

บทที่ 2

ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

2.1 วงจรพื้นฐานของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานสำหรับทดสอบวัสดุฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ระบบวัดแรงดันจะเริ่มจากจุดต่อระหว่างวัสดุทดสอบกับความต้านทานหน่วงในสายนำแรงสูงไปจนถึงอุปกรณ์วัดแรงดันต่ำ อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบวัดแรงดันจะมีหน้าที่ต่างๆ กัน ดังต่อไปนี้

1) ความต้านทานหน่วง ทำหน้าที่หน่วงการแกว่ง (oscillation) ที่ภาวทรานเซียน เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำในสายนำแรงสูงกับค่าความจุไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์ ความต้านทานหน่วงที่ใช้จะเป็นแบบที่มีค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าต่ำ ความต้านทานหน่วงนี้อาจจะต่อไว้ที่ปลายขาเข้าของสายนำแรงสูงดังรูปที่ 2.1 หรืออาจจะต่อไว้ที่ขาเข้าของโวลเตจดีไวเดอร์ก็ได้ ถ้าต่อไว้ที่ขาเข้าของสายนำแรงสูงเรียกระบบวัดว่า " ระบบสามองค์ประกอบ " (three component system) ถ้าต่อไว้ที่ขาเข้าของโวลเตจดีไวเดอร์ ความต้านทานหน่วงจะถือเป็นส่วนหนึ่งของโวลเตจดีไวเดอร์และเรียกระบบวัดนี้ว่า " ระบบสององค์ประกอบ " (two component system) ถ้าสายนำแรงสูงมีความยาวมาก การต่อความต้านทานหน่วงแบบระบบสามองค์ประกอบ โดยใช้ค่าความต้านทานหน่วงเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำแรงสูง จะช่วยลดการแกว่งที่เกิดขึ้นในภาวทรานเซียนอันเนื่องมาจากอิมพีแดนซ์ที่ไม่แมชกันของสายนำแรงสูงกับวงจรกำเนิดแรงดันและโวลเตจดีไวเดอร์ {1,7}

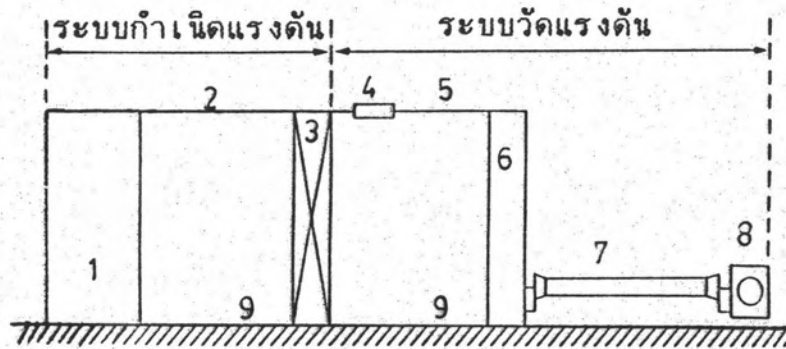
2) สายนำแรงสูงที่ต่อระหว่าง วัสดุทดสอบ กับ โวลเตจดีไวเดอร์ โดยทั่วไปจะยาวเท่ากับความสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ หรือ วัสดุทดสอบ เพื่อให้ผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีต่อโวลเตจดีไวเดอร์ลดลง สายนำแรงสูงต้องมีขนาดโตพอที่จะไม่เกิดโคโรนา ซึ่งเป็นคลื่นรบกวนต่อวงจรวัด แรงดันได้และต้องไม่ยาวเกินไปจนทำให้เกิดการล่าช้าของสัญญาณมากเกินไป

3) โวลเตจดีไวเดอร์ ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมาให้อยู่ในย่านที่เครื่องวัดแรงดันต่ำสามารถวัดได้

4) สายเคเบิลวัดแรงดัน ทำหน้าที่นำแรงดันที่ปลายขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์มายังเครื่องวัดแรงดันต่ำ และแยกเครื่องวัดแรงดันต่ำให้ห่างจากโวลเตจดีไวเดอร์ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และลดสัญญาณรบกวนที่จะมีต่อเครื่องวัดแรงดันต่ำ สายเคเบิลวัดเป็นชนิดที่ใช้งานกับความถี่สูง มีการลดทอนสัญญาณน้อยและเป็นแบบโคแอกเซียล (coaxial)

5) เครื่องวัดแรงดันต่ำ อาจเป็นโวลต์มิเตอร์วัดแรงดันค่ายอดหรือออสซิลโลสโคป เครื่องวัดนี้มักจะอยู่ในห้องที่มีชิลด์โลหะเพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก เว้นแต่ได้ออกแบบให้มีชิลด์ป้องกันสัญญาณรบกวนในตัว

6) สายดิน ทำหน้าที่เชื่อมโยงจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบทดสอบให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อลดแรงดันตกในสายดินให้น้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้แผ่นโลหะบางขนาดใหญ่ปูบนพื้นห้องทดสอบ เช่น ทองแดงแผ่นบาง



- รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานสำหรับทดสอบวัสดุฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์
- 1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 - 2 คือ สายนำแรงสูงจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไปยังวัสดุทดสอบ
 - 3 คือ วัสดุทดสอบ
 - 4 คือ ความต้านทานหน่วงในสายนำแรงสูง
 - 5 คือ สายนำแรงสูง
 - 6 คือ โวลเตจติไวเตอร์
 - 7 คือ เคเบิลวัด
 - 8 คือ เครื่องวัดแรงดันต่ำ
 - 9 คือ สายดิน

2.2 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของระบบวัด

ระบบวัดที่ดีนั้นจะมีลักษณะสมบัติดังนี้ คือ

ก) มีผลตอบสนองต่อแรงดันรูปขั้นที่ตี มีการแกว่งในผลตอบสนองรูปขั้นน้อย และมีเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (settling time) สั้น เมื่อเทียบกับเวลาขึ้น (rise time) ของแรงดันที่ต้องการวัด

ข) มีเวลาตอบสนองสั้นเพื่อจะได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันได้เร็ว

ค) อัตราส่วนแรงดันมีค่าคงที่ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน และไม่ขึ้นกับระดับแรงดัน ตั้งแต่แรงดันต่ำจนถึงแรงดันที่กำหนด

2.2.1 ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย (unit step response)

ในระบบวัดหนึ่งๆ แรงดันขาออก $v_o(t)$ ในโดเมนเวลา (time domain) จะหาได้จากสมการ (1)

$$v_o(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} V_{1k} H(j\omega_k) \exp(jk\omega t) \quad (2.1)$$

เมื่อ V_{1k} เป็น ฟูเรียทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform) ของแรงดันขาเข้าอาร์โมนิคที่ k

$H(j\omega_k)$ เป็น ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของแรงดันขาออกต่อแรงดันขาเข้า ในโดเมนความถี่อาร์โมนิคที่ k

ω_k เป็น ความเร็วเชิงมุมอาร์โมนิคที่ k

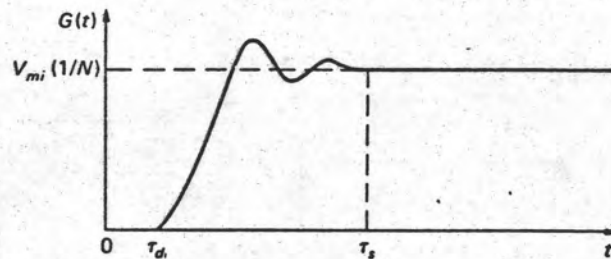
ในระบบวัดแรงดันสูง การหาแรงดันขาออกในโดเมนเวลาโดยใช้สมการ (2.1) จะพบกับปัญหายุ่งยากพอสมควร วิธีที่นิยมใช้ คือ การหาแรงดันขาออกในโดเมนเวลาโดยอาศัยผลตอบสนองรูปขึ้น สามารถทำได้ดังนี้

แรงดันรูปขึ้นที่ใช้ทดสอบผลตอบสนองรูปขึ้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

{1}

$$\begin{aligned} v_u(t) &= 0 && \text{เมื่อ } t < 0 \\ &= V_m && \text{เมื่อ } t > 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

เมื่อป้อนแรงดันรูปขึ้นให้กับระบบวัด จะได้ผลตอบสนองรูปขึ้น $G(t)$ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ผลตอบสนองรูปขึ้น $G(t)$

N คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันขาเข้าต่อแรงดันขาออกของระบบวัดที่สภาวะคงตัว

τ_d คือ เวลาล่าช้า (delay time) ของระบบวัด

τ_s คือ เวลาที่ผลตอบสนองรูปขึ้นเข้าสู่สภาวะคงตัว

ในรูปที่ 2.2 τ_d เกิดจากการที่แรงดันขาออกยังไม่ปรากฏขณะที่ป้อนแรงดันเข้าที่ขาเข้าของระบบวัด และ $t=0$ เป็นเวลาที่นิยามโดยสมการ (2.2)

ให้ $g(t)$ เป็นผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย โดยถือว่าขนาดของแรงดันขาออกมีขนาดหนึ่งหน่วยที่สภาวะคงตัว ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย $g(t)$ สัมพันธ์กับผลตอบสนองรูปขึ้น $G(t)$ ตามสมการ (1)

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

ถ้าทราบผลตอบสนองรูปขึ้น $G(t)$ ซึ่งสามารถหาได้จากวงจรมุมูลของระบบวัด จะสามารถหาแรงดันขาออกของระบบวัด $v_o(t)$ ได้ เมื่อแรงดันขาเข้าเป็น $v_i(t)$ โดยอาศัยทฤษฎีของ Duhamel's integral ดังนี้ (1)

$$\begin{aligned} v_o(t) &= v_i(t) \cdot G(0^+) + \int_0^t [v_i(\tau) \cdot G(t-\tau)] d\tau \\ &= G(t) \cdot v_i(0^+) + \int_0^t [v_i(t-\tau) \cdot G(\tau)] d\tau \quad (2.4) \end{aligned}$$

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)

เวลาตอบสนองเป็นคุณสมบัติสำคัญยิ่งประการหนึ่งของระบบวัดที่จะบอกให้ทราบว่า ระบบวัดจะใช้วัดแรงดันอิมพัลส์แบบต่างๆ ได้เหมาะสมหรือไม่ ถ้าทราบผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยของระบบวัดแล้ว จะสามารถคำนวณหาเวลาตอบสนองได้ ดังจะกล่าวต่อไป

2.2.2.1 นิยามของเวลาตอบสนอง

แรงดันในอุดมคติที่หน้าคลื่นเพิ่มอย่างเป็นเชิงเส้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [1]

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

เมื่อ S คือ ความชัน (steepness) ของแรงดัน

ถ้าป้อนแรงดันตามสมการ (2.5) ทางขาเข้าของระบบวัดที่มีผลตอบสนองรูปขึ้น $G(t)$ จะได้แรงดันขาออก $v_o(t)$ ซึ่งหาได้โดยสมการ (2.4) [1]

$$\begin{aligned} v_o(t) &= S \int_0^t G(\tau) d\tau \\ &= (S/N) \cdot \int_0^t g(\tau) d\tau \\ Nv_o(t) &= S \cdot [t - \int_0^t (1-g(\tau)) d\tau] \\ v_i(t) - Nv_o(t) &= S \cdot \int_0^t [1-g(\tau)] d\tau \quad (2.6) \end{aligned}$$

ผลคูณ $Nv_o(t)$ คือ ค่าแรงดันสูงขาเข้าที่หาจากแรงดันต่ำขาออกที่วัดได้เมื่อป้อนแรงดันสูงขาเข้า $v_i(t)$ และเมื่อ $t > \tau_g$ ผลคูณ $Nv_o(t)$ จะมีค่าคงที่ ดังนั้นสมการ (2.6) จะมีค่าคงที่ ถ้า $t > \tau_g$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 v_1(t) - Nv_0(t) &= S \cdot \int_0^{t > \tau} [1-g(\tau)] d\tau \\
 &= S \cdot \int_0^{\infty} [1-g(\tau)] d\tau \\
 &= S \cdot T^{\circ} \quad (2.7)
 \end{aligned}$$

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

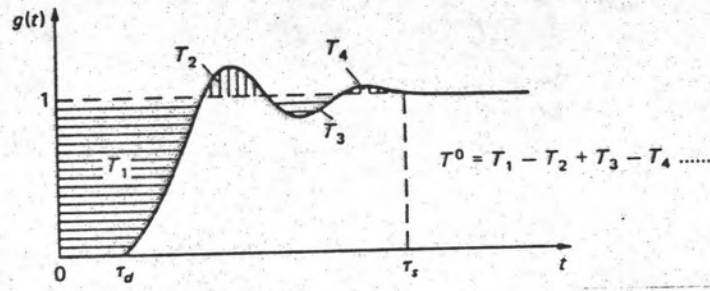
ค่า T° นี้เรียกว่า " เวลาตอบสนอง " ของระบบวัด และได้แสดงความหมายไว้ในรูปที่ 2.3 ก)

ในกรณีแรงดันรูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น ที่มีเวลาคลื่นตัด $T_{\Sigma} > \tau_{\Sigma}$ ดังรูปที่ 2.3 ข) ความแตกต่างของขนาดแรงดันที่วัดได้กับแรงดันที่ป้อนเข้า ΔV หาได้จากสมการ (1)

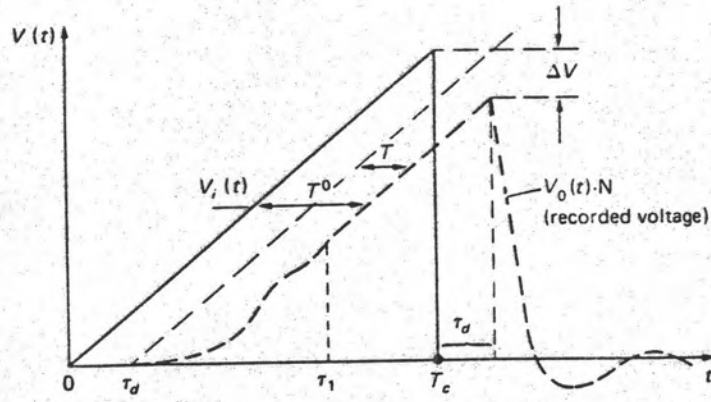
$$\begin{aligned}
 \Delta V &= v_1(T_{\Sigma}) - Nv_0(T_{\Sigma} + \tau_{\Sigma}) \\
 &= S \cdot (T^{\circ} - \tau_{\Sigma}) \\
 &= ST \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

เมื่อ $T = T^{\circ} - \tau_{\Sigma}$

$$= \int_0^{\infty} [1-g(\tau)] d\tau \quad (2.10)$$



ก)



ข)

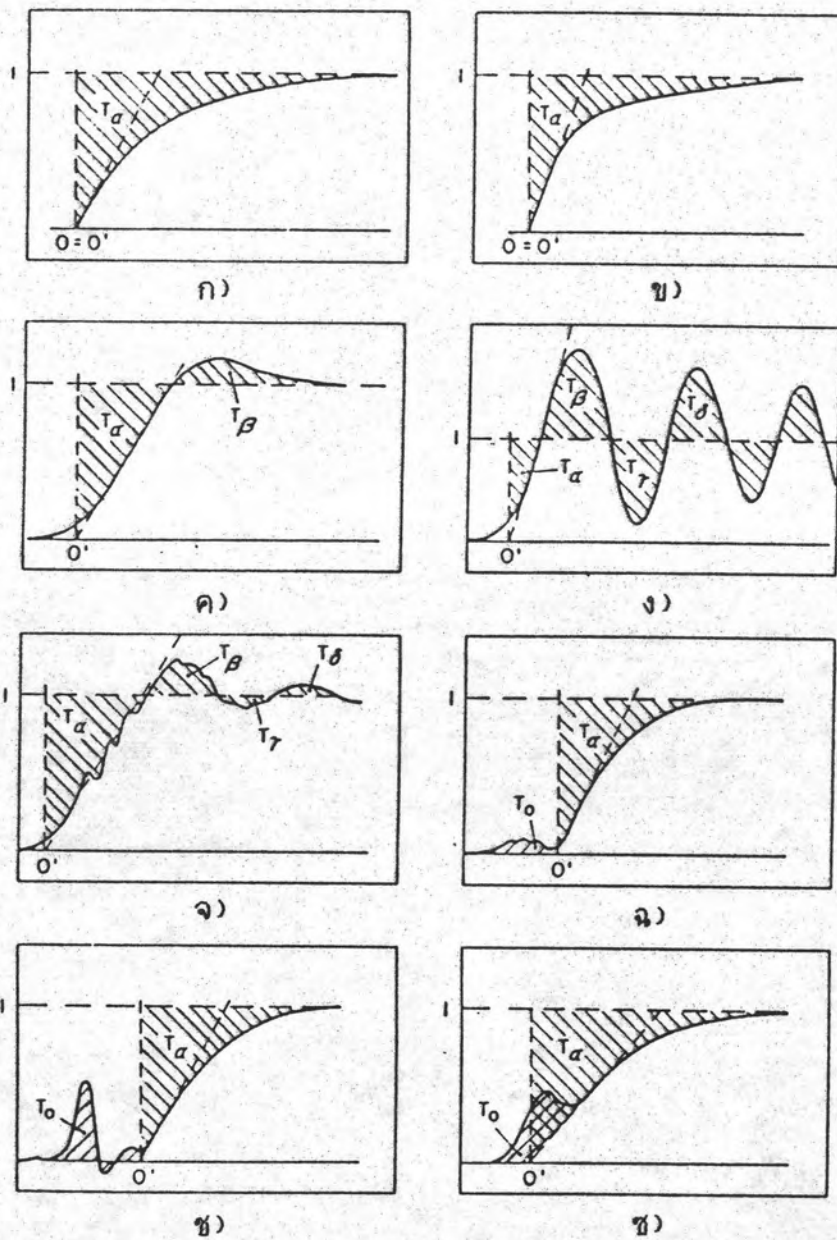
รูปที่ 2.3 เวลาตอบสนอง

- ก) เวลาตอบสนอง T^0 และผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย
- ข) เวลาตอบสนอง T^0 และ T

เวลาตอบสนอง T นี้เป็นเวลาตอบสนองตามมาตรฐาน ไอ อี ซี {2} ซึ่งแสดงถึงความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของการวัดค่ายอดแรงดัน δ สำหรับแรงดันขาเข้ารูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น โดยที่ δ มีค่าตามสมการ {1,2}

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

ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยอาจมีแบบต่างๆ ดังภาพออสซิลโลแกรมที่แสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นผลจากการทดลอง [23]



รูปที่ 2.4 ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยแบบต่างๆ ในทางปฏิบัติ

ลักษณะของผลตอบสนองเหล่านี้จะบอกลักษณะสมบัติของระบบการวัดไว้อย่างครบถ้วน คือ ความชันส่วนหน้าเป็นตัวบอกให้ทราบถึงขีดความสามารถ ความถี่พิกัด ถ้ามีการแกว่ง ดังรูป ง. และ จ. แสดงถึงเรโซแนนซ์ของระบบวัด อัมพลิจูดของผลตอบสนองจะแสดงถึงอัตราส่วนของโวลเตจดีไวเดอร์

เมื่อพิจารณาถึงความหมายของเวลาตอบสนอง ที่นิยามโดยข้อกำหนด ไอ อี ซี ตามสมการ (2.10) จะได้ว่า เวลาตอบสนอง T ก็คือ ผลรวมตามนิพจน์ของพื้นที่ระหว่างเส้นอัมพลิจูดหนึ่งหน่วย (อัมพลิจูดหนึ่งหน่วยถือเอาค่าที่ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยเข้าสู่สภาวะคงตัว) กับผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย ตั้งแต่เวลา $T = \tau_c$ เป็นต้นไป (ดูรูปที่ 2.3 ก) แต่ในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะกำหนดจุดเริ่มต้นที่ถูกต้องของผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย ดังเช่นรูปที่ 2.4 ค)-ช) ฉะนั้นการหาเวลาตอบสนองจากผลตอบสนองรูปขึ้นที่ได้จากการทดลอง จะหาจากจุดเริ่มต้นเสมือน $0'$ (ดูรูปที่ 2.4) และค่าเวลาตอบสนองที่ได้ T_n สามารถหาได้จากสมการ (2.3)

$$T_n = T_c - T_0 + T_v \dots \quad (2.12)$$

จากค่า T_n นี้ จะสามารถหาค่าเวลาตอบสนอง T ได้ ดังจะกล่าวต่อไป ในหัวข้อที่ 2.3.5

จุดศูนย์เสมือน $0'$ ถือเป็นจุดเริ่มต้นของผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย นิยามว่าเป็น จุดตัดของแกนเวลาและเส้นตรงที่ลากสัมผัสรูปคลื่นส่วนหน้าของผลตอบสนองที่มีความชันมากที่สุด ในกรณีที่มีการแกว่งที่หน้าคลื่นดังรูปที่ 2.4 จ) ต้องลากเส้นตรงเฉลี่ยผ่านการแกว่งมาตัดแกนเวลา จุดตัดระหว่างเส้นตรงเฉลี่ยที่ลากผ่านการแกว่งกับแกนเวลา ถือเป็นจุดศูนย์เสมือน $0'$ ของการหาเวลาตอบสนอง พื้นที่ T_0 ในรูปที่ 2.4 ฉ)-ช) เรียกว่า การเพี้ยนของเวลาเริ่มต้น (initial distortion time) จะทำให้เกิดการรบกวนบริเวณค่ายอดแรงดัน เมื่อใช้วัดแรงดันคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น ดังรูปที่ 2.5 ค)

ผลตอบสนองรูปขึ้นดังกล่าวแล้ว อาจทดลองหาได้ที่ระดับแรงดันสูงหรือต่ำก็ได้ แต่โดยทั่วไปนิยมทำกันที่ระดับแรงดันต่ำ ทั้งนี้สมมุติว่าองค์ประกอบของโวลเตจดีไวเดอร์และวงจรมีคุณสมบัติเชิงเส้น เมื่อใช้กับแรงดันสูงถึงค่าที่กำหนดก็ยังมีคุณสมบัติความถี่สูงอย่างเดิม ในทางปฏิบัติเมื่อเลือกตัวประกอบวงจร และออกแบบสร้างดีแล้ว ก็ถือได้ว่าโวลเตจดีไวเดอร์มีลักษณะสมบัติเชิงเส้น

ในกรณีที่ลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นนั้น อาจเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ ที่สำคัญ คือ

ก) โครนา (Corona) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันสูงมากและทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของฉนวน ฉะนั้นการออกแบบภาคแรงสูงที่ถูกต้องควรหลีกเลี่ยงโครงสร้างที่แหลมคม หรือใส่ซิลด์เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า หรือแช่ในน้ำมันฉนวน หรือใช้ก๊าซอัดความดัน

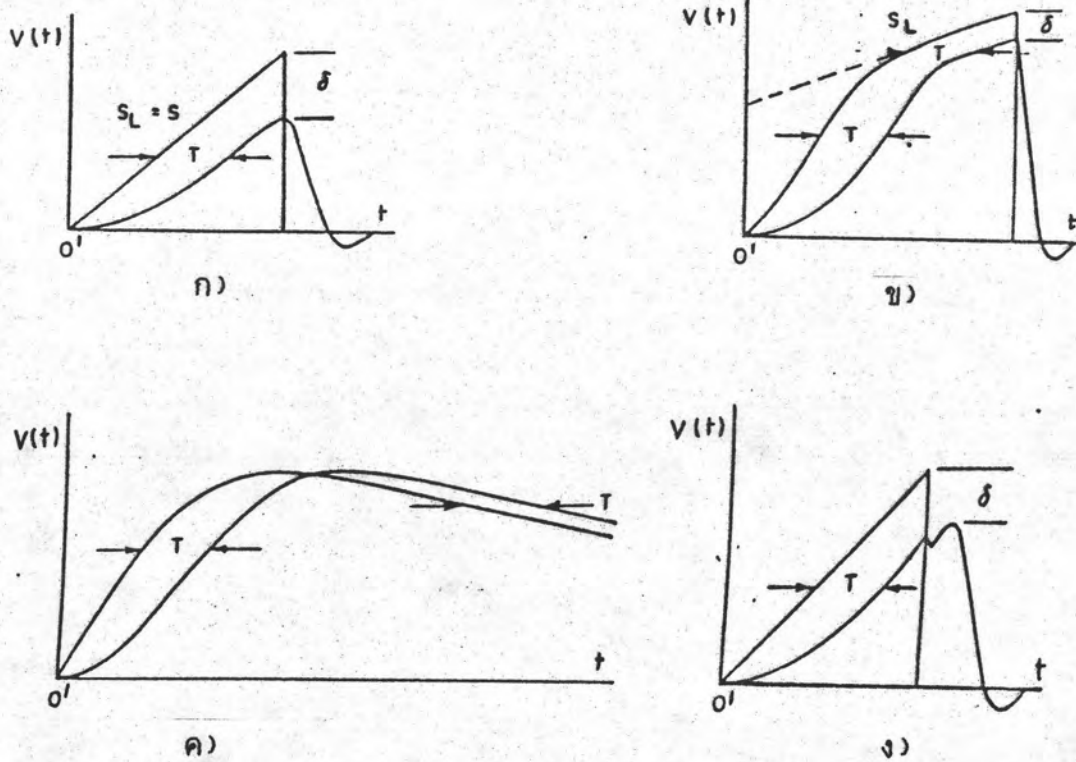
ข) ผลกระทบจากความร้อนภายในตัวประกอบวงจร เช่น ตัวความต้านทาน และ ตัวเก็บประจุ ตัวประกอบวงจรบางชนิดมีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างไม่เป็นเชิงเส้นเมื่ออุณหภูมิหรือแรงดันเปลี่ยนไป

ส่วนการหาผลตอบสนองที่ระดับแรงดันสูงนั้น เหมาะที่จะใช้กับโวลเตจดีไวเดอร์ที่มีค่าแรงดันที่กำหนดสูงๆ (สูงกว่า 2 MV) ทั้งนี้เพราะโวลเตจดีไวเดอร์เหล่านี้จะมีค่าอัตราส่วนแรงดันสูง ถ้าทดสอบด้วยระดับแรงดันต่ำ จะทำให้ผลตอบสนองรูปขึ้นที่ออกมามีค่าน้อยไปทำให้เกิดความยุ่งยากในการวัดให้ถูกต้อง อีกประการหนึ่ง การทดสอบหาผลตอบสนองที่แรงดันสูงจะได้ผลถูกต้องใกล้เคียงกับสภาพใช้งานจริง



2.2.2.2 ความสำคัญของเวลาตอบสนอง

เวลาตอบสนองจะมีผลต่อการวัดเวลาช่วงคลื่น และอัมพลิจูดของแรงดันอิมพัลส์มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเป็นแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันอิมพัลส์แบบต่างๆ เมื่อคิดว่าแรงดันเริ่มพร้อมกันที่เวลา $0'$ ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความคลาดเคลื่อนในการวัดเนื่องจากเวลาตอบสนอง

เมื่อทราบเวลาตอบสนองของระบบวัด อาจคำนวณความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด และ ความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลาของคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบต่างๆ ได้ดังนี้

ก) ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอด ΔV คือ ความแตกต่างระหว่างค่ายอดของแรงดันที่ป้อนกับค่าที่วัดได้จากระบบการวัด คำนวณได้ดังนี้ (2.13)

$$\Delta V = s_L \cdot T \quad (2.13)$$

เมื่อ s_L คือ ความชันของแรงดันที่ป้อนเข้าไปก่อนเกิดการตัดของรูปคลื่น
 T คือ เวลาตอบสนองของระบบวัดตามสมการ (2.10)

รูปที่ 2.5 ก) เป็นกรณีที่พบบ่อยในทางปฏิบัติ คือ แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น รูปที่ 2.5 ข) เป็นแรงดันรูปคลื่นตัดหน้าคลื่นไม่เป็นเชิงเส้น รูปที่ 2.5 ค) แสดงให้เห็นกรณีที่เกิดการเพี้ยนก่อนถึงค่ายอดของแรงดันที่ต้องการวัด ซึ่งเกิดจากผลกระทบของการเพี้ยนของเวลาเริ่มต้นในผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย (ดูรูปที่ 2.4 ฉ)-ซ)) และยังแสดงให้เห็นด้วยว่า เวลาขณะที่วัดค่ายอดจะไม่ใช้เวลาเดียวกันกับที่คลื่นตัด แต่จะล่าหลังอยู่เล็กน้อย ซึ่งจะทำให้สมการ (2.13) ใช้ไม่ได้ อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์นี้อาจจะเลยไม่ต้องคำนึงถึงได้ถ้ามีผลกระทบไม่มาก ในกรณีที่มีผลกระทบมาก ก็จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงระบบการวัดใหม่ การวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มดังรูปที่ 2.5 ง) จะหาความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอดจากสมการ (2.13) ไม่ได้ เพราะค่าความชันตรงจุดนั้นเป็นศูนย์ อันที่จริงค่ายอดของแรงดันจะคลาดเคลื่อนไปบ้างเหมือนกัน แต่จะน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

ข) ความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลา Δt คือ ความแตกต่างระหว่างช่วงเวลาของแรงดันที่วัดได้กับช่วงเวลาของแรงดันที่ต้องการวัด จากรูปที่ 2.5 ก) เป็นกรณีที่แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น ความคลาดเคลื่อนของช่วงเวลา คือ {2}

$$\Delta t = T$$

แต่แรงดันในรูปที่ 2.5 ข) ค) และ ง) ไม่มีความสัมพันธ์เป็นกฎเกณฑ์ดังรูปที่ 2.5 ก) ในกรณีรูปคลื่นเต็มดังรูปที่ 2.5 ง) นั้น ความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลา จะเกิดขึ้นทั้งที่ตอนหน้าและตอนหางของคลื่น แต่ความคลาดเคลื่อนจะมีผลกระทบมาก เมื่อวัดเวลาช่วงหน้าคลื่น

นอกจากเวลาตอบสนอง T แล้วเวลาตอบสนองบางส่วน (partial response time) T_u และการเพี้ยนของเวลาเริ่มต้น T_o เป็นค่าที่ใช้บอกคุณสมบัติของระบบวัดได้ดังนี้ {2,7}

T_u เป็นค่าที่บอกให้ทราบว่าขนาดของการแกว่งที่บันทึกได้ ถูกต้องหรือไม่ สำหรับผลต่อต่อแรงดันรูปขึ้นที่มีลักษณะเป็นเอ็กโพเนนเชียล จะได้ว่า ถ้า $T_u < 1/(4\pi f_{max})$ ขนาดของการแกว่งที่วัดได้ถือว่าถูกต้อง แต่ถ้า $1/(4\pi f_{max}) < T_u < 2/(\pi f_{max})$ ขนาดของการแกว่งที่วัดได้ไม่ใช่ค่าที่ถูกต้อง (f_{max} คือ ความถี่สูงสุดของการแกว่งที่เกิดขึ้นได้ในระบบ) และต้องแก้ไขโดยใช้สมการ

$$V_{corr} = V_{max} \sqrt{1 + (2\pi f T_u)^2} \quad (2.14)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของการแกว่งที่บันทึกได้

V_{corr} คือ ขนาดที่ถูกต้องของการแกว่งที่เกิดขึ้น

V_{max} คือ ขนาดของการแกว่งที่บันทึกได้

และถ้า $T_u > 2/(\pi f_{max})$ ระบบวัดไม่สามารถใช้กับวงจรทดลองนั้นได้

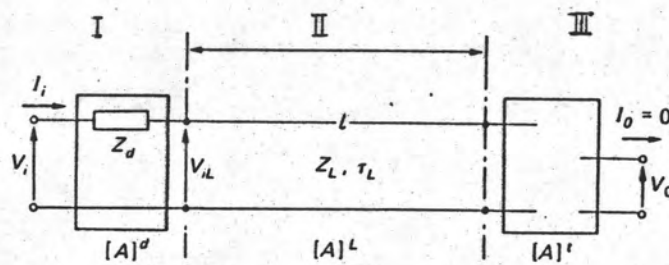
T_u เป็นค่าที่จะบอกให้ทราบว่าระบบวัดจะต้องมีการแก้ไขเปลี่ยนแปลงหรือไม่ ถ้า $T_u > 0.005T_c$ จะต้องมีการแก้ไขปรับปรุงระบบวัด

2.2.3 การคำนวณเวลาตอบสนองของระบบวัด

ตามที่กล่าวแล้วว่า ถ้าทราบผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยของระบบวัด จะสามารถหาเวลาตอบสนองได้โดยใช้สมการ (2.8) หรือ (2.10)

ในระบบวัดระบบหนึ่ง ถ้าทราบลักษณะของตัวประกอบวงจร จะสามารถคำนวณหาผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย และเวลาตอบสนองได้ [1, 73]

พิจารณาระบบวัดแบบ ระบบสามองค์ประกอบ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ระบบวัดแบบ ระบบสามองค์ประกอบ

- I คือ อิมพีแดนซ์หนึ่งในสายนำแรงสูง
- II คือ สายนำแรงสูง
- III คือ โวลเตจดีไวเดอร์

V_1, I_1 เป็น แรงดันและกระแสที่ขาเข้าของระบบวัดตามลำดับ
 V_0, I_0 เป็น แรงดันและกระแสขาออกที่ปลายขั้วแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์
 เมื่อคิดว่าผลกระทบของเคเบิลวัด และเครื่องวัดแรงดันต่ำ
 ต่อระบบวัดมีค่าน้อย จะได้ว่า $I_0 = 0$ และแรงดันก่อนเข้า
 เครื่องวัดแรงดันต่ำจะเท่ากับ V_0

ส่วนที่ I คือ ระบบหนึ่ง จะแทนด้วยอิมพีแดนซ์ Z_d
 ส่วนที่ II คือ สายนำแรงสูง คิดว่าเป็นสายส่งที่ไม่มีพลังงานสูญเสีย
 (lossless transmission line) มีเสิร์จอิมพีแดนซ์ Z_L
 และมีเวลาจร τ_L
 ส่วนที่ III คือ โวลเตจดีไวเดอร์ จะเป็นแบบใดแบบหนึ่งก็ได้ เช่น แบบ
 ความต้านทาน หรือ แบบตัวเก็บประจุ เป็นต้น

สมมติว่าไม่มีคัปปลิงระหว่างทั้งสามส่วนเกิดขึ้นในระบบวัด และให้
 $H(s)$ เป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของระบบวัด นิยามโดย

$$H(s) = V_0(s) / V_1(s) \quad (2.15)$$

ให้ N เป็น อัตราส่วนแรงดันของระบบวัดที่ความถี่ต่ำ นิยามโดย

$$N = \lim_{s \rightarrow 0} [V_1(s) / V_0(s)] \quad (2.16)$$

ให้ $h(s)$ เป็น นอร์มัลไลซ์ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (normalized transfer
 function) ของ $H(s)$ มีความสัมพันธ์ตามสมการ

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

ดังนั้นผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย $g(t)$ ซึ่งหาได้โดยใช้อินเวอร์สลาปลาซ
ทรานส์ฟอร์มของ $h(s)$ จะได้

$$g(t) = \mathcal{L}^{-1} [(1/s) \cdot h(s)] \quad (2.18)$$

และเวลาตอบสนอง T^o อาจหาได้โดยใช้สมการ (2.8)

ในกรณีที่ $h(s)$ เป็นฟังก์ชันที่สลับซับซ้อน จะหา T^o ได้โดยใช้กฎของ
Bernoulli-1' Hopital ดังนี้ (1)

$$N = \lim_{s \rightarrow 0} [-h'(s)] \quad (2.19)$$

เมื่อ $h'(s)$ เป็นอนุพันธ์ของ $h(s)$ เทียบกับ s

จากวงจรรูปที่ 2.6 และสมการ (2.15), (2.17), และ (2.19)
จะได้ว่า (1,7)

$$h(s) = [(Z_d(0) + Z_L) \cdot (1 + K_c(s))] / [(Z_d(s) + Z_L) \cdot (1 + K_c(0))] * \\ [1 - K_c(0) \cdot K_d(0)] / [1 - K_c(s) \cdot K_d(s) \cdot \text{Exp}(-2\tau_c s)] * \\ [A_c(0) \cdot \text{Exp}(-2\tau_c s)] / [A_c(s)] \quad (2.20)$$

$$T^o = T_c + \tau_c [(Z_c(0) \cdot Z_d(0) / Z_L) + Z_L] / [Z_c(0) + Z_d(0)] + \\ [Z_d(0) \cdot T_{kc} \cdot (Z_c(0) + Z_L)] / [Z_L \cdot (Z_c(0) + Z_d(0))] - \\ [Z_d(0) \cdot T_{kd} \cdot (Z_d(0) + Z_L)] / [Z_L \cdot (Z_c(0) + Z_d(0))] \quad (2.21)$$

เมื่อ $K_{\kappa}(s) = (Z_{\kappa}(s) - Z_L) / (Z_{\kappa}(s) + Z_L)$ (2.22)
 = สัมประสิทธิ์การสะท้อนของโวลเตจติไวเตอร์

$K_{\mu}(s) = (Z_{\mu}(s) - Z_L) / (Z_{\mu}(s) + Z_L)$ (2.23)
 = สัมประสิทธิ์การสะท้อนของอิมพีแดนซ์หน้า Z_{μ}

$T_{\kappa} = A'_{\kappa}(0) / A_{\kappa}(0)$ (2.24)
 = เวลาตอบสนองของโวลเตจติไวเตอร์

$T_{\kappa\kappa} = -K'_{\kappa}(0) / (1 + K_{\kappa}(0))$ (2.25)
 = เวลาตอบสนองการสะท้อน (reflection response time) ของโวลเตจติไวเตอร์

$T_{\mu\mu} = -K'_{\mu}(0) / (1 + K_{\mu}(0))$ (2.26)
 = เวลาตอบสนองการสะท้อนของอิมพีแดนซ์หน้า Z_{μ}

$Z_{\kappa}(s) =$ อิมพีแดนซ์ขาเข้าของโวลเตจติไวเตอร์ในโดเมนความถี่

$Z_{\kappa}(0) =$ ความต้านทานขาเข้าต่อแรงดันไฟตรงของโวลเตจติไวเตอร์

$Z_{\mu}(s) =$ อิมพีแดนซ์หน้าในสายนำแรงสูงในโดเมนความถี่

$Z_{\mu}(0) =$ อิมพีแดนซ์หน้าในสายนำแรงสูงต่อแรงดันไฟตรง

$A_{\kappa}(s) =$ อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจติไวเตอร์ในโดเมนความถี่

$A_{\kappa}(0) =$ อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจติไวเตอร์ต่อแรงดันไฟตรง

$A'_{\kappa}(0) =$ อนุพันธ์ ของ $A_{\kappa}(s)$ เทียบกับ s แล้วแทน $s = 0$

$K'_{\kappa}(0) =$ อนุพันธ์ ของ $K_{\kappa}(s)$ เทียบกับ s แล้วแทน $s = 0$

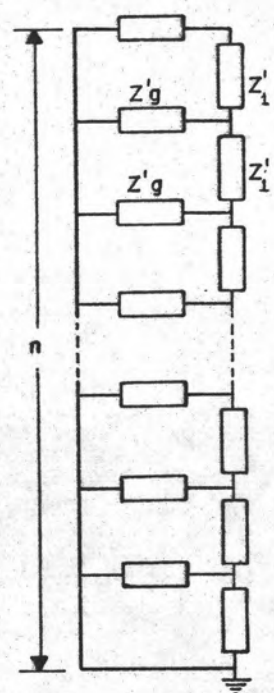
$K'_{\mu}(0) =$ อนุพันธ์ ของ $K_{\mu}(s)$ เทียบกับ s แล้วแทน $s = 0$

โดยทั่วไป โวลเตจติไวเตอร์จะเป็นตัวที่มีผลสำคัญต่อ นอร์มัลไลซ์
 ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชัน ของระบบวัด

2.3 โวลเตจดีไวเดอร์

2.3.1 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดีไวเดอร์

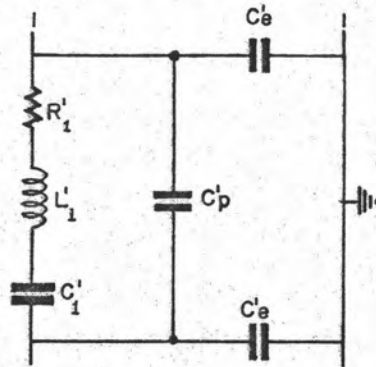
ในการศึกษาลักษณะสมบัติ ของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ความถี่สูง ต้องอาศัยวงจรสมมูล ซึ่งประกอบด้วยตัวประกอบวงจรค่าคงที่แบบกระจาย ดังรูปที่ 2.7 [13]



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดีไวเดอร์

- n คือ จำนวนส่วนย่อยทั้งหมด
- z'_1 คือ อิมพีแดนซ์อนุกรมต่อหนึ่งส่วนย่อย
- z'_g คือ อิมพีแดนซ์ขนานลงดินต่อหนึ่งส่วนย่อย
- z_1 คือ อิมพีแดนซ์อนุกรมรวม โดยที่ $z_1 = nz'_1$
- z_g คือ อิมพีแดนซ์ขนานลงดินรวม โดยที่ $z_g = (1/n) \cdot z'_g$

อิมพีแดนซ์แต่ละส่วนย่อย (Z'_1 และ Z''_2) จะประกอบด้วย ตัวประกอบ วงจรที่ต่ออนุกรมและขนานกันดังในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลทั่วไปของตัวประกอบวงจรของโวลเตจดีไวเดอร์ แต่ละส่วนย่อย

- R'_1 คือ ตัวความต้านทานย่อย (ซึ่งรวมทั้งค่าความต้านทานสมมูลของ ตัวเก็บประจุ)
- C'_1 คือ ตัวเก็บประจุน้อย
- L'_1 คือ สเตอรินดักแทนซ์ย่อย
- C'_p คือ ตัวเก็บประจุนานย่อย (ซึ่งรวมทั้งค่าความจุสเตรขนาน)
- C'_e คือ ค่าความจุสเตรลงดินย่อย

ดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้นว่า โวลเตจดีไวเดอร์อาจประกอบด้วยตัวประกอบวงจรที่เป็นตัวความต้านทาน หรือตัวเก็บประจุอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือผสมกัน ในกรณีที่ เป็นโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมตัวความต้านทานและตัวเก็บประจุ อาจต่ออนุกรมหรือขนานก็ได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบโวลเตจดีไวเดอร์ทุกแบบ จะมีตัวประกอบหลักอย่างน้อย คือ R'_1 และ C'_1 อย่างใดอย่างหนึ่ง ต่ออนุกรมกันหรือขนานกัน ในกรณีที่ต่อขนานกัน C'_1 จะอยู่ในตำแหน่ง C''_2 (ดูวงจรสมมูลรูปที่ 2.8) ส่วนตัวประกอบวงจรอื่นๆ ที่เกิดขึ้นเองในลักษณะ

สเตรอิมพีแดนซ์ต้องนำมาคิดรวมอยู่ในวงจรมุมสูง หากต้องการความเที่ยงตรงสูง ข้อดีในการใช้วงจรมุมสูงวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของโวลเตจดีไวเดอร์ คือ ทำให้เกิดความสะดวกและง่ายต่อการศึกษาโวลเตจดีไวเดอร์แบบใดๆ โดยการแทนค่าตัวประกอบวงจรมุมสูงทั่วไปให้เหมาะสมเท่านั้น

เมื่อพิจารณาจากวงจรมุมสูงที่กล่าวแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่ามีลักษณะคล้ายกับวงจรมุมสูงของสายส่งพลังงานไฟฟ้าที่ปลายข้างหนึ่งต่อลงดิน จึงอาจวิเคราะห์ได้ในลักษณะเดียวกับระบบสายส่ง นั่นคือ จากวงจรมุมสูงในรูปที่ 2.7 จึงเขียนทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของโวลเตจดีไวเดอร์ได้ดังสมการ (13)

$$H_v(s) = \frac{\text{Sinh} \left[(1/n) \cdot \sqrt{Z_1(s)/Z_g(s)} \right]}{\text{Sinh} \left[\sqrt{Z_1(s)/Z_g(s)} \right]}$$

ทำเป็นนอร์มัลไลซ์ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน โดยให้ a เป็นอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ จะได้

$$h_v(s) = a \cdot H_v(s)$$

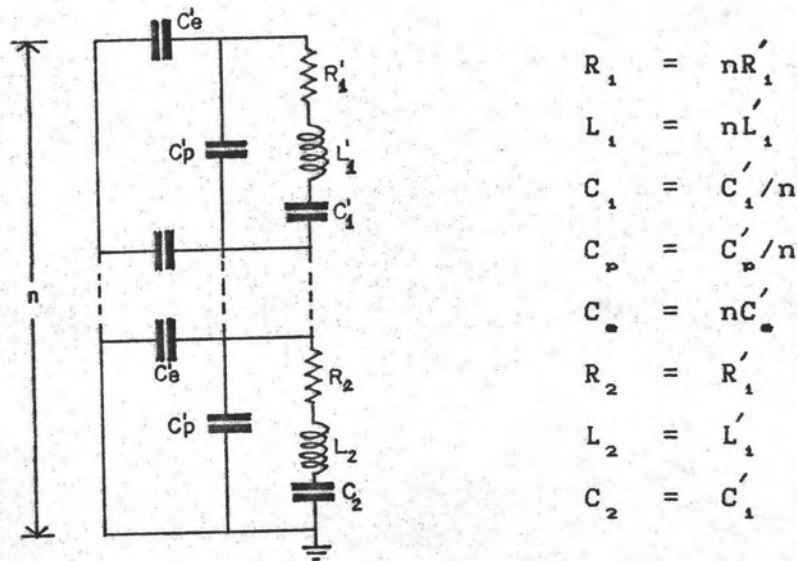
ถ้าเลือกให้ a มีค่าเท่ากับจำนวนส่วนย่อย n ทั้งหมด จะได้

$$h_v(s) = n \cdot \frac{\text{Sinh} \left[(1/n) \cdot \sqrt{Z_1(s)/Z_g(s)} \right]}{\text{Sinh} \left[\sqrt{Z_1(s)/Z_g(s)} \right]} \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.18) ทำให้สามารถหาผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยทางทฤษฎีได้

2.3.2 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

การวิเคราะห์หาผลตอบสนอง ของโวลเตจดีไวเดอร์ แบบตัวเก็บประจ่วย่อยประกอบกัน หาได้โดยใช้วงจรสมมูลในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

อาศัยสมการ (2.27) และ (2.18) ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย จะเขียนได้ด้วยสมการต่อไปนี้ {2,7}

$$g(t) = 1 - C_{\infty} / [6 \cdot (C_1 + C_p)] + 2 \cdot \text{Exp}(-a_1 t) * \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \cdot [\text{Cosh}(b_k t) + (a_1 \text{ Sinh}(b_k t)) / b_k] / [A \cdot B] \quad (2.28)$$

เมื่อ

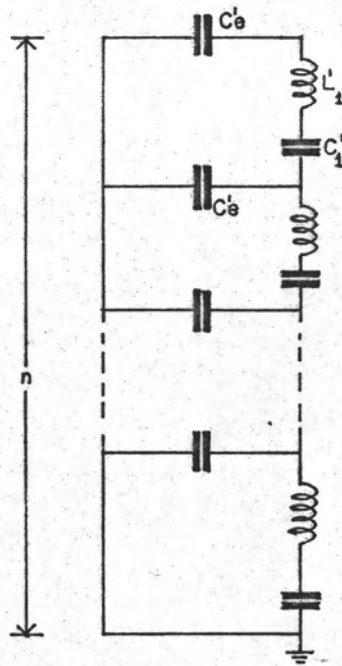
$$A = 1 + C_p / C_1 + C_m / (C_1 \cdot k^2 \cdot \pi^2)$$

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

$$a_1 = R_1 / (2 \cdot L_1)$$

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

จากวงจรสมมูลรูปที่ 2.9 ถ้าตัวเก็บประจุย่อยที่เลือกใช้มีความสูญเสียภายในน้อย ($R_1 = 0$) และ เลขค่า C_p จะเขียนวงจรสมมูลย้ได้ดังรูปที่ 2.10 และเรียกโวลเตจติไวเตอร์แบบนี้ว่า โวลเตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุล้วน



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของโวลเตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุล้วน



โดยปกติ C_0/C_1 ในรูปที่ 2.10 มีค่าน้อยกว่า π^2 มาก ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยในสมการที่ (2.28) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$g(t) = 1 - C_0/(6.C_1) + 2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} [\text{Cos}(\omega_k t) / (1 + C_0/(C_1 \cdot k^2 \cdot \pi^2))] \quad (2.29)$$

ทั้งนี้เพราะ $A = B = 1$

$$a_1 = 0$$

$$b_k = j\omega_k, \quad \omega_k = \sqrt{(k^2 \cdot \pi^2) / (L_1 \cdot C_0)}$$

จากผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยในสมการ (2.29) แสดงว่าเกิดการแกว่งอย่างมากที่สุดที่ความถี่อันดับแรก ความถี่ของการแกว่ง f_1 หาได้จาก

$$\omega_1 = \sqrt{(\pi^2) / (L_1 \cdot C_0)} = 2\pi f_1$$

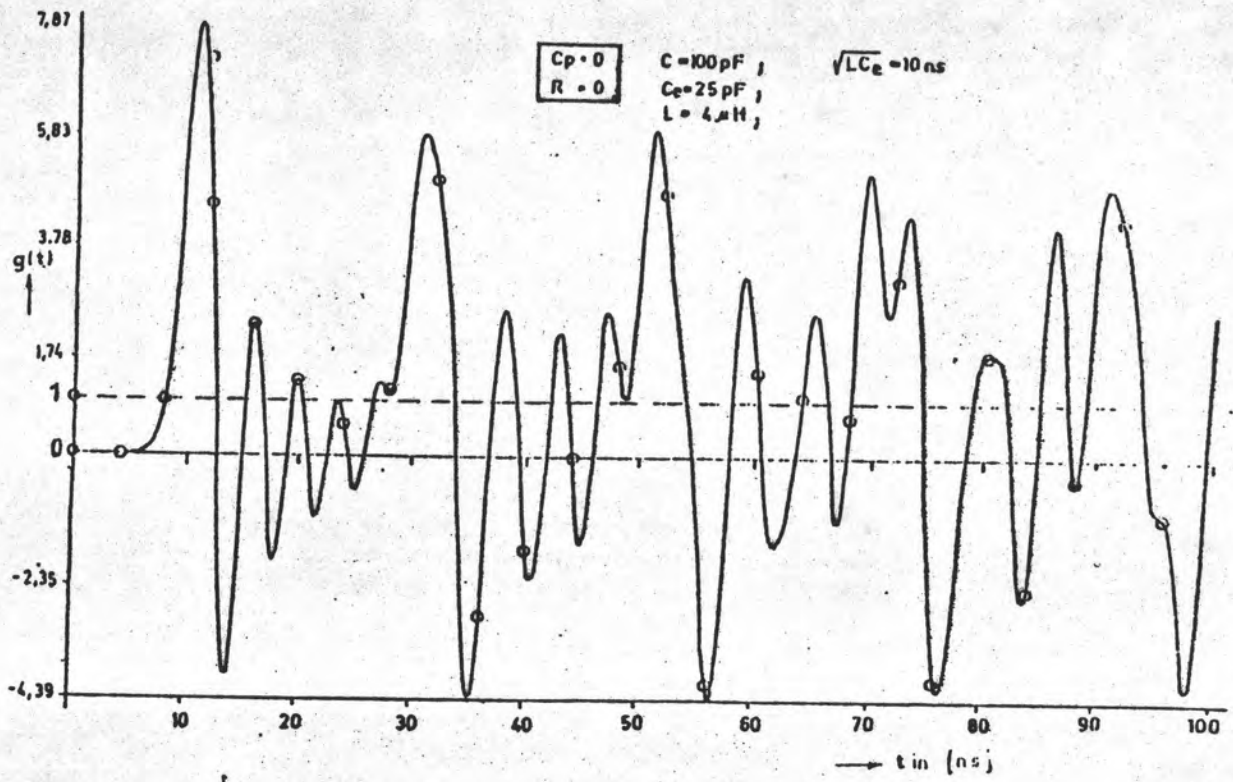
ดังนั้น

$$f_1 = 1 / [2 \cdot \sqrt{(L_1 \cdot C_0)}] \quad (2.30)$$

$\sqrt{(L_1 \cdot C_0)}$ เรียกว่า เวลาจรของโวลเตจดีไวเดอร์

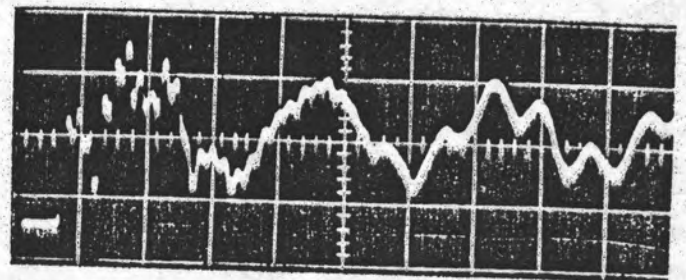
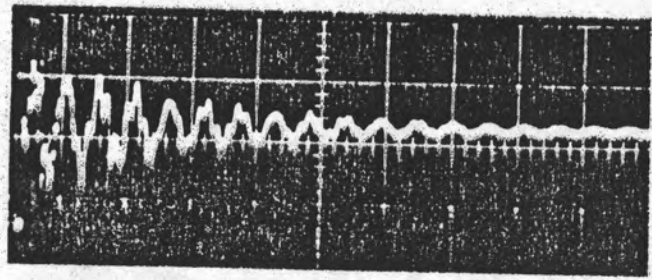
ตัวอย่างการคำนวณผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย แสดงดังกราฟในรูปที่

2.11 {7}



รูปที่ 2.11 ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้น ที่ได้จากการคำนวณ

ตัวอย่างการทดลองหาผลตอบสนองรูปขึ้น ของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้นขนาด 3 MV $C_1 = 450$ pF แสดงในรูปที่ 2.12 [4]

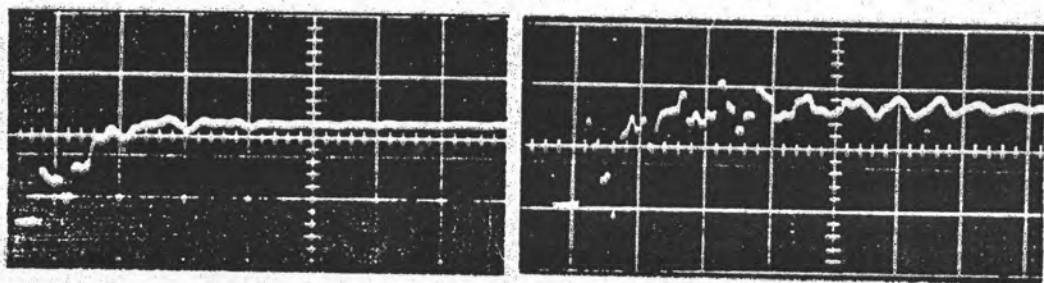


สเกลแกนเวลา 1 μ s/div.

สเกลแกนเวลา 200 ns/div.

รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้น ขนาด 3 MV $C_1 = 450$ pF

การแก้ปัญหาการแกว่ง ในผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้วน ทำได้โดยเพิ่มความต้านทานหน่วงในวงจร วิธีง่าย ๆ ที่ใช้กัน คือ การใส่ตัวต้านทานค่าพอเหมาะไว้ตอนบนของโวลเตจดีไวเดอร์ ผลปรากฏว่าสามารถหน่วงการแกว่งได้ดีพอควร โวลเตจดีไวเดอร์แบบนี้เรียกว่า โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุหน่วงในสายนำ (capacitor voltage divider with damped lead-in) ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยที่ได้จากการทดลอง แสดงในรูปที่ 2.13 {4}



ก)

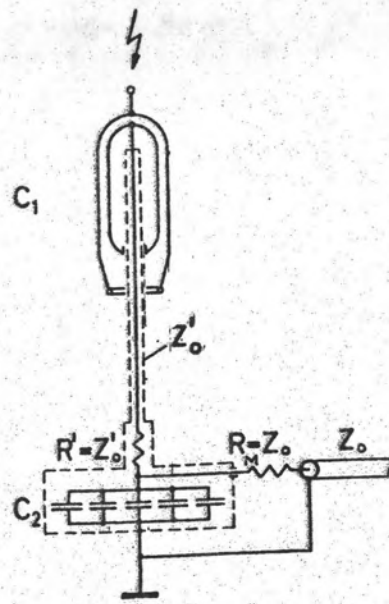
ข)

รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุขนาด 3 MV มีตัวต้านทานหน่วงขนาด 270 Ω ในสายนำไฟแรงสูง สเกลเวลา 200 ns/div.

ก) ตัวต้านทานหน่วงอยู่ที่ขาเข้าของสายนำไฟแรงสูง

ข) ตัวต้านทานหน่วงอยู่ที่ขาออกของสายนำไฟแรงสูง

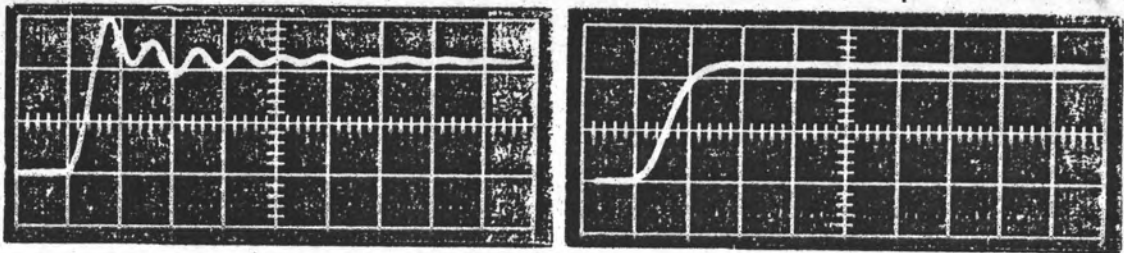
การแก้ปัญหาแบบนี้ยังไม่สามารถแก้ปัญหการสะท้อนของคลื่นภายในตัวโวลเตจดีไวเดอร์ได้ Schwab, A.J และ Pagel, JH.W {6} จึงทดลองสร้าง โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้วน โดยมีลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง แบบทรงกระบอกซ้อนกันรวมฉนวนด้วยก๊าซอัดความดัน และใช้ความต้านทานแมชซิ่ง (ขนาดเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำแรงต่ำในตัวเก็บประจุภาคแรงสูง) ต่อที่ขาเข้าตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โวลต์จดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุเดี่ยว

- C_1 คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงแบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วม
- Z'_0 คือ เล็ร์จิมพีแดนซ์ของสายนำระหว่างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ
- R' คือ ความต้านทานแมชชิง
- C_2 คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ
- R_m คือ ความต้านทานแมชชิงของเคเบิลวัด
- Z_0 คือ เล็ร์จิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด

ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย $\mathcal{E}(t)$ ของโวลต์จดีไวเดอร์แบบนี้เมื่อมีความต้านทานหน่วง 170-230 Ω อยู่ที่ขาเข้าของสายนำแรงสูง แสดงในรูปที่ 2.15



ก) $R' = 0$

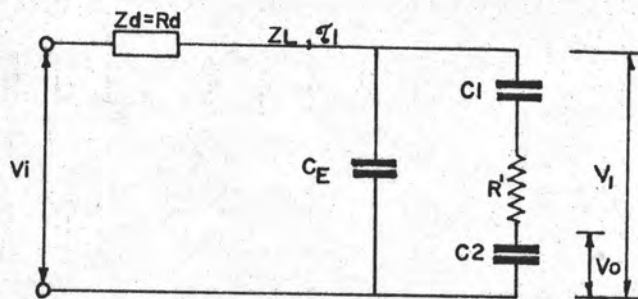
ข) $R' = Z'_o$

รูปที่ 2.15 ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยของโวลเตจดีไวเดอร์ในรูปที่ 2.14 สเกลเวลา 50 ns/div.

จากโครงสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงสูง แบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วม จะมีผลให้

- ก) ค่าความจุสเตรลงดิน C_u ภายในตัวเก็บประจุเป็นศูนย์
- ข) สเตอรินดักแทนซ์ L_1 มีค่าน้อย

จากรูปที่ 2.6 และ 2.14 สามารถเขียนวงจรสมมูลของระบบวัด เมื่อ C_u และ L_1 มีค่าเป็นศูนย์ได้ ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของระบบวัด เมื่อใช้ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง เป็นแบบตัวเก็บประจุเดี่ยวมีโครงสร้างแบบ ทรงกระบอกซ้อนกันร่วม

C_E ในรูปที่ 2.16 เป็นค่าความจุสเตรลงดินที่ทรงกระบอกนอกของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ซึ่งหาได้จากสมการ (13)

$$C_E = \frac{[2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot 1]}{\ln[(2.1) \cdot \sqrt{(4 \cdot h + 1) / (4 \cdot h + 3.1)}] / d} \text{ ฟารัด} \quad (2.31)$$

- เมื่อ 1 คือ ความยาวของทรงกระบอกนอก เป็น เมตร
 d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของทรงกระบอกนอก เป็น เมตร
 h คือ ความสูงของปลายทรงกระบอกนอกเหนือพื้นดิน เป็น เมตร
 ϵ_0 คือ เพอร์มิตติวิตีของสูญญากาศ มีค่า 8.84194×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร
 ϵ_r คือ เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของตัวกลาง

จากรูปที่ 2.16 สมการที่ (2.16) และ (2.22)-(2.26) เมื่อใช้อิมพีแดนซ์ห้วงเป็นความต้านทานที่มีค่าความเหนี่ยวนำ และ ค่าความจุสเตรต่ำ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} N &= A_z(0) = (1 + C_2/C_1) \\ A_z(s) &= (N + s \cdot R' \cdot C_2) \\ Z_z(s) &= [N + s \cdot R' \cdot C_2] / [s \cdot (C_2 + N \cdot C_E + s \cdot R' \cdot C_2 \cdot C_E)] \\ Z_d(s) &= R_d \\ K_z(s) &= [Z_z(s) - Z_L] / [Z_z(s) + Z_L] \\ K_d(s) &= [Z_d(s) - Z_L] / [Z_d(s) + Z_L] \\ Z_z(0) &\rightarrow \infty \\ K_z(0) &= 1 \\ K_d(0) &= [R_d - Z_L] / [R_d + Z_L] \\ T_{kz} &= Z_L \cdot [C_2 / (N + C_E)] \\ T_{kd} &= 0 \\ T_z &= (R' \cdot C_2) / N \end{aligned} \quad (2.32)$$

โดยสมการ (2.21) จะได้

$$T^\circ = (R' \cdot C_2) / N + (\tau_L \cdot R_d) / Z_L + R_d \cdot (C_2 / N + C_E) \quad (2.33)$$

จากรูปที่ 2.16 นอร์มัลไลซ์ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของโวลเตจดีไวเดอร์
มีค่า

$$\begin{aligned} h_c(s) &= [N \cdot V_o(s)] / V_i(s) \\ &= N / (N + s \cdot R' \cdot C_2) \end{aligned}$$

ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยหาได้โดยใช้สมการ (2.18) และมีค่า

$$g(t) = 1 - \text{Exp}[(-N) / (R' \cdot C_2)] \cdot t \quad (2.34)$$

2.3.3 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

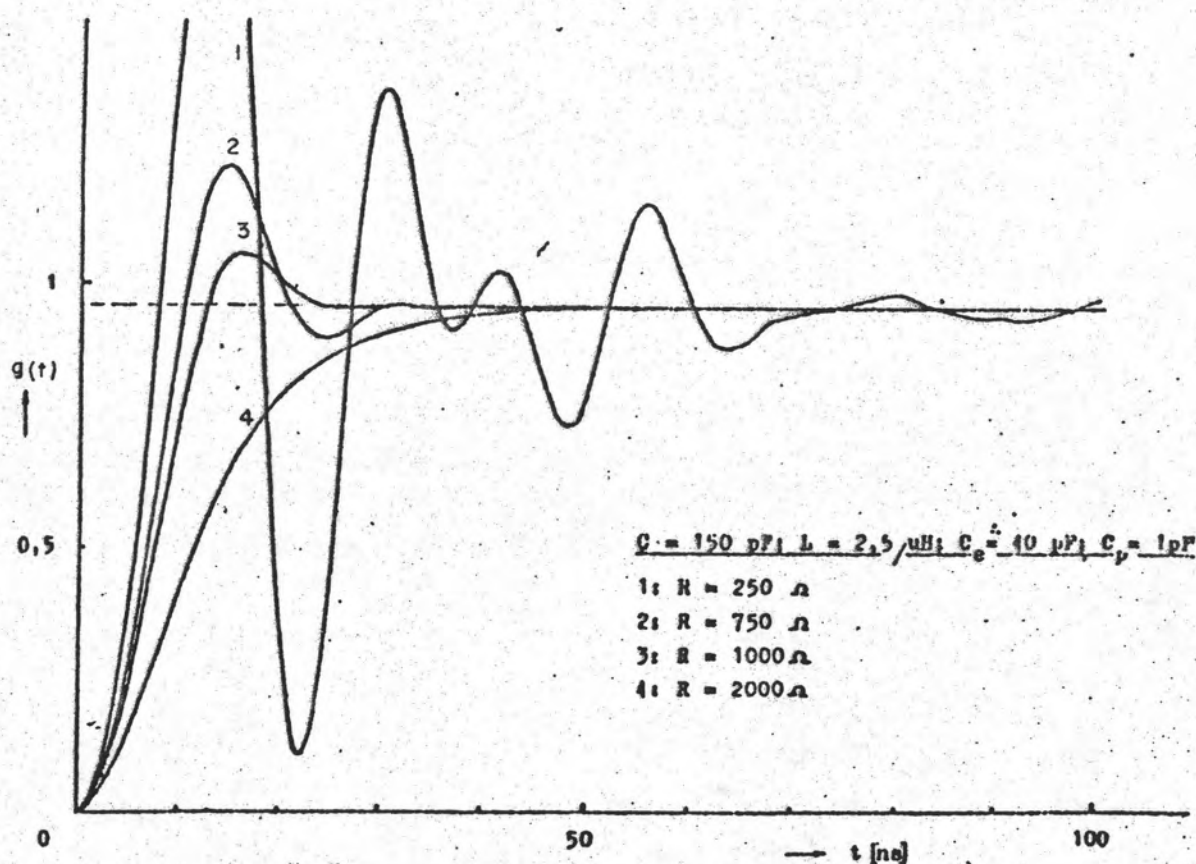
ที่ระดับแรงดันสูงๆ การสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงแบบ
ทรงกระบอกซ้อนกันร่วมจะเสียค่าใช้จ่ายสูงและขึ้นรูปขึ้นงานได้ยาก จึงได้มี
การพัฒนาสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงขึ้น ภาค
แรงสูงและภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์แบบนี้ ประกอบด้วยความต้านทาน
และตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน ความต้านทานที่ต่ออนุกรมไว้จะหน่วงการแกว่ง
ภายในตัวโวลเตจดีไวเดอร์ วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบนี้ เหมือน
วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 2.9

W. Zaengl [1] ได้ศึกษาทฤษฎีและทดลองเกี่ยวกับโวลเตจดีไวเดอร์
แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง แล้วสรุปว่า ถ้าเลือกใช้ค่าความต้านทาน
ที่เหมาะสม จะได้ผลตอบสนองที่ดี แม้ว่าจะเป็นโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้กับขนาด
แรงดันสูงมากก็ตาม

ความต้านทานที่เหมาะสม R_{opt} . ควรมีค่า ดังนี้

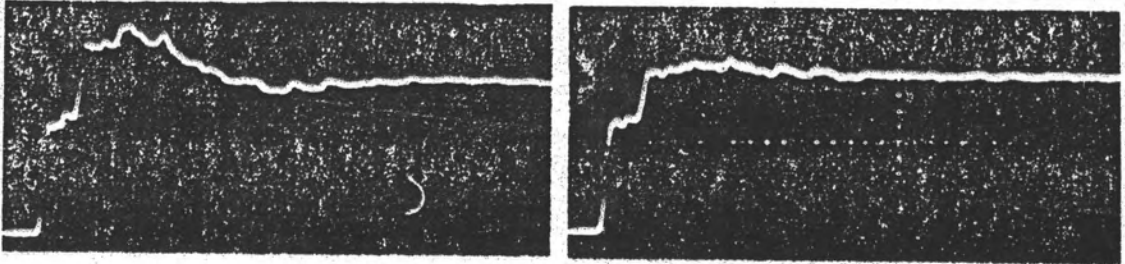
$$R_{opt} = (4 \dots 6) \sqrt{L_1 / C_1}$$

ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยของโวลเตจติไวเตอร์แบบนี้ เมื่อคำนวณโดยใช้สมการ (2.28) โดยมี R_1 เป็น พารามิเตอร์ แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยของโวลเตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหนึ่งวง ที่ได้จากการคำนวณ

ตัวอย่างผลการทดลองหาผลตอบสนองรูปขึ้น ของโวลเตจดีไวเดอร์ แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน้าขนาด 1.6MV $C_1 = 900\text{pF}$ $R = 152\Omega$ แสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18

ก)

ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ มีความต้านทานหน้าขนาด 1.6MV $C_1 = 900\text{pF}$

$R_1 = 152\Omega$ สเกลเวลา 200 ns/div.

ก) ไม่มีความต้านทานหน้าในสายนำไฟแรงสูง

ข) มีความต้านทานหน้า $R_d = 100\Omega$

ที่ขาเข้าของสายนำไฟแรงสูง

ข)

2.3.4 อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์

อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันสูงที่ขั้วออกของสายนำแรงสูงต่อแรงดันที่ปลายเคเบิลวัดก่อนเข้าเครื่องวัด นั่นคือ

$$a = V_1 / V_2 \quad (2.35)$$

เมื่อ a คือ อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์
 V_1 คือ แรงดันที่ปลายขาออกของสายนำแรงสูง
 V_2 คือ แรงดันที่ปลายเคเบิลวัดก่อนเข้าเครื่องวัด

อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์แบบใดๆ อาจหาได้ด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

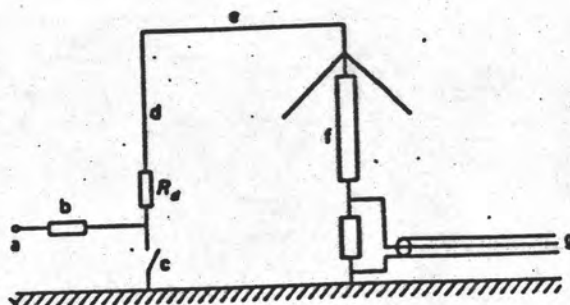
- ก) คำนวณจากอิมพีแดนซ์ของตัวประกอบวงจรที่ทราบค่าจากการวัด
- ข) วัดแรงดันพร้อมกันทั้งทางขาเข้า V_1 และขาออก V_2 ของโวลเตจดีไวเดอร์
- ค) ใช้วงจรบริดจ์เทียบค่าแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ กับแรงดันขาออกของดีไวเดอร์มาตรฐานที่ปรับอัตราส่วนแรงดันได้
- ง) เทียบกับระบบการวัดที่ทราบอัตราส่วนแรงดันแล้ว

ทั้ง 4 วิธีที่ใช้กันอยู่นี้ วิธี ก. เหมาะสำหรับหาอัตราส่วนแรงดันในทางทฤษฎี ซึ่งอาจแตกต่างไปจากเวลาใช้งานจริงได้ วิธี ข. และ ค. นั้นโดยมากทำกันที่ระดับแรงดันไม่เกิน 500 โวลต์ ซึ่งอาจเป็นแรงดันกระแสตรงหรือกระแสสลับ แล้วแต่ว่าเป็นโวลเตจดีไวเดอร์แบบใด ถ้าเป็นโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานก็ใช้ได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ แต่ถ้าเป็นโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุต้องใช้แรงดันกระแสสลับ การทดลองด้วยแรงดันกระแสสลับ ควรทดลองที่ความถี่อย่างน้อยสองค่า เช่น ที่ 50Hz และ

ที่ 1 kHz ตามข้อกำหนดของ ไอ อี ซี {2} วิธี ง. ใช้ได้กับโวลเตจดีไวเดอร์
ทุกแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุและแบบผสม

2.3.5 เวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์

เวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์มีผลต่อเวลา
ตอบสนองของระบบวัดมาก ปกติจึงพิจารณาเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์
เป็นหลักในการพิจารณาเวลาตอบสนองของระบบวัด ในทางปฏิบัติเวลาตอบสนอง
ของโวลเตจดีไวเดอร์จะหาจากเวลาตอบสนองของระบบวัดที่ได้จากการทดลอง
เนื่องจากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซึ้นมีขนาดเล็กกว่าโวลเตจดีไวเดอร์มาก และ
มักวางบนพื้นห้องปฏิบัติการ จึงต้องต่อสายนำแรงสูงในแนวตั้งจากสายนำแรงสูง
ในแนวนอนลงมาหาเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซึ้น ดังรูปที่ 2.19 ผลตอบสนอง
รูปซึ้นหนึ่งหน่วยของการวัดแบบนี้ เรียกว่า " ผลตอบสนองรูปซึ้นหนึ่งหน่วย ของ
ระบบวัดตัดแปลง "



รูปที่ 2.19 วงจรระบบวัดตัดแปลงเพื่อใช้หาผลตอบสนองรูปซึ้นหนึ่งหน่วย

a b และ c ประกอบเป็นเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซึ้น

R_d เป็น ความต้านทานหน่วงในสายนำแรงสูง

d เป็น สายนำแรงสูงในแนวตั้ง

e เป็น สายนำแรงสูงในแนวนอน

f เป็น โวลเตจดีไวเดอร์

g เป็น เคเบิลวัด

ในรูปที่ 2.19 a b และ c จะประกอบกันเป็นแหล่งจ่ายแรงดันรูปขึ้น สวิตช์ c จะลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงที่ป้อนเข้ามาที่ a โดยมีความต้านทาน b เป็นตัวจำกัดกระแส สวิตช์ c เป็นสวิตช์ทำงานด้วยความเร็วสูง และมีค่าความต้านทานเป็นศูนย์ขณะลัดวงจร สวิตช์ c นี้จะใช้สวิตช์แบบปรอท (mercury-wetted contact switch) หรือช่องว่างอากาศที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ขนาดช่องว่างประมาณ 1 มิลลิเมตร ช่องว่างอากาศที่กว้างเกินไปจะใช้ไม่ได้ เพราะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไม่เร็วพอขณะเกิดสปาร์คโอเวอร์ และอิมพีแดนซ์หลังสปาร์คโอเวอร์ก็ต่ำไม่เพียงพอด้วย

ความต้านทานหน่วงในสายนำแรงสูง เป็นชนิดที่มีค่าสเตรอินดักแตนซ์ต่ำ ขนาดของความต้านทานหน่วงจะเท่ากับหรือใกล้เคียงกับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำในแนวนอน

สายนำแรงสูงแนวตั้งจะเลือกให้มีเสิร์จอิมพีแดนซ์ เท่ากับสายนำแรงสูงแนวนอน หรือใช้ขนาดเท่ากับสายนำแนวนอนก็ได้ เพราะความแตกต่างอันนี้ ไม่มีผลมากนัก [13]

ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยของระบบวัดดัดแปลงในรูปที่ 2.19 อาจมีลักษณะใดลักษณะหนึ่งตามรูปที่ 2.4

ถ้าให้ $R_d = 0 \Omega$ เวลาตอบสนอง T_m^o ของระบบวัดดัดแปลงคำนวณได้โดยใช้สมการ (2.21) [13]

$$T_m^o = T_L + (\tau_L \cdot Z_L) / Z_L(0) \quad (2.36)$$



จากผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยที่ได้จากการทดลอง จะหาเวลาตอบสนองทดลอง (experimentally recorded response time, T_n) ได้โดยใช้สมการ (2.12) เวลาตอบสนองทดลองที่หาได้นี้จะน้อยกว่าเวลาตอบสนอง T_m^0 เนื่องจากมีเวลาล่าช้าในระบบวัด เวลาล่าช้านี้ประมาณเท่ากับเวลาจรในสายนำแรงสูงทั้งสอง ดังนั้นเวลาตอบสนองทดลองจะมีค่าประมาณตามสมการ (1)

$$\begin{aligned} T_n &= T_m^0 - \tau_L \\ &= T_L + \tau_L \cdot [Z_L / Z_L(0) - 1] \\ &= T_L + (\tau_h + \tau_v) \cdot [Z_L / Z_L(0) - 1] \end{aligned} \quad (2.37)$$

- เมื่อ T_n เป็น เวลาตอบสนองทดลองซึ่งหาได้โดยอาศัยสมการ (2.12)
 τ_L เป็น เวลาจรของคลื่นในสายนำแรงสูงทั้งสอง = $\tau_h + \tau_v$
 τ_h เป็น เวลาจรของคลื่นในสายนำแรงสูงแนวนอน
 τ_v เป็น เวลาจรของคลื่นในสายนำแรงสูงแนวตั้ง

เวลาตอบสนองที่แท้จริง T เมื่อไม่มีสายนำในแนวตั้งไม่รวมเวลาจรของคลื่นในสายนำแนวนอน และ $R_s = 0\Omega$ หาได้จากสมการ (2.37) โดยให้ $\tau_v = 0$ (1)

$$T = T_L + \tau_h \cdot [Z_L / Z_L(0) - 1] \quad (2.38)$$

จากสมการที่ (2.37) และ (2.38) จะได้

$$T = T_n + \tau_v \cdot [1 - Z_L/Z_v(0)] \quad (2.39)$$

$$T_v = T + \tau_n \cdot [1 - Z_L/Z_n(0)] \quad (2.40)$$

$$Z_L = (Z_v + Z_n) / 2 \quad (2.41)$$

เมื่อ Z_v และ Z_n เป็น เลิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำแหวดิ่งและแหวนอนตามลำดับ
หาได้จากสมการ (1)

$$\begin{aligned} Z_v &= 60 \ln[(2.1_v/d_v) \cdot \sqrt{(4.h + 1_v)/(4.h + 3.1_v)}] \\ &= 60 \ln[(1.15 \cdot 1)/d_v] \quad \text{เมื่อ } h \ll 1 \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$\text{และ } Z_n = 60 [\ln(4.H/d_n) - \ln(1 + \sqrt{1 + 2.(H/1_n)^2}) / 2] \quad (2.43)$$

เมื่อ d_v, d_n คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของสายนำแรงสูงแหวดิ่งและแหวนอน
ตามลำดับ

h คือ ระยะห่างจากปลายล่างของสายนำแรงสูงแหวดิ่งจากพื้นดิน

$1_v, 1_n$ คือ ความยาวของสายนำแรงสูงแหวดิ่งและแหวนอนตามลำดับ

H คือ ความสูงของสายนำแรงสูงแหวนอนจากพื้นดิน

$$\tau_v = 1_v/c \quad (2.44)$$

$$\tau_n = 1_n/c \quad (2.45)$$

เมื่อ c เป็น ความเร็วแสงในสุญญากาศมีค่าประมาณ 3×10^8 เมตร/วินาที

การหาเวลาตอบสนอง T และ T_c จากออสซิลโลแกรมของผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย เมื่อ $R_d = 0\Omega$ ถ้าผลตอบสนองเกิดการแกว่งอย่างมากจะทำให้ไม่สามารถหาค่าเวลาตอบสนองได้ถูกต้อง จึงมีการปรับปรุงวิธีหาเวลาตอบสนอง T และ T_c ใหม่ ซึ่งทำได้ดังนี้ [1,7]

จากสมการ (2.21) เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้ว่า [13]

$$T_m^o [1 + R_d / Z_c(0)] = T_c + \tau_c \cdot [Z_L / Z_c(0)] + R_d \cdot [\tau_c / Z_L + T_c / Z_c(0) + T_{c,c} \cdot (1 / Z_L + 1 / Z_c(0))] \quad (2.46)$$

จากสมการนี้ ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_m^o [1 + R_d / Z_c(0)]$ กับ R_d จะเป็นเชิงเส้น ดังนั้นถ้าทำการทดลองโดยการเปลี่ยนค่า R_d ไปหลายค่าจนได้ผลตอบสนองที่เกิดการแกว่งไม่มาก เมื่อนำผลที่ได้มาเขียนความสัมพันธ์แล้วลากเส้นตรงที่เหมาะสมไปตัดแกน $R_d = 0$ เมื่อใช้สมการ (2.46) และ (2.40) จะหา T_c และ T ได้ตามลำดับ