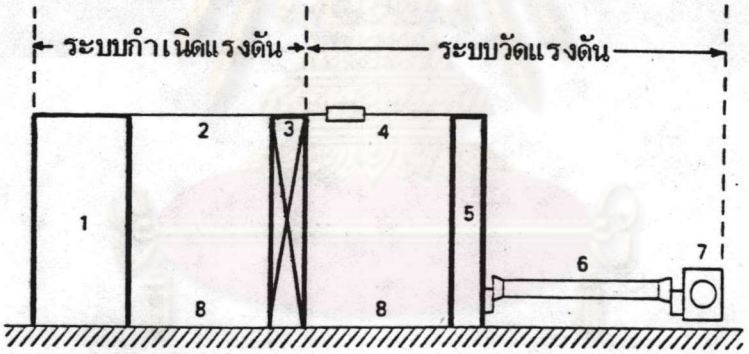
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

2.1 วงจรขั้นพื้นฐานของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานสำหรับทดสอบวัสดุฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ แสดงดังรูปที่ 2.1 จะประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ 2 ส่วน คือ ระบบกำเนิดแรงดัน โดยเริ่มจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ สายนำแรงสูงไปยังวัสดุทดสอบ และระบบวัดแรงดัน โดยเริ่มจากจุดต่อระหว่างวัสดุทดสอบกับความต้านทานหน่วงในสายนำแรงสูงต่อเข้ากับโวลเตจดิไวเดอร์ไปจนถึงอุปกรณ์วัดแรงดันต่ำ



รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานสำหรับทดสอบวัสดุฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์

1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

2 คือ สายนำแรงสูงจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไปยังวัสดุทดสอบ

3 คือ วัสดุทดสอบ

4 คือ ความต้านทานหน่วงในสายนำแรงสูง

5 คือ โวลเตจดิไวเดอร์

6 คือ เคเบิลวัด

7 คือ เครื่องวัดแรงดันต่ำ

8 คือ สายดิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในระบบวัดแรงดันจะประกอบด้วยอุปกรณ์ซึ่งมีหน้าที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1) ความต้านทานหน่วง ทำหน้าที่ในการหน่วงการแกว่ง เนื่องจากอิมพิแดนซ์ไม่แมชกันของสายนำแรงสูงกับวงจรกำเนิดแรงดัน หรือโวลเตจดิไวเดอร์ โดยใช้ค่าความต้านทานหน่วงนี้ให้มีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพิแดนซ์ของสายนำแรงสูง

2) สายนำแรงสูงที่ต่อระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจดิไวเดอร์ โดยทั่วไปจะยาวเท่ากับความสูงของโวลเตจไวเดอร์ หรือวัสดุทดสอบ เพื่อให้ผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีต่อโวลเตจไวเดอร์ลดลง สายนำแรงสูงต้องมีขนาดโตพอที่จะไม่เกิดโคโรนา ซึ่งเป็นคลื่นรบกวนต่อวงจรวัดแรงดันได้ และต้องไม่ยาวเกินไปจนทำให้เกิดการล่าช้าของสัญญาณมากเกินไป

3) โวลเตจดิไวเดอร์ ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมา ให้อยู่ในย่านที่เครื่องวัดแรงดันต่ำสามารถวัดได้

4) สายเคเบิลวัดแรงดัน ทำหน้าที่นำแรงดันที่ปลายขาออกของโวลเตจดิไวเดอร์มายังเครื่องวัดแรงดันต่ำ และแยกเครื่องวัดแรงดันต่ำให้ห่างจากโวลเตจดิไวเดอร์ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และลดสัญญาณรบกวนที่จะมีต่อเครื่องวัดแรงดันต่ำ สายเคเบิลวัดเป็นชนิดใช้งานกับความถี่สูง มีการลดทอนสัญญาณน้อย และเป็นแบบโคแอกเชียล

5) เครื่องวัดแรงดันต่ำ อาจเป็นโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอด หรือออสซิลโลสโคป เครื่องวัดนี้มักจะอยู่ในห้องที่มีชีลด์โลหะ เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก เว้นแต่ได้ออกแบบให้มีชีลด์ป้องกันสัญญาณรบกวนอยู่ในตัว

6) สายดิน ทำหน้าที่เชื่อมโยงจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่างๆในระบบทดสอบให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อลดแรงดันตกในสายดินให้น้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้แผ่นโลหะบางขนาดใหญ่ปูบนพื้นห้องทดสอบ เช่น ทองแดงแผ่นบาง

2.2 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของระบบวัด

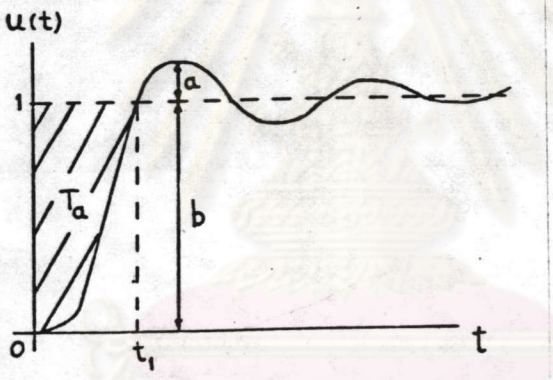
ระบบวัดที่ดีนั้น จะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ คือ

1) มีผลตอบสนองต่อแรงดันรูปชั้นที่ดี มีการแกว่งในผลตอบสนองรูปชั้นน้อย

และมีเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวสั้นเมื่อเทียบกับเวลาขึ้น (Rise time) ของแรงดันที่ต้องการวัด

2) มีเวลาตอบสนองสั้น เพื่อจะได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันได้เร็ว สำหรับแรงดันรูปคลื่นมาตรฐาน 1.2 / 50 μs เวลาตอบสนองที่ต้องการ [9] คือ $|T| \leq 0.2$ μs และ $|T| \leq 0.025$ μs สำหรับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นที่เวลา 0.5 μs

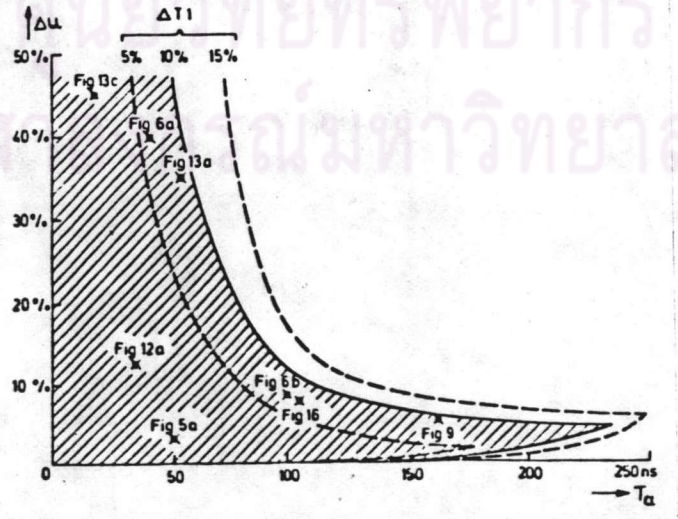
3) ผลตอบสนองต่อแรงดันรูปขั้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Overshoot (Δu) กับ เวลาตอบสนองบางส่วน (Partial response time , T_a) ที่ได้ต้องพอเหมาะซึ่งทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดหน้าคลื่น (T_1) ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ามีค่าน้อยกว่า 10 % ดังแสดงดังรูปที่ 2.3



$$\Delta u = (a/b)*100\%$$

$$T_a = \int_0^{t_1} [1-u(t)]dt$$

รูปที่ 2.2 นิยามของ Overshoot และ เวลาตอบสนองบางส่วน [10]



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Overshoot และ เวลาตอบสนองบางส่วน[10]

4) อัตราส่วนแรงดันมีค่าคงที่ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน และไม่ขึ้นกับระดับแรงดัน ตั้งแต่แรงดันต่ำจนถึงแรงดันที่กำหนด

2.2.1 ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย (Unit step response)

ในระบบวัดหนึ่งๆ แรงดันขาออก $v_o(t)$ ในโดเมนเวลา (time domain) จะสามารถหาได้จากสมการ [2]

$$v_o(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} V_{ik} H(jw_k) \exp(jkwt) \qquad (2.1)$$

เมื่อ V_{ik} เป็นฟูเรียทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform) ของแรงดันขาเข้าฮาร์โมนิคที่ k

$H(jw_k)$ เป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชั่นของแรงดันขาออกต่อแรงดันขาเข้าในโดเมนความถี่ฮาร์โมนิคที่ k

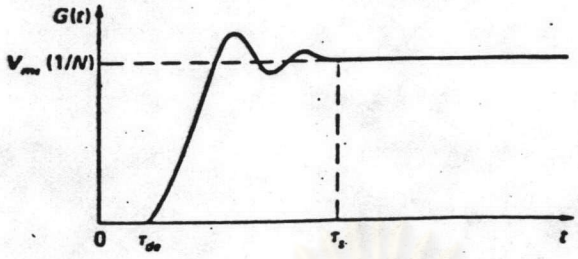
w_k เป็นความเร็วเชิงมุมฮาร์โมนิคที่ k

ในระบบวัดแรงดันสูง การหาแรงดันขาออกในโดเมนเวลา โดยใช้สมการ (2.1) จะพบกับความยุ่งยากพอสมควร วิธีที่นิยมใช้คือ การหาแรงดันขาออกในโดเมนเวลา โดยอาศัยผลตอบสนองรูปขั้น สามารถทำได้ดังนี้

แรงดันรูปขั้นที่ใช้ทดสอบผลตอบสนองรูปขั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} v_i(t) &= 0 \quad \text{เมื่อ} \quad t < 0 \\ &= V_{mi} \quad \text{เมื่อ} \quad t > 0 \end{aligned} \qquad (2.2)$$

เมื่อป้อนแรงดันรูปขั้นให้ระบบวัด จะได้ผลตอบสนองรูปขั้น G(t) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลตอบสนองรูปขั้น G(t)

N คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันขาเข้า ต่อแรงดันขาออกของระบบวัดที่สภาวะคงตัว

τ_{de} คือ เวลาล่าช้าของระบบวัด

τ_s คือ เวลาที่ผลตอบสนองรูปขั้นเข้าสู่สภาวะคงตัว

ให้ g(t) เป็นผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย โดยถือว่าขนาดของแรงดันขาออกมีขนาดหนึ่งหน่วยที่สภาวะคงตัว ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย g(t) สัมพันธ์กับผลตอบสนองรูปขั้น G(t) ตามสมการ [2]

$$g(t) = NG(t) \qquad (2.3)$$

ถ้าทราบผลตอบสนองรูปขั้น G(t) ซึ่งสามารถหาได้จากวงจรสมมูลของระบบวัด จะสามารถหาแรงดันขาออกของระบบวัด $v_o(t)$ ได้ เมื่อแรงดันขาเข้าเป็น $v_i(t)$ โดยอาศัยทฤษฎีของ Duhamel's integral ดังนี้ [2]

$$\begin{aligned} v_o(t) &= v_i(t)\, G(0^+) + \int_0^t [v_i(\tau)\, G'(t-\tau)]d\tau \\ &= G(t)\, v_i(0^+) + \int_0^t [v_i'(t-\tau)\, G(\tau)]d\tau \end{aligned} \qquad (2.4)$$

เมื่อ $G'(t-\tau)$ และ $v_i'(t-\tau)$ เป็นอนุพันธ์ของ G(t) และ $v_i(t)$ เทียบกับ τ ตามลำดับ

2.2.2 เวลาตอบสนอง (Response time)

เวลาตอบสนอง เป็นคุณสมบัติสำคัญยิ่งประการหนึ่งของระบบวัดที่จะบอกให้ทราบว่า ระบบวัดจะใช้วัดแรงดันอิมพัลส์แบบต่างๆได้เหมาะสมหรือไม่ ถ้าทราบผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วยของระบบวัดแล้ว จะสามารถคำนวณหาเวลาตอบสนองได้ ดังจะกล่าวต่อไป

2.2.2.1 นิยามของเวลาตอบสนอง

แรงดันในอุดมคติที่หน้าคลื่นเพิ่มอย่างเป็นเชิงเส้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [2]

$$v(t) = St \qquad (2.5)$$

เมื่อ S คือความชัน (steepness) ของแรงดัน

ถ้าป้อนแรงดันตามสมการ (2.5) ทางขาเข้าของระบบวัดที่มีผลตอบสนองรูปขั้น G(t) จะได้แรงดันขาออก $v_o(t)$ ซึ่งหาได้โดยสมการ (2.4) [2]

$$v_o(t) = S \int_0^t G(\tau)\, d\tau$$

$$= (S/N) \int_0^t g(\tau)\, d\tau$$

$$Nv_o(t) = S \left[t - \int_0^t (1-g(\tau)d\tau \right]$$

$$v_i(t) - Nv_o(t) = S \int_0^t [\, 1-g(\tau)\,]d\tau \qquad (2.6)$$

ผลคูณ $Nv_o(t)$ คือ ค่าแรงดันสูงขาเข้าที่หาจากแรงดันต่ำขาออก ที่วัดได้เมื่อป้อนแรงดันสูงขาเข้า $v_i(t)$ และเมื่อ $t > \tau_s$ ดังนั้นสมการ (2.6) จะมีค่าคงที่ ถ้า $t > \tau_s$ ดังนั้น

$$v_i(t) - Nv_o(t) = S \int_0^{t>\tau_s} [1-g(\tau)]d\tau$$

$$= S \int_0^{\infty} [1-g(\tau)]d\tau$$

$$= S\, T^{\circ} \qquad (2.7)$$

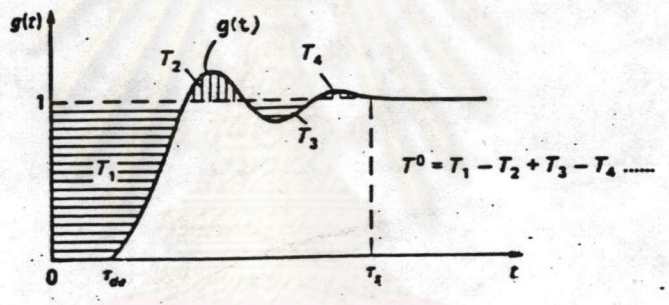
เมื่อ $$T^{\circ} = \int_0^{\infty} [1-g(\tau)]d\tau \qquad (2.8)$$

ค่า T° นี้เรียกว่า " เวลาตอบสนอง " ของระบบวัด และได้แสดงความหมายไว้ในรูปที่ 2.5 ก)

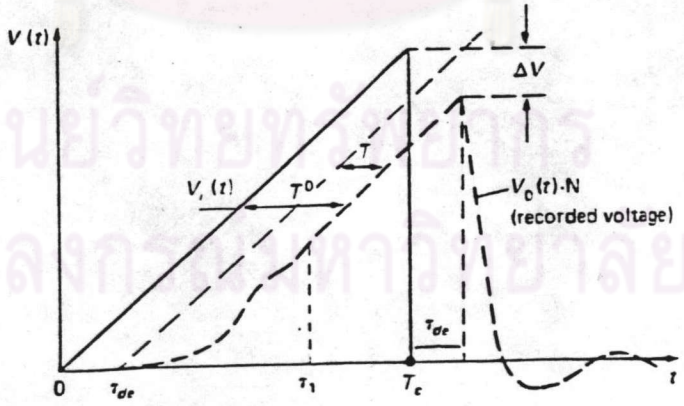
ในกรณีแรงดันรูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น ที่มีเวลาคลื่นตัด $T_c > \tau_{de}$ ดังรูปที่ 2.5 ความแตกต่างของขนาดแรงดันที่วัดได้กับแรงดันที่ป้อนเข้า ΔV หาได้จากสมการ [2]

$$\Delta V = v_i(T_c) - Nv_o(T_c + \tau_{de})$$
$$= S(T^\circ - \tau_{de})$$
$$= ST \qquad (2.9)$$

เมื่อ $$T = T^\circ - \tau_{de}$$
$$= \int_{\tau_{de}}^{\infty} [1-g(\tau)]d\tau \qquad (2.10)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.5 เวลาตอบสนอง

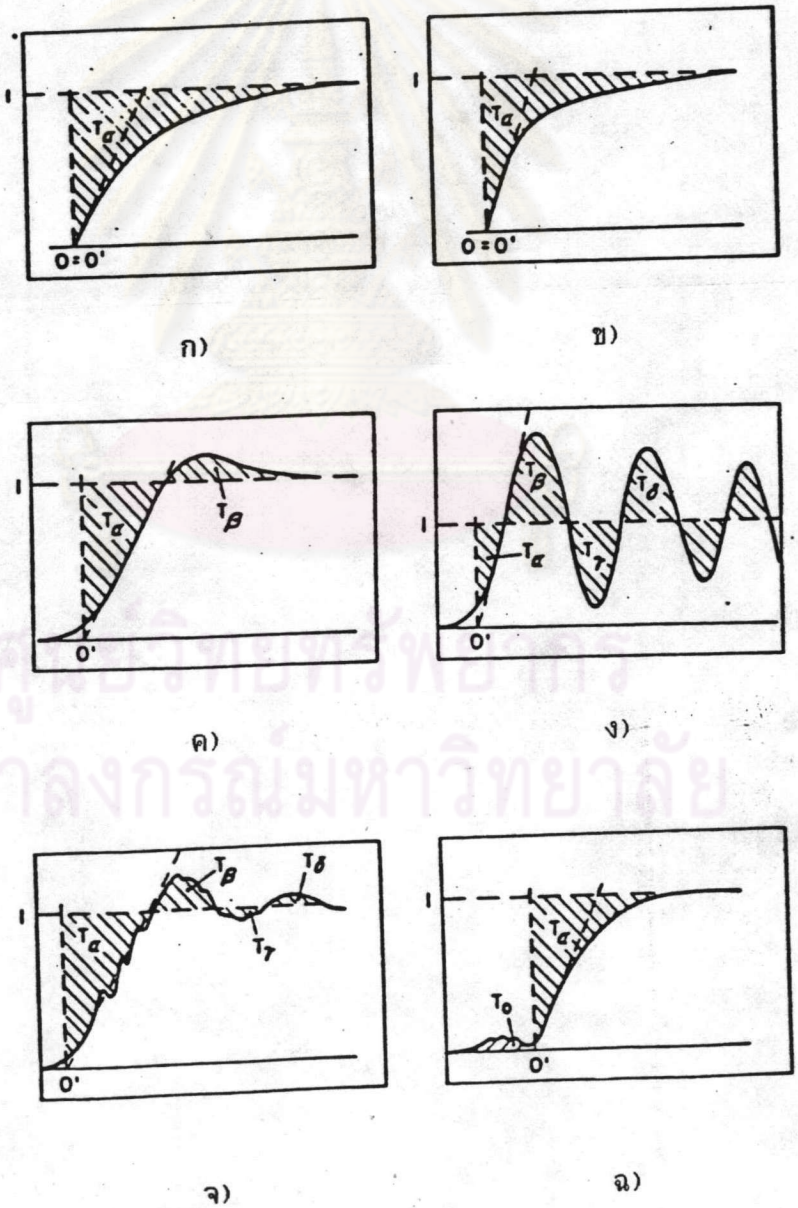
ก) เวลาตอบสนอง T° และผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย

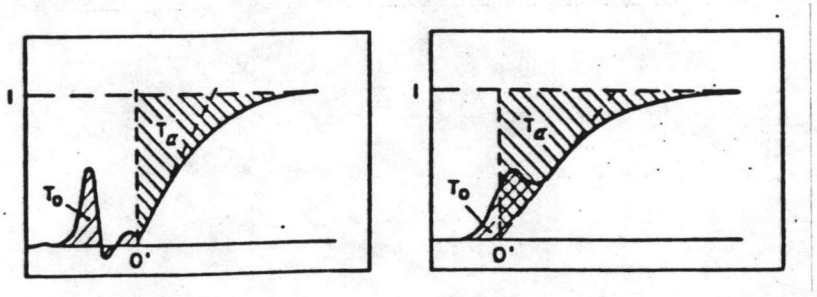
ข) เวลาตอบสนอง T° และ T

เวลาตอบสนอง T นี้เป็นเวลาตอบสนองตามมาตรฐาน ไอ อี ซี [7] ซึ่งแสดงถึงความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของการวัดค่ายอดแรงดัน δ สำหรับแรงดันขาเข้ารูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น โดยที่ δ มีค่าตามสมการ [2]

$$\begin{aligned} \delta &= \Delta V / ST_c \\ &= T / T_c \end{aligned} \qquad (2.11)$$

ผลตอบสนองรูปชั้นหนึ่งหน่วยอาจมีแบบต่าง ๆ ดังภาพออสซิลโลแกรมที่แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นผลจากการทดลอง [9]





ช)　　ช)

รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วยแบบต่าง ๆ ในทางปฏิบัติ

ลักษณะของผลตอบสนองเหล่านี้จะบอกลักษณะสมบัติของระบบการวัดไว้อย่างครบถ้วน คือ ความชันส่วนหน้าเป็นตัวบอกให้ทราบถึงขีดความสามารถความถี่พิกัด ถ้ามีการแกว่ง ดังรูป ง. และ จ. แสดงถึงเรโซแนนซ์ของระบบวัด อัมปลิจูดของผลตอบสนองจะแสดงถึงอัตราส่วนของโวลเตจดิไวเดอร์

เมื่อพิจารณาถึงความหมายของเวลาตอบสนอง ที่นิยามโดยข้อกำหนด ไอ อี ซี ตามสมการ (2.10) จะได้ว่า เวลาตอบสนอง T คือ ผลรวมตามพีชคณิตของพื้นที่ระหว่างเส้นอัมปลิจูดหนึ่งหน่วย (อัมปลิจูดหนึ่งหน่วยถือเอาค่าที่ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วยเข้าสู่สภาวะคงตัว) กับผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย ตั้งแต่เวลา $t = \tau_{de}$ เป็นต้นไป (ดูรูปที่ 2.5 ก)) แต่ในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะกำหนดจุดเริ่มต้นที่ถูกต้องของผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย ดังเช่นรูปที่ 2.6 ค) - ช) ฉะนั้นการหาเวลาตอบสนองจากผลตอบสนองรูปขั้นที่ได้จากการทดลอง จะหาจากจุดเริ่มต้นเสมือน 0′ (ดูรูปที่ 2.6) และค่าเวลาตอบสนองที่ได้ T_n สามารถหาได้จากสมการ [9]

$$T_n = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma \ldots \qquad (2.12)$$

จุดศูนย์เสมือน 0′ ถือเป็นจุดเริ่มต้นของผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย นิยามว่าเป็น จุดตัดของแกนเวลาและเส้นตรงที่ลากสัมผัสรูปคลื่นส่วนหน้าของผลตอบสนองที่มีความชันมากที่สุด ในกรณีที่มีการแกว่งที่หน้าคลื่นดังรูปที่ 2.6 จ) ต้องลากเส้นตรงเฉลี่ยผ่านการแกว่งมาตัดแกนเวลา จุดตัดระหว่างเส้นตรงเฉลี่ยที่ลากผ่านการแกว่งกับแกนเวลาถือเป็นจุดศูนย์เสมือน 0′ ของการหาเวลาตอบสนอง พื้นที่ T_0 ในรูปที่ 2.6 ฉ)-ช) เรียกว่า การเพี้ยนของเวลาเริ่มต้น (Initial distortion time) จะทำให้เกิด

การรบกวนบริเวณค่ายอดแรงดัน เมื่อใช้วัดแรงดันคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น ดังรูปที่ 2.7 ค)

ผลตอบสนองรูปชั้นดังกล่าวแล้ว อาจทดลองหาได้ที่ระดับแรงดันสูงหรือต่ำก็ได้ แต่โดยทั่วไปนิยมทำกันที่ระดับแรงดันต่ำ ทั้งนี้สมมติว่าองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์และวงจรมีคุณสมบัติเชิงเส้น เมื่อใช้กับแรงดันสูงถึงค่าที่กำหนดก็ยังมีคุณสมบัติความถี่สูงอย่างเดิม ในทางปฏิบัติเมื่อเลือกตัวประกอบวงจร และออกแบบสร้างดีแล้ว ก็ถือได้ว่าโวลเตจดิไวเดอร์มีลักษณะสมบัติเชิงเส้น

ในกรณีที่ลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นนั้น อาจเนื่องมาจากสาเหตุต่าง ๆ ที่สำคัญ คือ

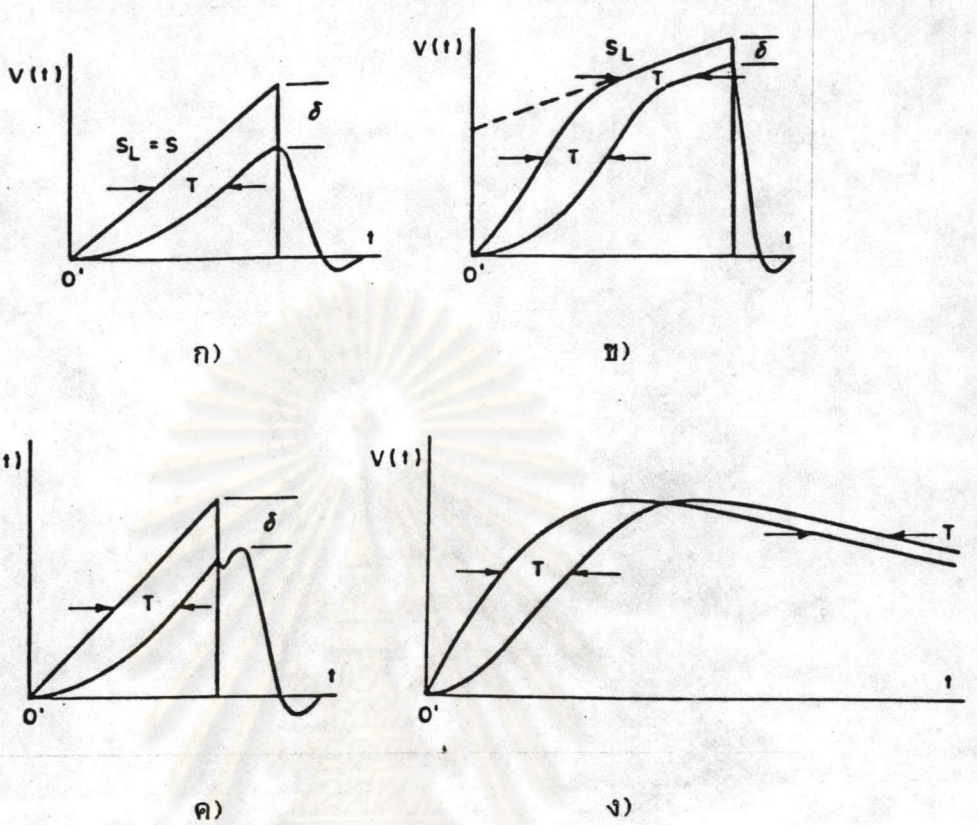
ก) โคโรนา (Corona) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันสูงมากและทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของฉนวน ฉะนั้นการออกแบบภาคแรงสูงที่ถูกต้องควรหลีกเลี่ยงโครงสร้างที่แหลมคม ใส่ชีลด์เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าแช่ในน้ำมันฉนวน หรือใช้ก๊าซอัดความดัน

ข) ผลกระทบจากความร้อนภายในตัวประกอบวงจร เช่น ตัวความต้านทานและตัวเก็บประจุ ตัวประกอบวงจรบางชนิดมีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างไม่เป็นเชิงเส้นเมื่ออุณหภูมิหรือแรงดันเปลี่ยนไป

ส่วนการหาผลตอบสนองที่ระดับแรงดันสูงนั้น เหมาะที่จะใช้กับโวลเตจดิไวเดอร์ที่มีค่าแรงดันที่กำหนดสูง ๆ (สูงกว่า 2 MV) ทั้งนี้เพราะโวลเตจดิไวเดอร์เหล่านี้จะมีค่าอัตราส่วนแรงดันสูง ถ้าทดสอบด้วยระดับแรงดันต่ำ จะทำให้ผลตอบสนองรูปชั้นที่ออกมามีค่าน้อยไปทำให้เกิดความยุ่งยากในการวัดให้ถูกต้อง อีกประการหนึ่ง การทดสอบหาผลตอบสนองที่แรงดันสูงจะได้ผลถูกต้องใกล้เคียงกับสภาพใช้งานจริง

2.2.2.2 ความสำคัญของเวลาตอบสนอง

เวลาตอบสนองจะมีผลต่อการวัดเวลาช่วงคลื่น และอัมปลิจูดของแรงดันอิมพัลส์มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเป็นแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันอิมพัลส์แบบต่าง ๆ เมื่อคิดว่าแรงดันเริ่มพร้อมกันที่เวลา 0′ ดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความคลาดเคลื่อนในการวัดเนื่องจากเวลาตอบสนอง

เมื่อทราบเวลาตอบสนองของระบบวัด อาจคำนวณความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด และความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลาของคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

ก) ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอด ΔV คือ ความแตกต่างระหว่างค่ายอดของแรงดันที่ป้อนกับค่าที่วัดได้จากระบบการวัด คำนวณได้ดังนี้ [9]

$$\Delta V = S_L T \qquad (2.13)$$

เมื่อ S_L คือ ความชันของแรงดันที่ป้อนเข้าไปก่อนเกิดการตัดของรูปคลื่น

T คือ เวลาตอบสนองของระบบวัดตามสมการ (2.10)

รูปที่ 2.7 ก) เป็นกรณีที่พบบ่อยในทางปฏิบัติ คือ แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น รูปที่ 2.7 ข) เป็นแรงดันรูปคลื่นตัดหน้าคลื่นไม่เป็นเชิงเส้น

016359

รูปที่ 2.7 ค) แสดงให้เห็นกรณีที่เกิดการเพี้ยนก่อนถึงค่ายอดของแรงดันที่ต้องการวัด ซึ่งเกิดจากผลกระทบของการเพี้ยนของเวลาเริ่มต้นในผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย (ดูรูปที่ 2.4 ฉ)-ช)) และยังแสดงให้เห็นด้วยว่า เวลาขณะที่วัดค่ายอดจะไม่ใช่เวลาเดียวกันกับที่คลื่นตัด แต่จะล้าหลังอยู่เล็กน้อย ซึ่งจะทำให้สมการ (2.13) ใช้ไม่ได้อย่างไรก็ดี ปรากฏการณ์นี้อาจละเลยไม่ต้องคำนึงถึงได้ถ้ามีผลกระทบไม่มาก ในกรณีที่มีผลกระทบมาก ก็จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงระบบการวัดใหม่ การวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มดังรูปที่ 2.7 ง) จะหาความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอดจากสมการ (2.13) ไม่ได้ เพราะค่าความชันตรงจุดนั้นเป็นศูนย์ อันที่จริงค่ายอดของแรงดันจะคลาดเคลื่อนไปบ้างเหมือนกัน แต่จะน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

ช) ความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลา Δt คือ ความแตกต่างระหว่างช่วงเวลาของแรงดันที่วัดได้กับช่วงเวลาของแรงดันที่ต้องการวัด จากรูปที่ 2.7 ก) เป็นกรณีที่แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น ความคลาดเคลื่อนของช่วงเวลา คือ [9]

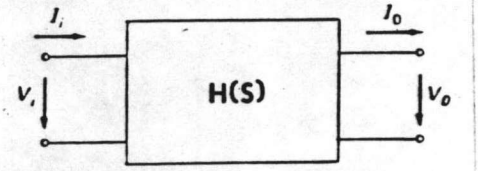
$$\Delta t = T \qquad (2.14)$$

แต่แรงดันในรูปที่ 2.7 ข) ค) และ ง) ไม่มีความสัมพันธ์เป็นกฎเกณฑ์ดังรูปที่ 2.7 ก) ในกรณีรูปคลื่นเต็มดังรูปที่ 2.7 ง) นั้น ความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลา จะเกิดขึ้นทั้งที่ตอนหน้าและตอนหางของคลื่น แต่ความคลาดเคลื่อนจะมีผลกระทบมาก เมื่อวัดเวลาช่วงหน้าคลื่น

2.2.2.3 การคำนวณเวลาตอบสนองของระบบวัด

ในระบบวัดระบบหนึ่ง ถ้าทราบลักษณะของตัวประกอบวงจร จะสามารถคำนวณหาผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย และเวลาตอบสนองได้ [2]

พิจารณาระบบวัดหนึ่ง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมของระบบวัดหนึ่ง ๆ

V_i , I_i เป็นแรงดันและกระแสที่ขาเข้าของระบบวัดตามลำดับ

V_o , I_o เป็นแรงดันและกระแสขาออกที่ปลายขั้วแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์

เมื่อคิดว่าผลกระทบของเคเบิลวัด และเครื่องวัดแรงดันต่ำต่อระบบวัดมีค่าน้อย จะได้ว่า $I_o = 0$ และแรงดันก่อนเข้าเครื่องวัดแรงดันต่ำจะเท่ากับ V_o

ให้ H(s) เป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบวัด นิยามโดย

$$H(s) = V_o(s)/V_i(s) \qquad (2.15)$$

ให้ N เป็นอัตราส่วนแรงดันของระบบวัด นิยามโดย

$$N = \lim_{s \to o} [V_i(s)/V_o(s)] \qquad (2.16)$$

ให้ h(s) เป็นนอร์มัลไลซ์ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชั่น (Normalized transfer function) ของ H(s) มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$h(s) = NH(s) \qquad (2.17)$$

ดังนั้น ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย g(t) ซึ่งหาได้โดยใช้อินเวอร์สลาปลาซทรานส์ฟอร์ม ของ h(s) จะได้ [2]

$$g(t) = L^{-1} [(1/s).h(s)] \qquad (2.18)$$

และเวลาตอบสนอง T° อาจหาได้โดยใช้สมการ (2.8)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในกรณีที่ h(s) เป็นฟังก์ชันที่สลับซับซ้อน จะหา T° ได้โดยใช้กฎของ Bernoulli-l' Hopital ดังนี้ [2]

$$T^{\circ} = \lim_{s \to o} [-h(s)] \qquad (2.19)$$

เมื่อ h (s) เป็นอนุพันธ์ของ h(s) เทียบกับ s

2.2.3 อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์

อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันสูงที่ขั้วออกของสายนำแรงสูงต่อแรงดันที่ปลายเคเบิลวัดก่อนเข้าเครื่องวัด นั่นคือ

$$a = V_1 / V_2 \qquad (2.20)$$

เมื่อ a คือ อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์

V_1 คือ แรงดันที่ปลายขาออกของสายนำแรงสูง

V_2 คือ แรงดันที่ปลายเคเบิลวัดก่อนเข้าเครื่องวัด

อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์แบบใด ๆ อาจหาได้ด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

ก) คำนวณจากอิมพิแดนซ์ของตัวประกอบวงจรที่ทราบค่าจากการวัด

ข) เทียบกับโวลเตจดิไวเดอร์ที่ทราบอัตราส่วนแรงดันแล้ว

ค) เทียบกับแกปทรงกลม

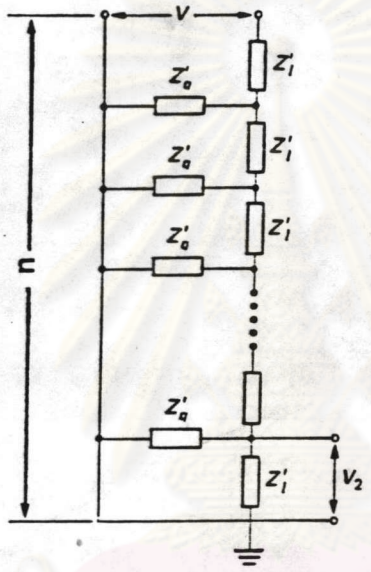
ทั้ง 3 วิธีที่ใช้กันอยู่นี้ วิธี ก. เหมาะสำหรับหาอัตราส่วนแรงดันในทางทฤษฎี ซึ่งอาจแตกต่างไปจากเวลาใช้งานจริงได้ วิธี ข. และ ค. นั้นใช้ได้กับโวลเตจดิไวเดอร์ทุกแบบ โดยที่วิธี ค. เป็นวิธีซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง 3 %

การหาอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์จากการทดลองนั้น ถ้าทำการทดลองในสถานที่ต่าง ๆ กัน ค่าอัตราส่วนแรงดันที่ได้อาจมีค่าต่างกันไป เพราะค่าอัตราส่วนแรงดันขึ้นอยู่กับค่าความจุสเตรลงดินของโวลเตจดิไวเดอร์ ดังนั้นการหาอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ ควรทำการทดลอง ณ ตำแหน่งซึ่งจะติดตั้งโวลเตจดิไวเดอร์ในการใช้งานจริง

2.3 โวลเตจดิไวเดอร์

2.3.1 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดิไวเดอร์

ในการศึกษาลักษณะสมบัติของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ความถี่สูงต้องอาศัยวงจรสมมูลชึ่งประกอบด้วยตัวประกอบวงจรค่าคงที่แบบกระจาย ดังรูปที่ 2.9 [2]



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดิไวเดอร์

n คือ จำนวนส่วนย่อยทั้งหมด

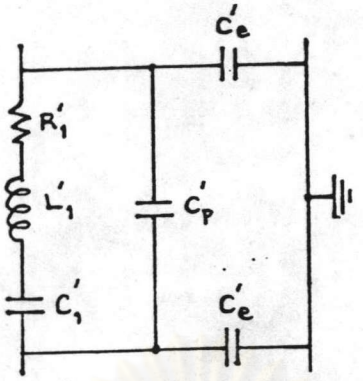
Z_1' คือ อิมพิแดนซ์อนุกรมต่อหนึ่งส่วนย่อย

Z_g' คือ อิมพิแดนซ์ขนานลงดินต่อหนึ่งส่วนย่อย

Z_1 คือ อิมพิแดนซ์อนุกรมรวม โดยที่ $Z_1 = nZ_1'$

Z_g คือ อิมพิแดนซ์ขนานลงดินรวม โดยที่ $Z_g = (1/n)Z_g'$

อิมพิแดนซ์แต่ละส่วนย่อย (Z_1' และ Z_g') จะประกอบด้วยตัวประกอบวงจรที่ต่ออนุกรมและขนานกันดังในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลทั่วไปของตัวประกอบวงจรของโวลเตจดิไวเดอร์แต่ละส่วนย่อย

R_1' คือ ตัวความต้านทานย่อย (ซึ่งรวมทั้งค่าความต้านทานสมมูลของตัวเก็บประจุ)

C_1' คือ ตัวเก็บประจุย่อย

L_1' คือ สเตรอินดัคแตนซ์ย่อย

C_p' คือ ตัวเก็บประจุขนานย่อย (ซึ่งรวมทั้งค่าความจุสเตรขนาน)

C_e' คือ ค่าความจุสเตรลงดินย่อย

ดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้นว่า โวลเตจดิไวเดอร์อาจประกอบด้วยตัวประกอบวงจรที่เป็นตัวความต้านทาน หรือตัวเก็บประจุอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือผสมกัน ในกรณีที่เป็นโวลเตจดิไวเดอร์แบบผสมตัวความต้านทานและตัวเก็บประจุ อาจต่ออนุกรมหรือขนานก็ได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบโวลเตจดิไวเดอร์ทุกแบบ จะมีตัวประกอบหลักอย่างน้อย คือ R_1' และ C_1' อย่างใดอย่างหนึ่งต่ออนุกรมกันหรือขนานกัน ในกรณีที่ต่อขนานกัน C_1' จะอยู่ในตำแหน่ง C_p' (ดูวงจรสมมูลรูปที่ 2.10) ส่วนตัวประกอบวงจรอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นเองในลักษณะสเตรอิมพิแดนซ์ต้องนำมาคิดรวมอยู่ในวงจรสมมูล หากต้องการความเที่ยงตรงสูง ข้อดีในการใช้วงจรสมมูลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของโวลเตจดิไวเดอร์ คือ ทำให้เกิดความสะดวกและง่ายต่อการศึกษาโวลเตจดิไวเดอร์แบบใด ๆ โดยการแทนค่าตัวประกอบวงจรสมมูลทั่วไปให้เหมาะสมเท่านั้น

เมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลที่กล่าวแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่ามีลักษณะคล้ายกับวงจรสมมูลของสายส่งพลังงานไฟฟ้าที่ปลายข้างหนึ่งต่อลงดิน จึงอาจวิเคราะห์ได้ในลักษณะเดียวกับระบบสายส่ง นั่นคือ จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.9 จึงเขียนทรานส์เฟอร์ฟังก์ชั่นของโวลเตจดิไวเดอร์ได้ดังสมการ [2]

$$H(s) = \frac{\sinh\left[(1/n) \sqrt{Z_1(s)/Z_2(s)} \right]}{\sinh\left[\sqrt{Z_1(s)/Z_2(s)} \right]} \qquad (2.21)$$

ทำเป็นนอร์มัลไลซ์ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน โดยให้ a เป็นอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ จะได้

$$h(s) = a.H(s) \qquad (2.22)$$

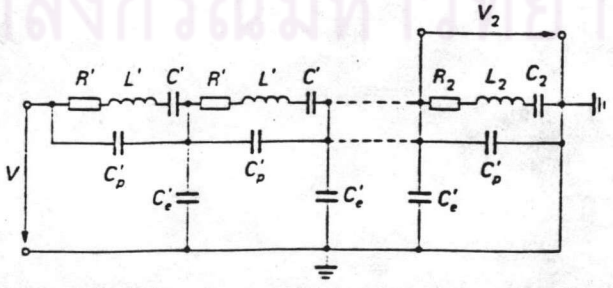
ถ้าเลือกให้ a มีค่าเท่ากับจำนวนส่วนย่อย n ทั้งหมด จะได้

$$h(s) = \frac{n.\sinh\left[(1/n) \sqrt{Z_1(s)/Z_2(s)} \right]}{\sinh\left[\sqrt{Z_1(s)/Z_2(s)} \right]} \qquad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.18) ทำให้สามารถหาผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วยทางทฤษฎีได้

2.3.2 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

การวิเคราะห์หาผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ซึ่งตัวเก็บประจุภาคแรงสูงเป็นแบบตัวเก็บประจุย่อยต่ออนุกรมกัน หาได้โดยใช้วงจรสมมูลในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

อาศัยสมการ (2.18) และ (2.23) ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย จะเขียนได้ด้วยสมการต่อไปนี้ [2]

$$g(t) = 1 - C_e / [6(C_1+C_p)] + 2 \exp(-a_1 t) * \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k [\cosh(b_k t) + (a_1 \sinh(b_k t))/b_k]/[AB] \quad (2.24)$$

เมื่อ $A = 1 + C_p/C_1 + C_e/(C_1 k^2 \pi^2)$

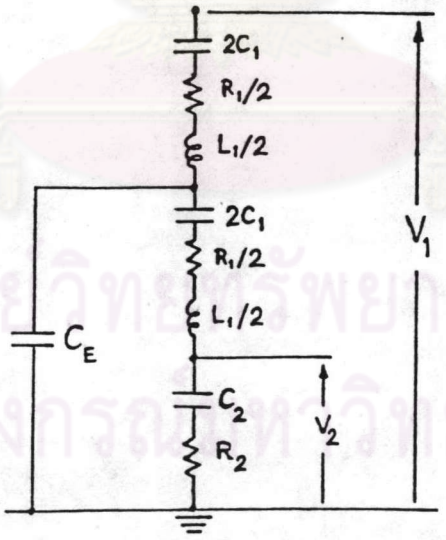
$B = 1 + (C_p k^2 \pi^2)/C_e$

$a_1 = R_1/2L_1$

$b_k = \sqrt{a_1^2 - (\pi^2 k^2 A) / (L_1 C_e B)}$

เมื่อทราบสมการของผลตอบสนองรูปขั้นแล้ว ก็สามารถหาเวลาตอบสนองของระบบวัดได้โดยใช้สมการ (2.8)

ในที่นี้จะทำการวิเคราะห์หาผลตอบสนองรูปขั้นจากวงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์ โดยการใช้ " ซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้นแบบท่อน " [11] จากวงจรสมมูลรูปที่ 2.11 ถ้าละเลยค่า C_p และ L_2 จะเขียนวงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงที่จะใช้ในการวิเคราะห์ [2] ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงที่ใช้ในการวิเคราะห์

R_1 คือ ความต้านทานของภาคแรงสูง R_2 คือ ความต้านทานของภาคแรงต่ำ

L_1 คือ ความเหนี่ยวนำของภาคแรงสูง C_2 คือ ความจุไฟฟ้าของภาคแรงต่ำ

C_1 คือ ความจุไฟฟ้าของภาคแรงสูง C_E คือ ความจุสเตรลงดิน

จากวงจรสมมูลรูปที่ 2.12 เมื่อนำค่าองค์ประกอบไปแทนค่าในสมการ (2.24) จะได้สมการของผลตอบสนองรูปขั้น ดังนี้ คือ [2]

$$g(t) = 1 - C_E / 6C_1 + 2 \exp(-at) * \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k [\cosh(b_k t) + a\sinh(b_k t)/b_k]/A \quad (2.25)$$

เมื่อ $A = 1 + C_E/C_1 \, k^2 \pi^2$

$a = R_1/2L_1$

$b_k = \sqrt{a^2 - \pi^2 k^2 A / L_1 C_E}$

C_E เป็นค่าความจุสเตรลงดินของโวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับมิติของโครงสร้าง สามารถหาค่า C_E ได้จากสมการ [2]

$$C_E = \frac{2 \pi \epsilon_o \epsilon_r l}{\ln[(2l) \sqrt{(4h+l)/(4h+3l)} /d]} \quad (2.26)$$

เมื่อ C_E คือ ความจุสเตรลงดิน เป็น ฟารัด

l คือ ความยาวของทรงกระบอกซึ่งบรรจุตัวเก็บประจุภาคแรงสูง เป็นเมตร

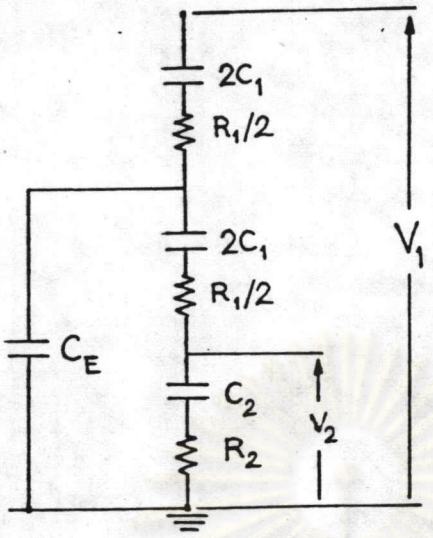
d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอก เป็นเมตร

h คือ ความสูงของปลายทรงกระบอกเหนือพื้นดิน เป็นเมตร

ϵ_o คือ เพอร์มิตติวิตีของสูญญากาศ มีค่า 8.84194×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร

ϵ_r คือ เพอร์มิตติวิตีสัมพันธ์ของตัวกลาง

การคำนวณหาอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ใช้วงจรสมมูล แสดงในรูปที่ 2.13



C_1 คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง
R_1 คือ ความต้านทานภาคแรงสูง
C_2 คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ
R_2 คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ
C_E คือ ความจุสเตรลงดิน

รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทาน หน่วงที่ใช้หาอัตราส่วนแรงดัน

จากรูปที่ 2.13 สามารถหาอัตราส่วนแรงดันจากสมการ [2]

$$A_t(0) = V_1(0) / V_2(0) \qquad (2.27)$$

อัตราส่วนแรงดันที่ได้คือ

$$a = A_t(0) = \frac{2C_1C_E + C_2C_E + 4C_1^2 + 4C_1C_2}{4C_1^2} \qquad (2.28)$$

ถ้าละเลยค่าความจุสเตรลงดิน ($C_E = 0$) จะได้ว่า

$$a = \frac{(C_1 + C_2)}{C_1} \qquad (2.29)$$

ปกติแล้วการหาอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงโดยการคำนวณนั้น จะหาจากสมการที่ (2.29) ซึ่งค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย