าเก็บประจุ คือ



รูปที่ 2.10 ภาพสเกตช์ของท่อทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ

$$C_e = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\left(\frac{2l}{d}\sqrt{\frac{4h+l}{4h+3l}}\right)} \qquad (2.17)$$

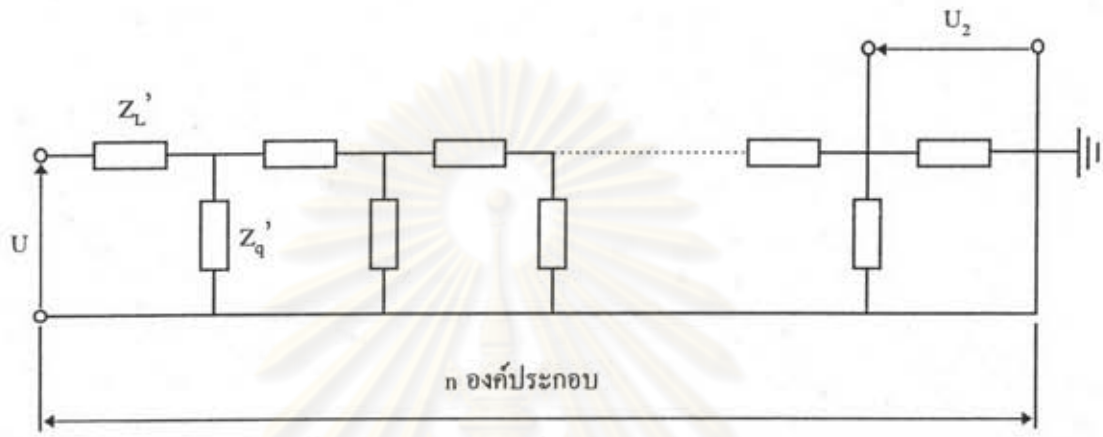
เนื่องจากไม่สามารถวัดค่า C_h และ C_e ได้โดยตรง ดังนั้น การวัดค่าเก็บประจุภาคแรงสูงควรจะวัดในตำแหน่งที่โวลเตจดิไวเดอร์ใช้งานจริง สำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุหรือแบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ค่าเก็บประจุภาคแรงสูงอาจวัดโดยใช้ Schering bridge หรือ transformer ratio-arm bridge โดยไม่แนะนำให้ใช้ RLC bridge แรงต่ำ เพราะสายวัดและค่าเก็บประจุสเตรย์จะถูกรวมเข้าในการวัด ซึ่งทำให้ค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ได้ผิดพลาด นอกจากนี้ ค่าเก็บประจุของเคเบิลวัดยังมีผลต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งต้องนำเข้ามาคิดด้วย

2.4 โวลเตจดิไวเดอร์แบบต่างๆ

โวลเตจดิไวเดอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากส่วนหนึ่งของระบบวัด การออกแบบโวลเตจดิไวเดอร์จะต้องคำนึงถึงระดับแรงดันใช้งาน ชนิดของแรงดัน และค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า [8] โวลเตจดิไวเดอร์ทั่วไปจะประกอบสร้างจากตัวความต้านทานหรือตัวเก็บประจุหรือแบบผสม องค์ประกอบเหล่านี้จะติดตั้งอยู่ในกระบอกฉนวน ซึ่งความสูงจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของแรงดันที่ใช้งาน ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะใช้ระยะวาบไฟตามผิวหรือระยะฉนวน โดยเลือกใช้ระยะอาร์กตามผิวฉนวนเฉพาะ 2 ถึง 2.5 m/MV [5,6]

2.4.1 วงจรสมมูลทั่วไป

วงจรสมมูลทั่วไปของโวลตจดิไวเดอร์จะประกอบด้วยองค์ประกอบย่อยต่อกันในลักษณะเป็นลูกโซ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 [5]



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดิไวเดอร์

โดยองค์ประกอบย่อย Z_L' จะแทนองค์ประกอบที่ต้องการสร้าง ซึ่งอาจเป็นค่าความต้านทาน R' หรือค่าเก็บประจุ C' หรือทั้ง 2 อย่าง ส่วนองค์ประกอบย่อย Z_q' จะแทนค่าเก็บประจุสเตรย์ลงดิน C_e' ซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าของโวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์รวมทั้งหมดสามารถหาได้จาก

$$Z_L = \Sigma Z_L = nZ_L$$
$$Z_q = \Sigma\left(\frac{1}{Z_q}\right)^{-1} = \frac{Z_q}{n} \qquad (2.18)$$

โดยฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์สามารถเขียนได้เป็น

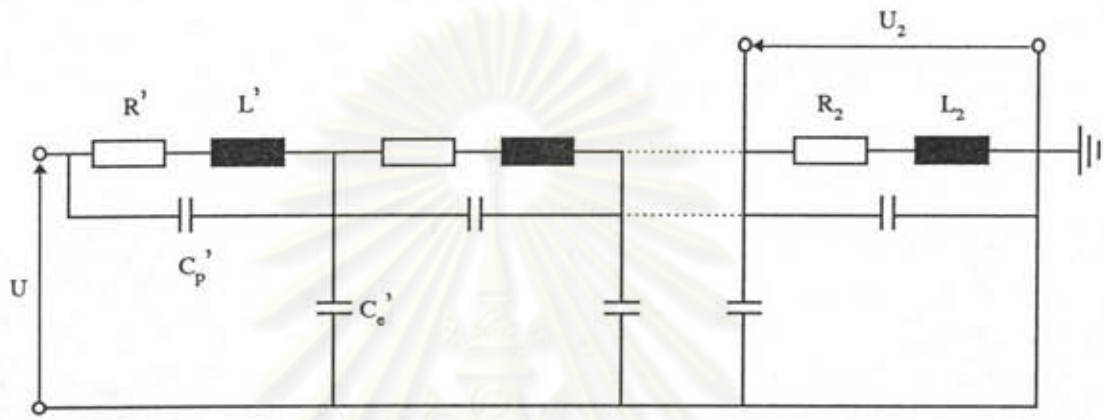
$$h(S) = \frac{n \cdot U_2}{U} = n\frac{\sinh\frac{1}{n}\sqrt{Z_1(S)/Z_q(S)}}{\sinh\sqrt{Z_1(S)/Z_q(S)}} \qquad (2.19)$$

และผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์หาได้จาก

$$g(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{s}h(s)\right] \qquad (2.20)$$

2.4.2 โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน

รูปที่ 2.12 แสดงวงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน โดยประกอบด้วยค่าความเหนี่ยวนำ L' ของค่าความต้านทาน R' ต่อขนานกับค่าเก็บประจุ C_p'



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน

จากวงจรสมมูล สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ได้เป็น [5,6]

$$h(s) = n\frac{\sinh\frac{1}{n}\sqrt{\frac{(R+sL)\cdot sC_e}{1+(R+sL)\cdot sC_p}}}{\sinh\sqrt{\frac{(R+sL)\cdot sC_e}{1+(R+sL)\cdot sC_p}}} \qquad (2.21)$$

และจากสมการ (2.20) จะสามารถหาผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ได้เป็น [5,6]

$$g(t) = 1+2e^{-at}\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^k\frac{\cosh(b_k t)+\frac{a}{b_k}\sinh(b_k t)}{1+\frac{C_p}{C_e}k^2\pi^2} \qquad (2.22)$$

โดยที่ $a = R/2L$

$$b_k = \sqrt{a^2-\frac{k^2\pi^2}{LC_e[1+(C_p/C_e)k^2\pi^2]}}$$

ในกรณีที่ค่าความต้านทานมีค่าสูงพอที่จะทำให้ค่า L/R มีค่าน้อยมากๆ และ $C_p << C_e$ ซึ่งสามารถที่จะละผลของ L และ C_p ได้ ดังนั้น จึงสามารถเขียนสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ได้เป็น [5,6]

$$h(s) = n\frac{\sinh\frac{1}{n}\sqrt{sRC_e}}{\sinh\sqrt{sRC_e}} \qquad (2.23)$$

และจากสมการ (2.20) จะสามารถหาผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ได้เป็น [5,6]

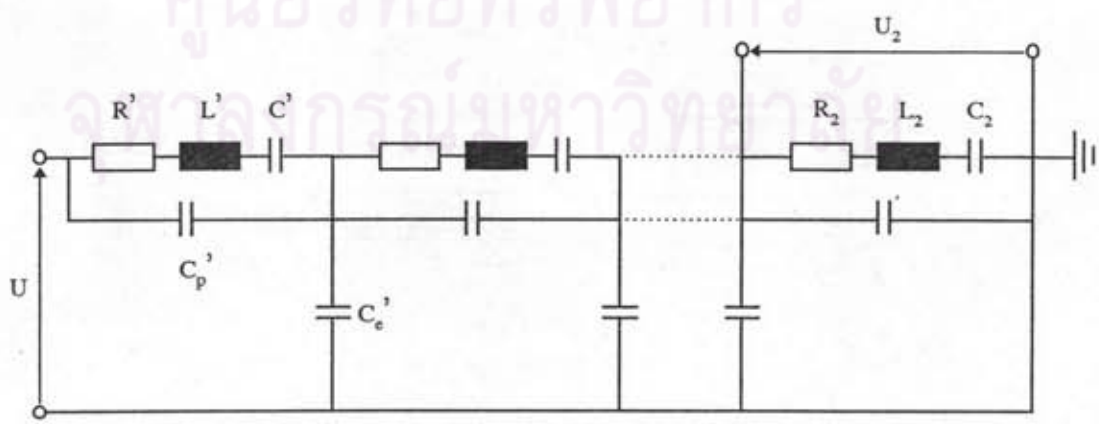
$$g(t) = 1+2\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^k \exp\left(-\frac{k^2\pi^2}{RC_e}t\right) \qquad (2.24)$$

เวลาตอบสนองสามารถคำนวณได้โดยแทนค่า h(s) ลงในสมการ (2.13) ซึ่งจะได้ผลเป็น

$$T_N = \frac{RC_e}{6} \qquad (2.25)$$

2.4.3 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

การวิเคราะห์หาผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุสามารถหาได้ในทำนองเดียวกับโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน โดยใช้วงจรสมมูลในรูปที่ 2.13 ซึ่งตัวเก็บประจุถูกแทนด้วยค่าเก็บประจุ C' และค่าความเหนี่ยวนำ L' ส่วนค่าความต้านทาน R' ที่ต่ออนุกรมอยู่เป็นการแทนตัวประกอบความสูญเสียในตัวเก็บประจุหรืออาจเป็นตัวความต้านทานที่ต่ออนุกรมเข้าไปจริง



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

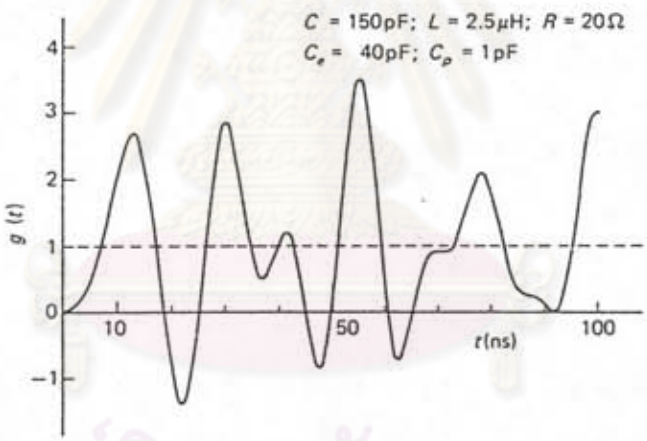
ดังนั้น ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์สามารถเขียนได้เป็น [5,6]

$$g(t) = 1 - \frac{C_e}{6(C+C_p)} + 2e^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(b_k t) + \frac{a}{b_k}\sinh(b_k t)}{AB} \qquad (2.26)$$

โดยที่ $A = \left(1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{Ck^2\pi^2}\right)$, $a = R/2L$

$$B = \left(1 + \frac{C_p k^2\pi^2}{C_e}\right) \quad , b_k = \sqrt{a^2 - \frac{k^2\pi^2}{LC_e[1+(C_p/C_e)k^2\pi^2]}}$$

ตัวประกอบความสูญเสีย $\tan\delta = \omega R'C' = \omega RC$ สามารถหาได้จากการวัด ซึ่งเมื่อแทนลงไปในสมการ (2.26) จะได้ผลตอบสนองรูปขั้นดังแสดงในรูปที่ 2.14 [5]



รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่ได้จากการคำนวณ [5]

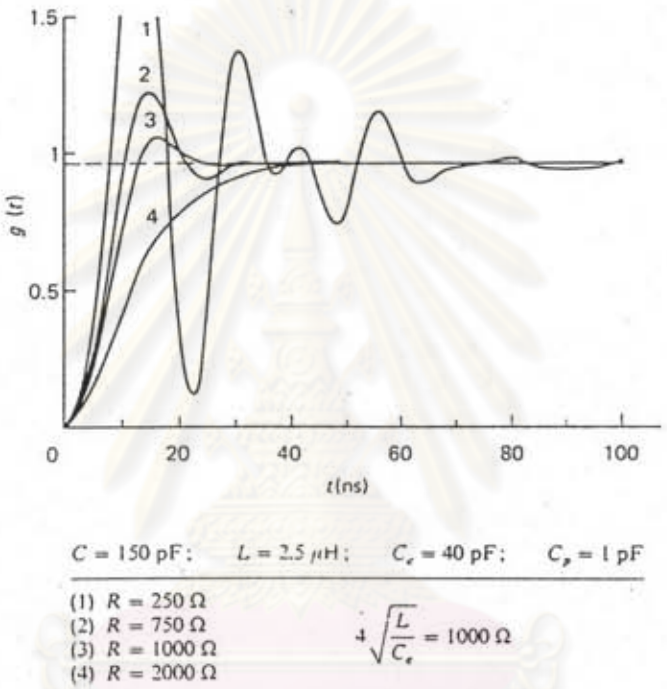
การแกว่งที่เกิดขึ้นในผลตอบสนองรูปขั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับเวลาคลื่นเดินทาง $\tau = \sqrt{LC_e}$ ในตัวโวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยประมาณจากความเร็วแสง [6] โดยความถี่ของการแกว่งสามารถหาได้จาก [8]

$$f = \frac{1}{2\tau} = \frac{1}{2\sqrt{LC_e}} \qquad (2.27)$$

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความไวต่อแรงดันขาเข้าที่มีเวลาขึ้นเร็วๆ และแรงดันขาออกจะเกิดแกว่งอย่างมาก ซึ่งเมื่อต่อเข้าไปในระบบวัดจะเกิด

การเรโซแนนซ์กับสายนำ ทำให้ระบบวัดเกิดการแกว่ง ดังนั้น โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุจึงไม่สามารถที่จะวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด แต่ยังคงวัดค่ายอดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มได้

การปรับปรุงผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุสามารถทำได้โดยการต่อตัวความต้านทานจริงอนุกรมกับตัวเก็บประจุ ถ้าความต้านทานมีค่าไม่สูงจนเกินไปแต่เพียงพอที่จะหน่วงการแกว่ง จะได้ผลตอบสนองรูปขั้นที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 2.15 [5]



รูปที่ 2.15 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงที่ได้จากการคำนวณ [5]

จากรูปจะได้ความต้านทานหน่วงที่เหมาะสมมีค่าเป็น

$$R \approx 4\sqrt{\frac{L}{C_e}} \qquad (2.28)$$

และเวลาตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์สามารถคำนวณได้เป็น

$$T_N = \frac{RC_e}{6} \qquad (2.29)$$

จากสมการ (2.29) จะเห็นได้ว่าเวลาตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์แบบนี้จะเร็วมาก เนื่องจากความต้านทานหน่วงที่มีค่าต่ำ นอกจากนี้ ตัวความต้านทานหน่วงก็จะไม่โหลดมาก เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านโวลเตจดิไวเดอร์เกิดจากแรงดันทรานเซียนต์ขาเข้าเท่านั้น

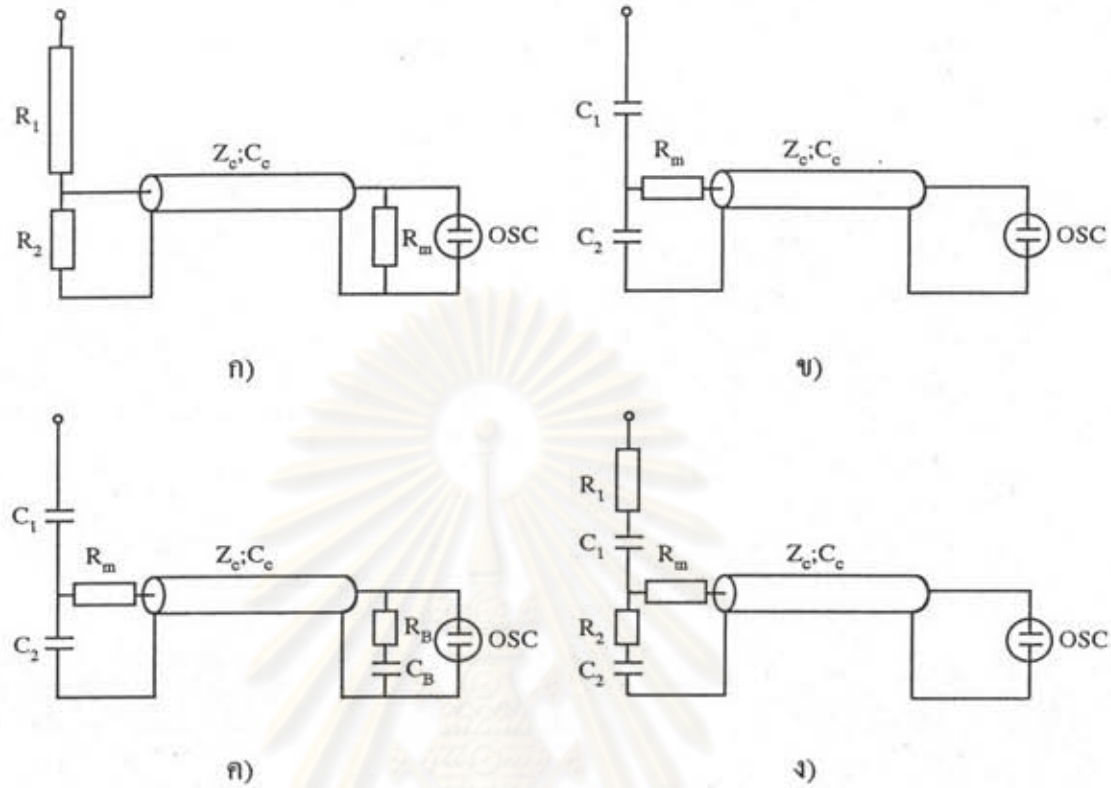
ในกรณีที่ต้องการวัดเพียงค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม สามารถปรับปรุงผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์ได้โดยการใส่ตัวความต้านทานหน่วงภายนอก ซึ่งค่าเวลาตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์จะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวเวลา $R_d C$ โดยที่ C คือค่าเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งค่าคงตัวเวลานี้ไม่ควรมีค่าเกิน 150 ns [6]

2.5 การต่อแมทชิงในภาคแรงต่ำของระบบวัด

ในการวัดแรงดันทรานเซียนต์ที่ส่งผ่านจากโวลเตจดิไวเดอร์ไปยังเครื่องมือวัด ภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์อาจทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันได้ ในที่นี้ จะพิจารณาการต่อแมทชิงอิมพีแดนซ์เพื่อส่งผ่านแรงดันอิมพัลส์จากโวลเตจดิไวเดอร์ไปยังเครื่องมือวัด

โดยที่เคเบิลวัดจะพิจารณาเป็นสายส่งแบบไม่มีพลังงานสูญเสีย ดังนั้น ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ $Z_C = \sqrt{L_C / C_C}$ จึงไม่ขึ้นอยู่กับความถี่และเวลาคลื่นเดินทาง $\tau_C = \sqrt{L_C C_C}$ มีค่าที่แน่นอน สำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน การต่อแมทชิงสามารถทำได้ง่ายๆ โดยการต่อตัวความต้านทาน $R_m = Z_C$ ที่ปลายทางของเคเบิลวัด ซึ่งทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเป็นศูนย์ แรงดันที่ตกคร่อม R_2 และส่งผ่านเคเบิลวัดจะไม่เกิดการผิดเพี้ยน เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของเคเบิลวัดคือ $R_m = Z_C$ ค่าความต้านทานนี้จะต่อขนานเข้ากับ R_2 ดังนั้น จึงต้องพิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์

ในกรณีโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ เคเบิลวัดไม่สามารถที่จะต่อแมทชิงที่ปลายทางได้ เนื่องจากความต้านทานที่มีค่าต่ำเมื่อต่อขนานเข้ากับ C_2 จะไปโหลดภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์และแรงดันขาออกจะมีขนาดลดลงตามเวลา เพื่อหลีกเลี่ยงการแกว่งของคลื่นเดินทาง เคเบิลวัดจึงควรต่อแมทชิงที่ต้นทาง แรงดันที่ตกคร่อม C_2 จะแบ่งครึ่งโดย $R_m = Z_C$ ที่ต้นทางของเคเบิลวัด เมื่อแรงดันที่แบ่งครึ่งนี้เดินทางไปถึงปลายเคเบิลวัด ซึ่งมีลักษณะเป็นวงจรเปิดจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับเท่าตัว ดังนั้น แรงดันที่ปรากฏที่เครื่องมือวัดจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อม C_2 เมื่อคลื่นสะท้อนกลับมาถึงต้นทางที่มี $R_m = Z_C$ ต่ออนุกรมอยู่และ C_2 เสมือนกับลัดวงจร จึงไม่ทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับอีก



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของการต่อแมทชิงสำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบต่างๆ

ก) แบบความต้านทาน

ข) แบบตัวเก็บประจุ แมทชิงธรรมดา

ค) แบบตัวเก็บประจุ แมทชิงชดเชย

ง) แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง แมทชิงธรรมดา

ในทางปฏิบัติ C_2 มีค่าที่แน่นอนและจะคายประจุในภาวะทรานเซียนต์ จากการคำนวณพบว่า ช่วงเวลาการคายประจุมีค่าประมาณ 2 เท่าของเวลาคลื่นเดินทาง หลังจากช่วงเวลานี้ ค่าเก็บประจุของเคเบิลวัดจะอัดประจุจนเต็ม จึงทำให้โวลเตจดิไวเดอร์มีค่าสเกลแฟกเตอร์ 2 ค่า คือ

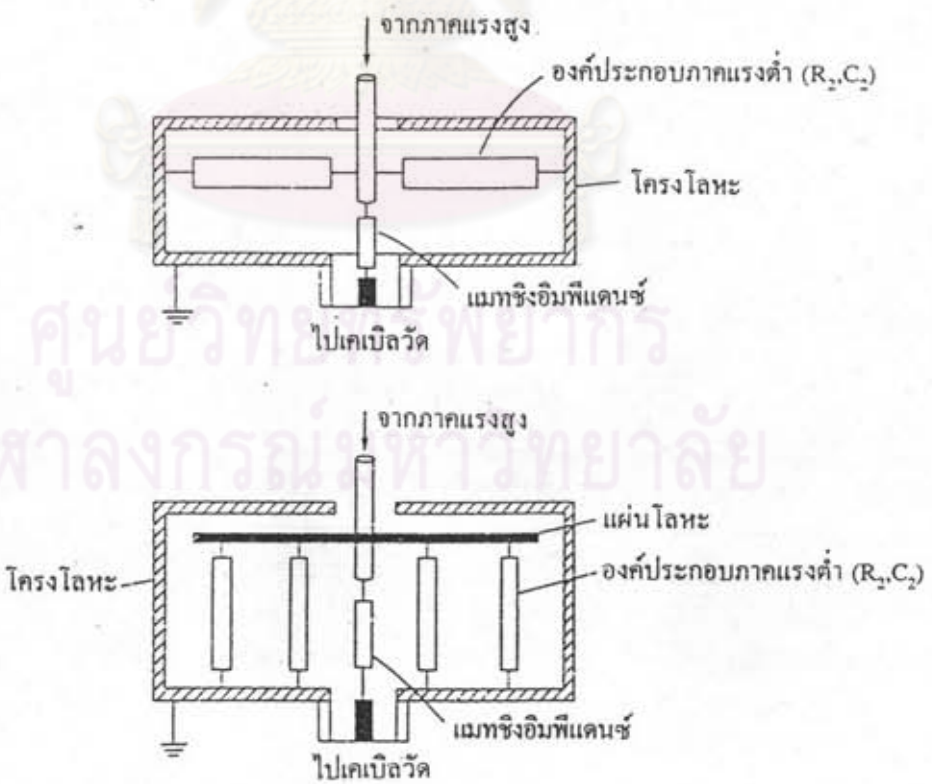
$$n_o = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \qquad \text{ที่ } t = 0$$

$$n_e = \frac{C_1 + C_2 + C_C}{C_1} \qquad \text{ที่ } t \geq 2\tau_C$$

ดังนั้น เคเบิลวัดจึงทำให้เกิดส่วนพุ่งเกิน $\Delta V = (n_e / n_o) - 1 = C_C / (C_1 + C_2)$ ซึ่งอาจละทิ้งผลกระทบนี้ได้ในกรณีที่เคเบิลวัดมีขนาดสั้นหรือ C_2 มีค่าสูงมากๆ อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงผลตอบสนองสามารถทำได้โดยการถ่ายโอนตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ C_2 บางส่วนไปยัง

ปลายทางของเคเบิลวัดและต่อตัวเก็บประจุนี้อนุกรมกับตัวความต้านทาน ดังในรูปที่ 2.16ค) เทคนิคนี้นำเสนอขึ้นครั้งแรกโดย Burch ดังผลสรุปใน [5] โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลกระทบจากส่วนพุ่งเกินนี้ Burch เสนอให้ใช้ความต้านทานแมทชิงทั้ง 2 ตัวมีค่าเท่ากันและเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ นั่นคือ $R_m = R_B = Z_C$ และปรับให้ $C_1 + C_2 = C_B + C_C$ ซึ่งจะทำให้แรงดันที่เวลาเริ่มต้นและที่เวลาอนันต์มีค่าเดียวกัน และส่วนพุ่งเกินลดลงเหลือประมาณ 1/6 ในกรณีที่ $R_m \neq R_B$ เงื่อนไขจะเปลี่ยนไปเป็น $Z_C(C_1 + C_2) = R_B(C_B + C_C)$ [9] สำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.16ง) เนื่องจาก R_2 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ R_1 ค่าความต้านทานแมทชิงจึงมีค่าลดลงเล็กน้อย นั่นคือ $R_m = Z_C - R_2$ และวิธีการต่อแมทชิงดังแสดงในรูปที่ 2.16ค) สามารถนำมาใช้ในกรณีนี้ได้ด้วย

เนื่องจากตัวความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับเคเบิลวัดเป็นส่วนหนึ่งของภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ดังนั้น จึงควรระวังไม่ให้ทางลงสู่ดินของคลื่นสะท้อนมีค่าความเหนี่ยวนำสูงเกินไป ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ การต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำในลักษณะแกนร่วมเป็นวิธีที่ดีในการประกอบสร้าง รูปที่ 2.17 แสดงภาพสเกตช์แสดงภาพตัดขวางของการต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำ



รูปที่ 2.17 ภาพสเกตช์ภาคตัดขวางของการต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำ