

บทที่ 2

ภาคทฤษฎีของโวลเตจติไวเตอร์

2.1 บทนำ

โวลเตจติไวเตอร์ที่ใช้อยู่ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์สองชุด ต่ออนุกรมกันอยู่ คือ ภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงของโวลเตจติไวเตอร์จะรับแรงดันแทบทั้งหมดคร่อมตัวมัน อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำจะเป็นส่วนแรงดันตกคร่อมที่จะนำไปเข้าเครื่องวัด ปกติปลายบนของโวลเตจติไวเตอร์เป็นขั้วต่อแรงดันสูง ปลายล่างเป็นศักย์ดิน ตัวประกอบบางจรของทั้งสองภาคของโวลเตจติไวเตอร์อาจเป็นตัวความต้านทาน คะแบชเตอร์ หรือใช้ร่วมกันทั้งสองอย่าง โวลเตจติไวเตอร์จะได้อาศัยตามตัวประกอบบางจรและลักษณะการจัดวางตัวประกอบบางจรเหล่านั้น คือ โวลเตจติไวเตอร์แบบความต้านทาน แบบกะแบชเตอร์ และแบบผสมตามลำดับ อย่างไรก็ตามก็ตีโวลเตจติไวเตอร์แบบต่างๆ เหล่านี้ต้องมีลักษณะสมบัติได้ตามต้องการ

2.2 ลักษณะสมบัติของโวลเตจติไวเตอร์

โดยทั่วไปเมื่อก้าวถึงโวลเตจติไวเตอร์จะกำหนดด้วยลักษณะสมบัติสำคัญ ๒ ประการ คือ ผลตอบสนอง และ ค่าอัตราส่วนแรงดัน

2.2.1 ผลตอบสนอง

ผลตอบสนองเป็นคุณสมบัติสำคัญยิ่งประการหนึ่งของโวลเตจติไวเตอร์ที่จะบอกให้ทราบว่าจะนำไปใช้วัดแรงดันอิมพัลส์แบบต่างๆ ได้เหมาะสมหรือไม่ ในกรณีที่ใช้วัดแรงดันอิมพัลส์การตรวจสอบผลตอบสนองดังกล่าวนี้ในปัจจุบันใช้วิธีผลตอบสนองรูปขึ้น ซึ่งจะช่วยให้หาค่าเวลาตอบสนองได้

แรงดันรูปขึ้นที่ใช้ในการทดสอบผลตอบสนองแบบนี้อาจเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$v_1(t) = V_0 u_1(t)$$

เมื่อ V_0 คือ อัมพลิจูดของแรงดันรูปขึ้น

$u_1(t)$ คือ ฟังก์ชันรูปขึ้นหนึ่งหน่วย นิยามว่า

$$u_1(t) = 0 \quad \text{เมื่อ } t < 0$$

$$= 1 \quad \text{เมื่อ } t > 0$$

กำหนดให้ $v_2(t)$ เป็นแรงดันตอบสนองของแรงดันรูปขั้น ซึ่งทำ normalization ได้
ดังนี้

$$G(t) = \frac{v_2(t)}{V_o}$$

$G(t)$ คือ ผลตอบสนองรูปขั้นเป็นฟังก์ชันไม่มีหน่วย และไม่ขึ้นกับแรงดันขาเข้า
แรงดันตอบสนอง $v_2(t)$ เขียนในเทอมของผลตอบสนองรูปขั้น $G(t)$ ได้เป็น

$$v_2(t) = V_o \cdot G(t)$$

แรงดันตอบสนองทำเป็นผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย $g(t)$ ได้ดังนี้

$$g(t) = \frac{v_2(t)}{V_2}$$

เมื่อ V_2 คือ ระดับที่ผลตอบสนองคงที่

ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย $g(t)$ มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองรูปขั้น $G(t)$ ดังนี้ คือ

$$g(t) = \frac{v_2(t)}{V_o} \cdot \frac{V_o}{V_2}$$

$$= G(t) \cdot a_o$$

เมื่อ a_o คือ อัตราส่วนแรงดันไฟตรง กำหนดโดย

$$a_o = \frac{V_o}{V_2} \quad (2.1)$$

ผลตอบสนองรูปขั้น $G(t)$ จะมีความสัมพันธ์กับทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน $H(S)$ ดังนี้

$$H(S) = S \mathcal{L}G(t)$$

$$H(S) = S \cdot G(S)$$

ถ้า $G(t)$ สามารถวิเคราะห์เป็นรูปแบบง่ายๆ ได้ก็สามารถใช้การแปลงลาปลาซ (Laplace transforms) คำนวณหาแรงดันขาออกได้ ไม่ว่าแรงดันขาเข้า $v_1(t)$ จะเป็นฟังก์ชันวิเคราะห์ได้ใดๆ จากการแปลงลาปลาซแรงดันขาเข้า $V_1(S)$ และผลตอบสนองรูปขึ้น $G(S)$ จะได้แรงดันขาออกในโดเมนความถี่ ดังนี้คือ

$$V_2(S) = V_1(S) \cdot S \cdot G(S)$$

แรงดันขาออกในโดเมนเวลา $v_2(t)$ หาได้จากการลาปลาซแปลงกลับ (inverse - laplace transformation) จาก $V_2(S)$ คือ

$$v_2(t) = \mathcal{L}^{-1} \{V_2(S)\}$$

โดยทั่วไปผลตอบสนองรูปขึ้น $G(t)$ ที่ได้มาจากการทดลองโดยถ่ายรูปแบบขึ้นตอบสนองจาก ออสซิลโลสโคปมักไม่สามารถวิเคราะห์เป็นรูปแบบง่ายๆ ได้ แรงดันตอบสนองขาออกต่อแรงดันขาเข้าใดๆ จึงต้องคำนวณโดยใช้ทฤษฎี superposition (บางทีเรียกว่า Duhamel's integral) {5} ดังนี้

$$v_2(t) = G(0_+) \cdot v_1(t) + \int_0^t v_1(\tau) \cdot G'(t - \tau) d\tau$$

อินทิกราลนี้อาจหาคำตอบได้โดยวิธีกราฟ หรือใช้คอมพิวเตอร์

ในทางภาคปฏิบัติการทำเวลาตอบสนองมักจะทำให้หาในรูปของผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย $g(t)$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน เป็นดังนี้

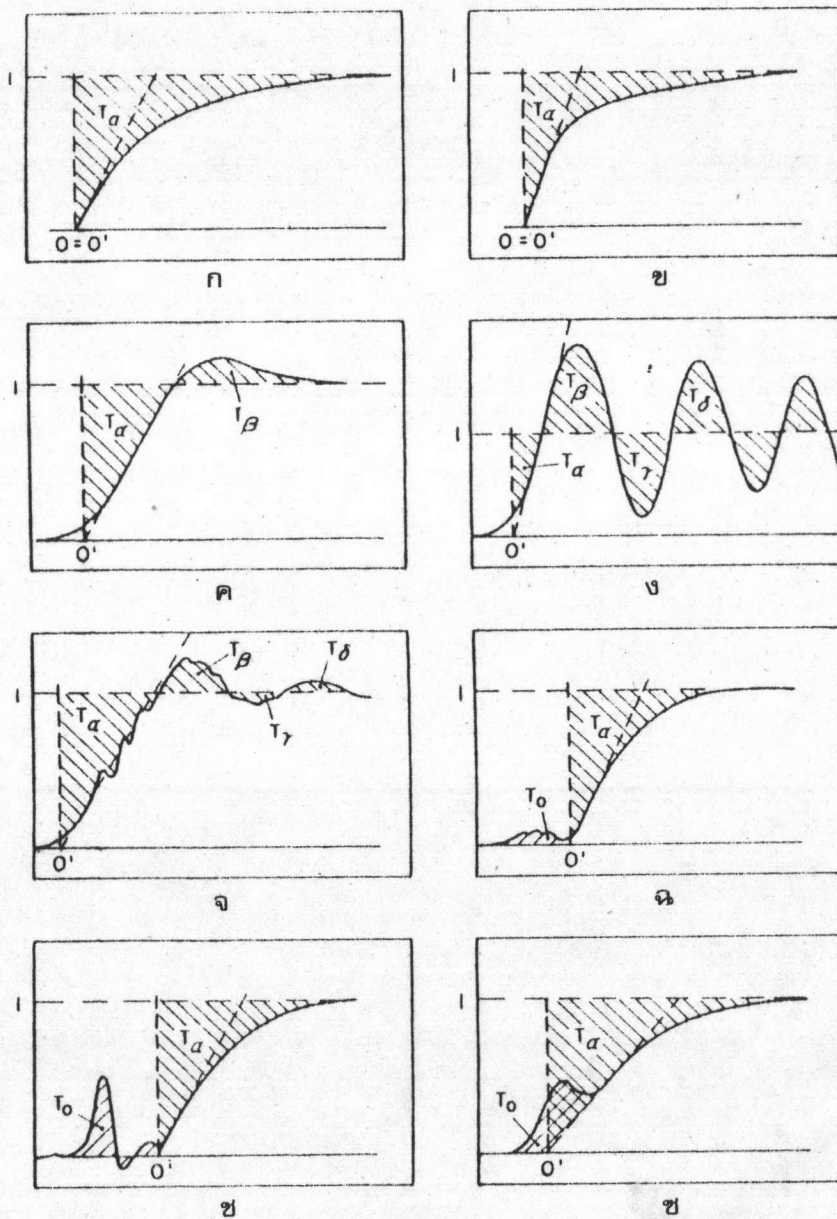
$$H(S) = S \int_0^{\infty} \frac{g(t)}{a_0} dt$$

$$a_0 H(S) = S \int_0^{\infty} g(t) dt$$

เทอม $a_0 H(S)$ นี้เรียกว่า normalized transfer function เขียนแทนด้วย $h(S)$

$$\text{เพราะฉะนั้น } g(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{S} h(S) \right\} \quad (2.2)$$

ผลตอบสนองรูปขึ้นอาจะมีแบบต่างๆ ดังภาพออสซิลโลแกรมที่แสดงในรูป 2.1 ซึ่งเป็นผลจากการทดลอง {2} ลักษณะของผลตอบสนองเหล่านี้จะบอกลักษณะสมบัติความถี่ของระบบการวัดไว้อย่างครบถ้วน คือ ความชันส่วนหน้าเป็นตัวบอกให้ทราบถึงขีดความสามารถความถี่ที่กัด ถ้ามีการแกว่งตั้งรูป ง. และ จ. จะแสดงถึงเรโซแนนซ์ของระบบวัด อัมพลิจูดของผลตอบสนองจะแสดงถึงอัตราส่วนของโวลเตจดิไวเคอร์



รูป 2.1 ผลตอบสนองรูปขึ้นแบบต่างๆ ในทางปฏิบัติ



การหาเวลาตอบสนอง

ตามมาตรฐานสากลไออีซีได้นิยามเวลาตอบสนอง T ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 และได้พิสูจน์หาความสัมพันธ์กับผลตอบสนองรูปคลื่นหนึ่งหน่วยในเชิงคณิตศาสตร์ {2} ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

$$T = \int_0^{\infty} (1 - g(t)) dt \quad (2.3)$$

นั่นก็หมายความว่าเวลาตอบสนอง T ก็คือผลรวมตามพีชคณิตของพื้นที่ระหว่างเส้นอัมปลิจูดหนึ่งหน่วยกับผลตอบสนองรูปคลื่นหนึ่งหน่วย ฉะนั้นจากออสซิลโลแกรมที่แสดงไว้ในรูป 2.1 จึงอาจหาค่าเวลาตอบสนองได้จากสมการ

$$T = T_{\alpha} + T_{\beta} + T_{\gamma} \dots\dots$$

ผลตอบสนองรูปคลื่นดังกล่าวแล้วอาจทดลองหาได้ที่ระดับแรงดันสูงหรือต่ำก็ได้ แต่โดยทั่วไปมักจะนิยมทำกันที่ระดับแรงดันต่ำ ทั้งนี้สมมุติเอาว่าองค์ประกอบของโวลเตจดีไวเตอร์และวงจรมีคุณสมบัติเชิงเส้น เมื่อใช้กับแรงดันสูงถึงค่าที่กำหนดก็ยังมีคุณสมบัติความถี่สูงอย่างเดิม ในทางปฏิบัติเมื่อเลือกตัวประกอบวงจรและออกแบบสร้างดีแล้วก็ถือว่าโวลเตจดีไวเตอร์มีลักษณะสมบัติเชิงเส้น

ในกรณีที่ลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นนั้นอาจเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ ที่สำคัญ คือ

ก) โครโน่า (Corona) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันสูงมากและทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของฉนวน ฉะนั้นการออกแบบภาคแรงสูงที่ถูกต้องควรหลีกเลี่ยงโครงสร้างที่แหลมคม หรือใส่ซิลด์เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า หรือแช่ในน้ำมันฉนวน หรือใช้แก๊สอัดความดัน

ข) ผลกระทบจากความร้อนภายในตัวประกอบวงจร เช่น ตัวความต้านทานและคะปาซิเตอร์ ตัวประกอบวงจรบางชนิดจะเปลี่ยนแปลงค่าอย่างไม่เป็นเชิงเส้นเมื่ออุณหภูมิหรือแรงดันเปลี่ยนแปลงไป

ส่วนการหาผลตอบสนองที่ระดับแรงดันสูงนั้นเหมาะที่จะใช้กับโวลเตจดีไวเตอร์ที่มีค่าแรงดันที่กำหนดสูงๆ (สูงกว่า 2 MV) ทั้งนี้เพราะโวลเตจดีไวเตอร์เหล่านี้จะมีค่าอัตราส่วนแรงดันสูง ถ้าทดสอบด้วยระดับแรงดันต่ำจะทำให้ผลตอบสนองรูปคลื่นที่ออกมามีค่าน้อยไปทำให้เกิดความยุ่งยากในการวัดให้ถูกต้อง อีกประการหนึ่งการทดสอบหาผลตอบสนองที่แรงดันสูงจะได้ผลถูกต้องใกล้เคียงกับสภาพใช้งานจริง

ความสำคัญของเวลาตอบสนอง

เวลาตอบสนองจะมีผลต่อการวัดเวลาช่วงคลื่น และอัมพลิจูดของแรงดันอิมพัลส์มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ เป็นแรงดันอิมพัลส์แบบพม่ารูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันอิมพัลส์แบบต่างๆ แสดงในรูป 2.2 เมื่อทราบเวลาตอบสนองของระบบการวัดอาจคำนวณหาความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด และความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลาของคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบต่างๆ ได้ดังนี้

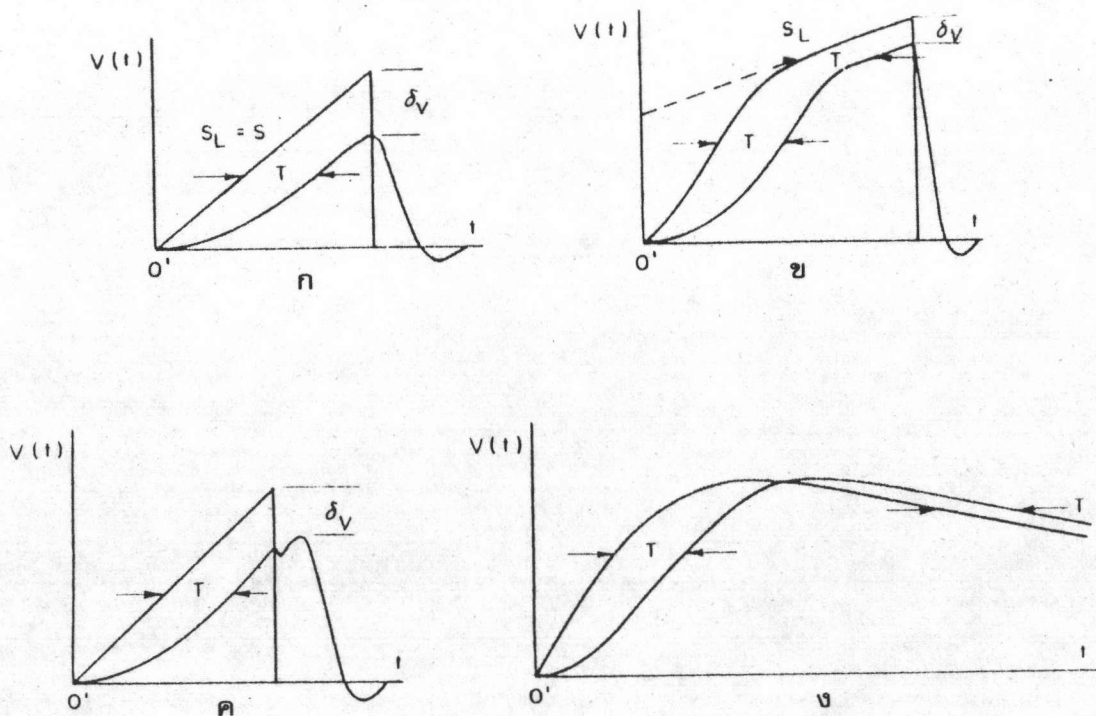
ก) ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอด δ_V คือ ความแตกต่างระหว่างค่ายอดของแรงดันที่ป้อนกับค่าที่วัดได้จากระบบการวัด คำนวณได้ดังนี้

$$\delta_V = S_L \cdot T \quad (2.4)$$

เมื่อ S_L คือ ความชันของแรงดันที่ป้อนเข้าไปก่อนเกิดการตัดคลื่น

T คือ เวลาตอบสนองของระบบการวัด

004092



รูป 2.2 ความคลาดเคลื่อนในการวัดเนื่องจากเวลาตอบสนอง

รูป ก. เป็นกรณีที่พบบ่อยในทางปฏิบัติ คือ แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น รูป ข. เมื่อเป็นแรงดันรูปคลื่นตัดหน้าคลื่นไม่เป็นเชิงเส้น รูป ค. แสดงให้เห็นกรณีที่เกิดการเพี้ยนก่อนถึงค่ายอดของแรงดันที่ต้องการวัด ซึ่งเกิดจากผลกระทบของการเพี้ยนของเวลาเริ่มต้นในผลตอบสนองรูปคลื่นหนึ่งหน่วย (ดูรูป 2.1 ข.) และยังคงแสดงให้เห็นด้วยว่าขณะที่วัดค่ายอดจะไม่ใช้เวลาเดียวกันกับขณะที่คลื่นตัด แต่จะล่าหลังอยู่เล็กน้อยซึ่งจะทำให้สมการ (2.4) ใช้ไม่ได้ อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์นี้อาจจะเลยไม่ต้องคำนึงถึงได้ถ้ามีผลกระทบไม่มาก ในกรณีที่มีผลกระทบมากก็จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงระบบการวัดใหม่ การวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ดังในรูป ง. จะหาความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอดจากสมการ (2.4) ไม่ได้เพราะค่าความชันตรงจุดนั้นจะเป็นศูนย์ อันที่จริงค่ายอดของแรงดันจะคลาดเคลื่อนไปบ้างเหมือนกันแต่จะน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

ข) ความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลา δ_t คือ ความแตกต่างระหว่างช่วงเวลาของแรงดันที่วัดได้กับช่วงเวลาของแรงดันที่ต้องการวัด จากรูป 2.2 ก. เป็นกรณีที่แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น ความคลาดเคลื่อนของช่วงเวลา คือ

$$\delta_t = T$$

แต่แรงดันแบบ ข. ค. และ ง. ไม่มีความสัมพันธ์เป็นกฎเกณฑ์ดังแบบ ก. ในกรณีรูปคลื่นเต็มดังรูป ง. นั้น ความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลาจะเกิดขึ้นทั้งที่ตอนหน้าและตอนหางของคลื่น แต่ความคลาดเคลื่อนจะมีผลกระทบมากเมื่อวัดเวลาช่วงหน้าคลื่น

2.2.2 อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์

อัตราส่วนแรงดันเป็นคุณสมบัติสำคัญยิ่งอีกประการหนึ่งของโวลเตจดีไวเดอร์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนแรงดันสูงที่ขั้วเข้าของสายนำไฟแรงสูงต่อแรงดันออกที่ปลายของเคเบิลวัดก่อนเข้าเครื่องวัด นั่นคือ

$$a = \frac{v_1}{v_2} \quad (2.5)$$

เมื่อ a คือ อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์

v_1 คือ แรงดันที่ขั้วเข้าของสายนำไฟแรงสูง

v_2 คือ แรงดันออกที่ปลายของเคเบิลวัด

โวลเตจติไวเตอร์ที่ดีต้องมีอัตราส่วนแรงดันคงที่ตลอดช่วงความถี่กว้าง และไม่ขึ้นกับระดับแรงดันตั้งแต่ค่าแรงดันต่ำจนถึงค่าแรงดันที่กำหนด

อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจติไวเตอร์แบบใดๆ อาจหาได้ด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

- ก) โดยวิธีคำนวณจากอิมพีแดนซ์ของตัวประกอบวงจรที่ทราบค่าจากการวัด
- ข) โดยการวัดแรงดันพร้อมกันทั้งทางขาเข้า v_1 และขาออก v_2 ของโวลเตจติไวเตอร์
- ค) โดยใช้วงจรบริดจ์เทียบค่าแรงดันขาออกของโวลเตจติไวเตอร์กับแรงดันขาออกของ

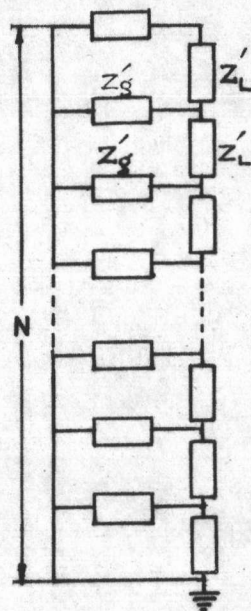
ติไวเตอร์มาตรฐานที่ปรับอัตราส่วนแรงดันได้

- ง) โดยวิธีเทียบกับระบบการวัดที่ทราบอัตราส่วนแรงดันแล้ว

ทั้ง 4 วิธีที่ใช้กันอยู่นี้ วิธี ก. เหมาะสำหรับหาอัตราส่วนแรงดันในทางทฤษฎี ซึ่งอาจแตกต่างไปจากเวลาใช้งานจริงได้ วิธี ข. และ ค. นั้นโดยมากทำกันที่ระดับแรงดันต่ำๆ (ไม่เกิน 500 - โวลท์) ซึ่งอาจเป็นแรงดันไฟตรงหรือไฟสลับแล้วแต่ว่าเป็นโวลเตจติไวเตอร์แบบใด ถ้าเป็นโวลเตจติไวเตอร์แบบความต้านทานใช้ได้ทั้งไฟตรงและไฟสลับ แต่ถ้าเป็นโวลเตจติไวเตอร์แบบคัปเปิลเตอร์ต้องใช้แรงดันไฟสลับและควรจะต้องลองหาที่ความถี่ต่างๆ อย่างน้อย 2 ค่า เช่นที่ ความถี่ไฟฟ้ากำลัง 50 Hz และที่ 1 kHz ตามคำแนะนำของมาตรฐานสากลไออีซี [2] ส่วนวิธี ง. ใช้ได้กับโวลเตจติไวเตอร์ทุกแบบโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโวลเตจติไวเตอร์แบบคัปเปิลเตอร์และแบบผสม

2.3 วงจรสมมูลย์ทั่วไปของโวลเตจติไวเตอร์

ในการศึกษาลักษณะสมบัติของโวลเตจติไวเตอร์ที่ความถี่สูงต้องอาศัยวงจรสมมูลย์ ซึ่งประกอบด้วยตัวประกอบวงจรค่าคงที่แบบกระจาย (distributed constant circuit elements) ดังแสดงในรูป 2.3



รูป 2.3 วงจรสมมูลย์ทั่วไปของโวลเตจดีไวเคอร์

เมื่อ N คือ จำนวนส่วนย่อยทั้งหมด

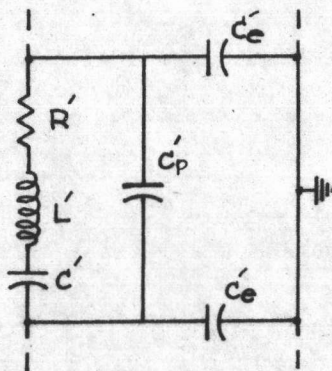
Z'_L คือ อิมพีแดนซ์อนุกรมต่อหนึ่งส่วนย่อย

Z'_g คือ อิมพีแดนซ์ขนานลงดินต่อหนึ่งส่วนย่อย

Z_L คือ อิมพีแดนซ์อนุกรมรวม โดยที่ $Z_L = NZ'_L$

Z_g คือ อิมพีแดนซ์ขนานลงดินรวม โดยที่ $Z_g = \frac{1}{N} Z'_g$

อิมพีแดนซ์แต่ละส่วนย่อย (Z'_L และ Z'_g) จะประกอบด้วย ตัวประกอบวงจรที่ต่ออนุกรมและขนานกันดังในรูป 2.4



รูป 2.4 วงจรสมมูลย์ทั่วไปของตัวประกอบวงจรของโวลเตจดีไวเคอร์แต่ละส่วนย่อย

เมื่อ R' คือ ตัวความต้านทานย่อย (ซึ่งรวมทั้งค่าความต้านทานสมมูลย์ของคะแพซิเตอร์)

C' คือ ตัวคะแพซิเตอร์ย่อย

L' คือ สเตอรินดักแตนซ์ย่อย

C'_p คือ ตัวคะแพซิเตอร์ขนานย่อย (ซึ่งรวมทั้งสเตอรคะแพซิแตนซ์ขนาน)

C'_e คือ สเตอรคะแพซิแตนซ์ลงดิน

ดังที่กล่าวแล้วข้างต้นว่าโวลเตจติไวเคอร์อาจประกอบด้วย ตัวประกอบวงจรที่เป็นตัวความต้านทานหรือคะแพซิเตอร์อย่างใดอย่างหนึ่งหรือผสมกัน ในกรณีที่เป็นโวลเตจติไวเคอร์แบบผสมตัวความต้านทานและตัวคะแพซิเตอร์อาจต่ออนุกรมหรือขนานก็ได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบโวลเตจติไวเคอร์ทุกแบบจะมีตัวประกอบหลักอย่างน้อย คือ R' และ C' อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือต่ออนุกรมกันหรือขนานกัน ในกรณีที่ต่อขนานกันนี้ C' จะอยู่ในตำแหน่ง C'_p (ดูวงจรสมมูลย์รูป 2.4) ส่วนตัวประกอบวงจรอื่นๆ ที่เกิดขึ้นเองในลักษณะสเตอริมพีแตนซ์ต้องนำมาคิดรวมอยู่ในวงจรสมมูลย์ถ้าหากต้องการความเที่ยงตรงสูง ข้อดีในการใช้วงจรสมมูลย์วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของโวลเตจติไวเคอร์จะทำให้เกิดความสะดวกและง่ายต่อการศึกษาโวลเตจติไวเคอร์แบบใดๆ คือ เพียงแต่แทนค่าตัวประกอบวงจรในวงจรสมมูลย์ทั่วไปให้เหมาะสมเท่านั้น

เมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลย์ที่กล่าวแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่ามีลักษณะทำนองเดียวกับวงจรสมมูลย์ของสายส่งพลังงานไฟฟ้าที่ปลายข้างหนึ่งต่อลงดิน จึงอาจวิเคราะห์ได้ในลักษณะเดียวกับระบบสายส่ง นั่นคือ จากวงจรสมมูลย์ในรูป 2.3 จึงเขียนทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของโวลเตจติไวเคอร์ได้ดังสมการ

$$H(S) = \frac{\sinh \frac{1}{N} \sqrt{\frac{Z_L(S)}{Z_g(S)}}}{\sinh \sqrt{\frac{Z_L(S)}{Z_g(S)}}}$$

ทำเป็น normalized transfer function โดยที่ $a_o = N$ ได้เป็น

$$h(S) = \frac{N \sinh \frac{1}{N} \sqrt{\frac{Z_L(S)}{Z_g(S)}}}{\sinh \sqrt{\frac{Z_L(S)}{Z_g(S)}}} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.2) ทำให้สามารถหาผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยทางทฤษฎีได้

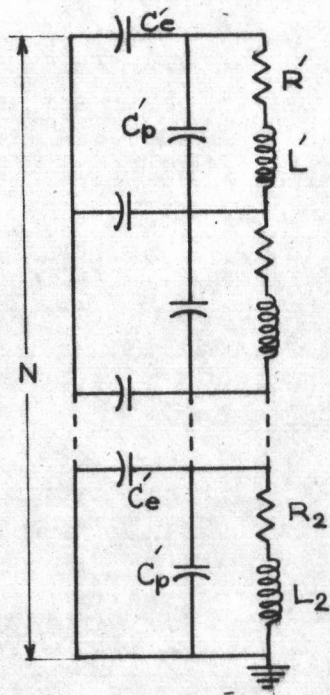
2.4 แบบต่างๆของโวลเตจดีไวเดอร์

โวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้กันในปัจจุบันมีแบบต่างๆ คือ

- ก) แบบความต้านทาน (resistor voltage divider)
- ข) แบบความต้านทานมีชีลด์ (shielded resistor voltage divider)
- ค) แบบผสม (mixed voltage divider)
- ง) แบบคัพเพซิเตอร์ (capacitor voltage divider)
- จ) แบบคัพเพซิเตอร์มีความต้านทานหน่วง (damped capacitive voltage divider)

2.4.1 โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน คือ โวลเตจดีไวเดอร์ที่อิมพีแดนซ์ทั้งภาคแรงสูงและแรงต่ำเป็นความต้านทานล้วน อย่างไรก็ตามก็มักจะออกแบบให้เป็นความต้านทานล้วน แต่ในทางปฏิบัติตามความเป็นจริงย่อมจะมีสเตรอินดักแตนซ์และสเตรคัพเพซิแตนซ์รวมอยู่ด้วย ดังนั้นจากวงจรสมมูลย์ทั่วไปในรูป 2.4 จะหุบเหลือดังในรูป 2.5



$$\begin{aligned}
 R &= NR' & R_2 &= R' \\
 L &= NL' & L_2 &= L' \\
 C_e &= NC_e' & R_1 &= (N-1)R' \\
 C_p &= \frac{1}{N} C_p'
 \end{aligned}$$

รูป 2.5 วงจรสมมูลย์ของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

ฉะนั้นจากสมการ (2.6) จึงคำนวณหา normalized transfer function ได้ว่า

$$h(s) = \frac{N \sinh \frac{1}{N} \sqrt{\frac{(R + SL) SC_e}{1 + (R + SL) SC_p}}}{\sinh \sqrt{\frac{(R + SL) SC_e}{1 + (R + SL) SC_p}}}$$

และจากสมการ (2.6) จะคำนวณหาผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยจาก $h(s)$ ได้ {3} คือ

$$g(t) = 1 + 2 \cdot \mathcal{E}^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(b_k t) + \frac{a}{b_k} \cdot \sinh(b_k t)}{1 + \frac{C_p}{C_e} k^2 \pi^2} \quad (2.7)$$

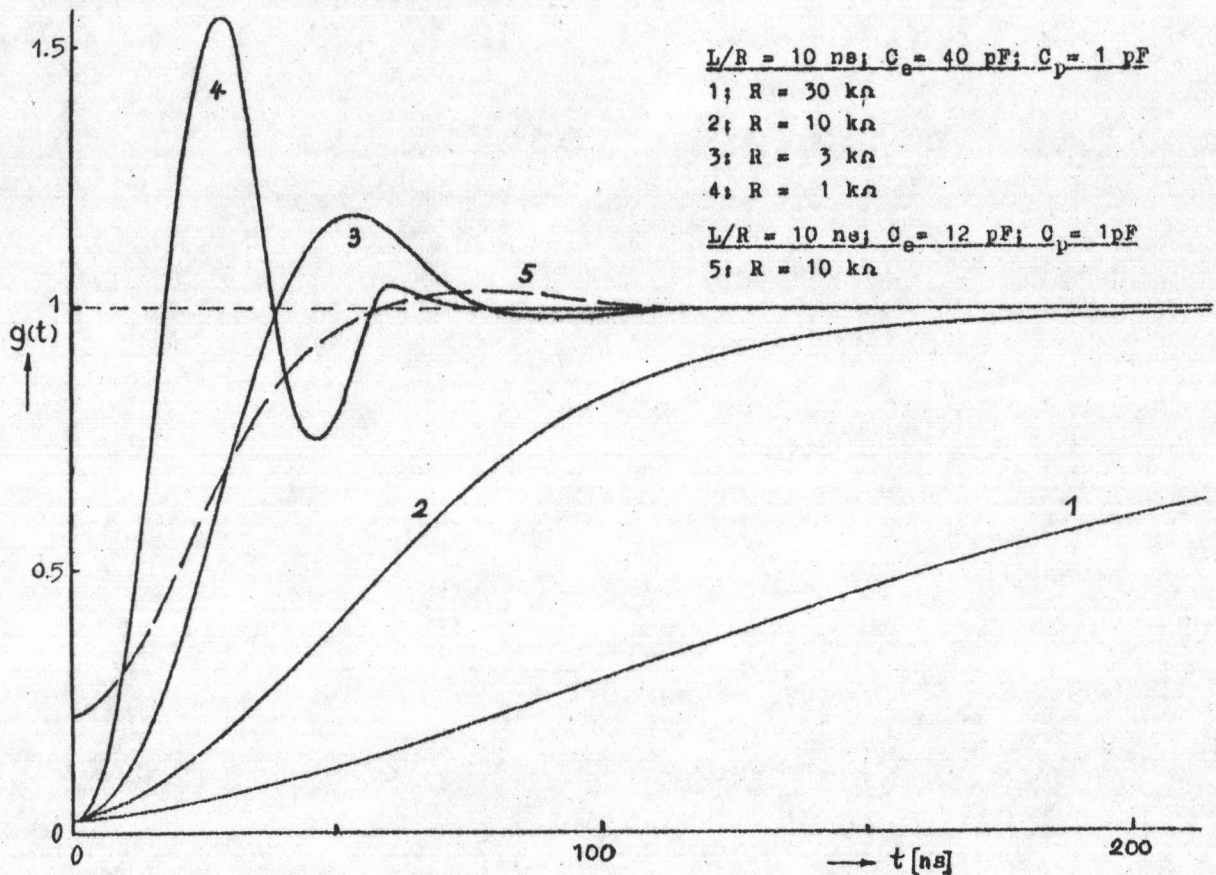
$$\text{เมื่อ } a = \frac{R}{2L}$$

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

$$k = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

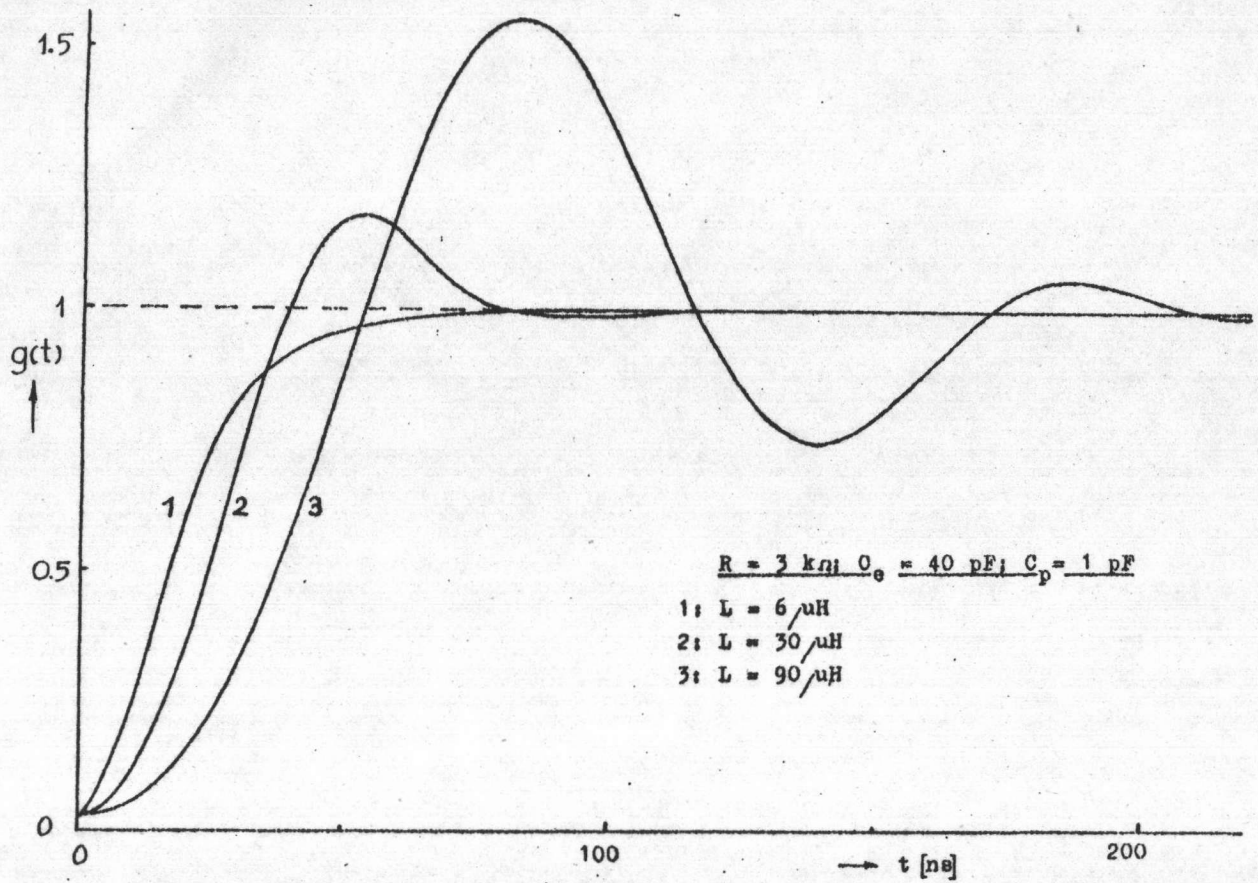
จากสมการ (2.7) นี้ เพื่อให้เห็นได้ชัดเจนถึงผลของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ R , L และ C_p ที่มีต่อผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย จึงเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งโดยให้พารามิเตอร์ตัวอื่นๆ คงที่ จะได้ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยในลักษณะต่างๆ กันดังแสดงในรูป 2.6 - 2.8 ในรูป 2.6 เป็นการเปลี่ยนค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 k Ω ถึง 30 k Ω ซึ่งจะเห็นได้ว่าความต้านทานมากๆ เวลาตอบสนองจะมากดังกราฟเส้นที่ 1 เมื่อลดค่าความต้านทานลงเวลาตอบสนองจะดีขึ้นดังกราฟเส้นที่ 2 และ 3 แต่ถ้าลดให้ความต้านทานเหลือน้อยเกินไปจะทำให้เกิดการแกว่งดังกราฟเส้นที่ 4 ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ ถ้าพิจารณาจากเส้นกราฟเหล่านี้จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยที่ต้องการควรจะมีใกล้เคียงกับกราฟเส้นที่ 3 ซึ่งเป็นผลจากค่าความต้านทาน 3 k Ω เพราะมีผลตอบสนองดี คือใกล้เคียงกับแรงดันรูปขึ้นในอุดมคติ แต่มีส่วนพุ่งเกิน (overshoot) ที่ส่วนยอด และอีกประการหนึ่งการใช้ค่าความต้านทานต่ำจะมีผลกระทบในแง่เป็นโหลดต่อเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มากเกินไป จึงต้องใช้ความต้านทานสูงขึ้น ในทางภาคปฏิบัตินิยมใช้ความต้านทานในช่วง 5 k Ω ถึง 20 k Ω {4, 5} ฉะนั้นถ้าเลือกใช้ค่าความต้านทาน 10 k Ω เวลาตอบสนองจะมากขึ้นดังกราฟเส้นที่ 2

จึงหาวิธีแก้ไขโดยวิธีอื่น เช่นการลดค่า C_e ให้น้อยลง ดังตัวอย่างกราฟเส้นที่ 5 ซึ่งได้จากการลดค่า C_e จาก 40 pF เหลือเพียง 12 pF จะพบว่าได้ผลตอบสนองใกล้เคียงกับแรงดันรูปขั้นในอุดมคติตามต้องการ



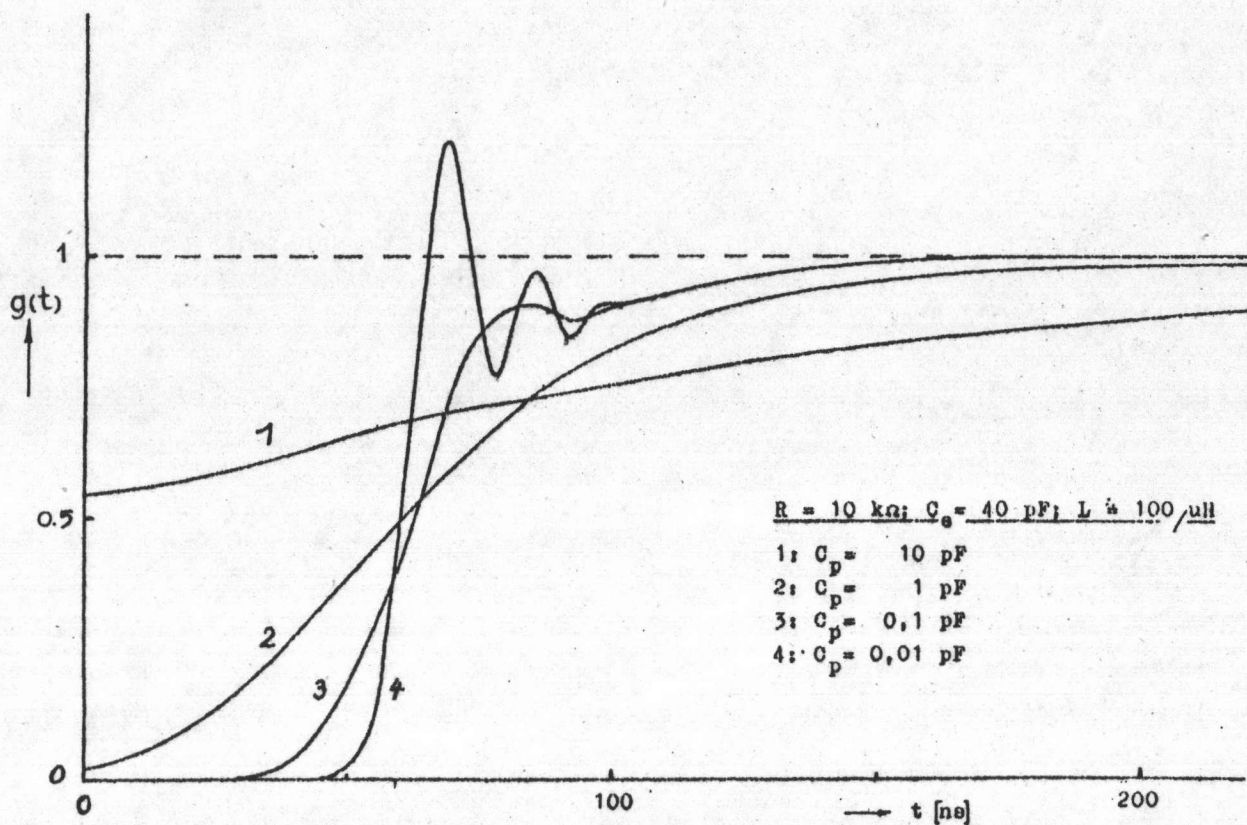
รูป 2.6 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานมีค่าความต้านทาน R เป็นพารามิเตอร์

ในรูป 2.7 เป็นกราฟตัวอย่างที่แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสเตรอินดักแตนซ์ L 3 ค่า คือ 90, 30 และ 6 μH โดยให้ $R = 3 \text{ k}\Omega$, $C_e = 40 \text{ pF}$ และ $C_p = 1 \text{ pF}$ ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์เดียวกับกราฟเส้นที่ 3 ในรูป 2.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า L พบว่าถ้า L มีค่ามากจะทำให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่งมากดังกราฟเส้นที่ 3 (รูป 2.7) ซึ่งมีค่า L เท่ากับ 90 μH เมื่อลดค่า L ให้น้อยลงเหลือ 30 μH จะพบว่าผลตอบสนองรูปขั้นดีขึ้นดังกราฟเส้นที่ 2 แต่ยังมีส่วนพุ่งเกินที่ส่วนยอดเพื่อขจัดส่วนพุ่งเกินนี้จึงลดค่า L ให้น้อยลงไปอีก คือเหลือเพียง 6 μH จะได้ผลตอบสนองดีตามที่ต้องการ



รูป 2.7 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจคิไวเตอร์แบบความต้านทานมีสเตรอินคัคแดนซ์
L เป็นพารามิเตอร์

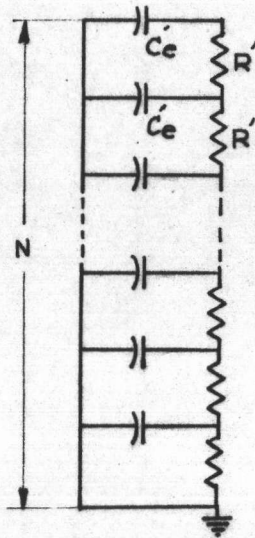
ในรูป 2.8 เป็นตัวอย่างผลตอบสนองของโวลเตจคิไวเตอร์แบบความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า
คะแบซิแตนซ์ขนาน C_p 4 ค่า คือ 0.01, 0.1, 1 และ 10 pF โดยมีค่าพารามิเตอร์เหมือนกราฟ
เส้นที่ 2 ในรูป 2.6 คือ $R = 10 \text{ k}\Omega$, $C_e = 40 \text{ pF}$ และ $L = 100 \text{ }\mu\text{H}$ ผลปรากฏว่าถ้า C_p มี
ค่าน้อยจะทำให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่ง และมี time delay ดังกราฟเส้นที่ 4 เมื่อเพิ่มค่า C_p ให้
มากขึ้นจะพบว่าผลตอบสนองดีขึ้นดังกราฟเส้นที่ 3, 2 และ 1 ตามลำดับ



รูป 2.8 ผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานมีค่ากะแปซิแตนซ์ขนาน C_p เป็นพารามิเตอร์

จากผลของการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทาน พอจะสรุปได้ว่าการที่จะให้ได้ผลตอบสนองรูปคลื่นดีนั้นควร จะออกแบบให้ค่าความต้านทานต่ำ โดยไม่มีผลกระทบในแง่เป็นโหลดต่อ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และ สเตรินต์คัตแดนซ์ควรจะมีค่าน้อยที่สุด ส่วนกะแปซิแตนซ์ขนาน C_p จะมีผลตอบสนองดีขึ้นถ้า C_p มีค่าสูง ขึ้น ด้วยเหตุนี้เองจึงมีการสร้างโวลเตจดีไวเคอร์แบบผสมขึ้น โดยใช้กะแปซิแตนซ์ C_p ต่อขนานกับความ ต้านทาน R ดังจะได้กล่าวรายละเอียดต่อไปในหัวข้อ 2.4.3

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าในการออกแบบวงจรจะให้สเตรอินคัตแดนซ์ L มีค่าต่ำสุด และโดยปกติ
 โวลเตจติไวเคอร์แบบความต้านทานที่สร้างขึ้นจะมีสเตรคแปซิแตนซ์ขนาน C_p ต่ำ ฉะนั้นจากวงจร
 สมมูลย์ในรูป 2.5 เมื่อละเลยค่า L และ C_p จะได้วงจรสมมูลย์รูปง่าย ๆ คือ เหลือพารามิเตอร์เพียง
 R และ C_e เท่านั้น ดังในรูป 2.9



$$C = \infty$$

$$L = 0$$

$$C_p = 0$$

$$Z_L = NR' = R$$

$$Z_g = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{SC_e} = \frac{1}{SC_e}$$

รูป 2.9 วงจรสมมูลย์ของโวลเตจติไวเคอร์แบบความต้านทานอย่างง่าย

ฉะนั้นจากสมการ (2.6) หา normalized transfer function ได้ดังนี้

$$h(s) = \frac{N \sinh \frac{1}{N} \sqrt{SRC_e}}{\sinh \sqrt{SRC_e}}$$

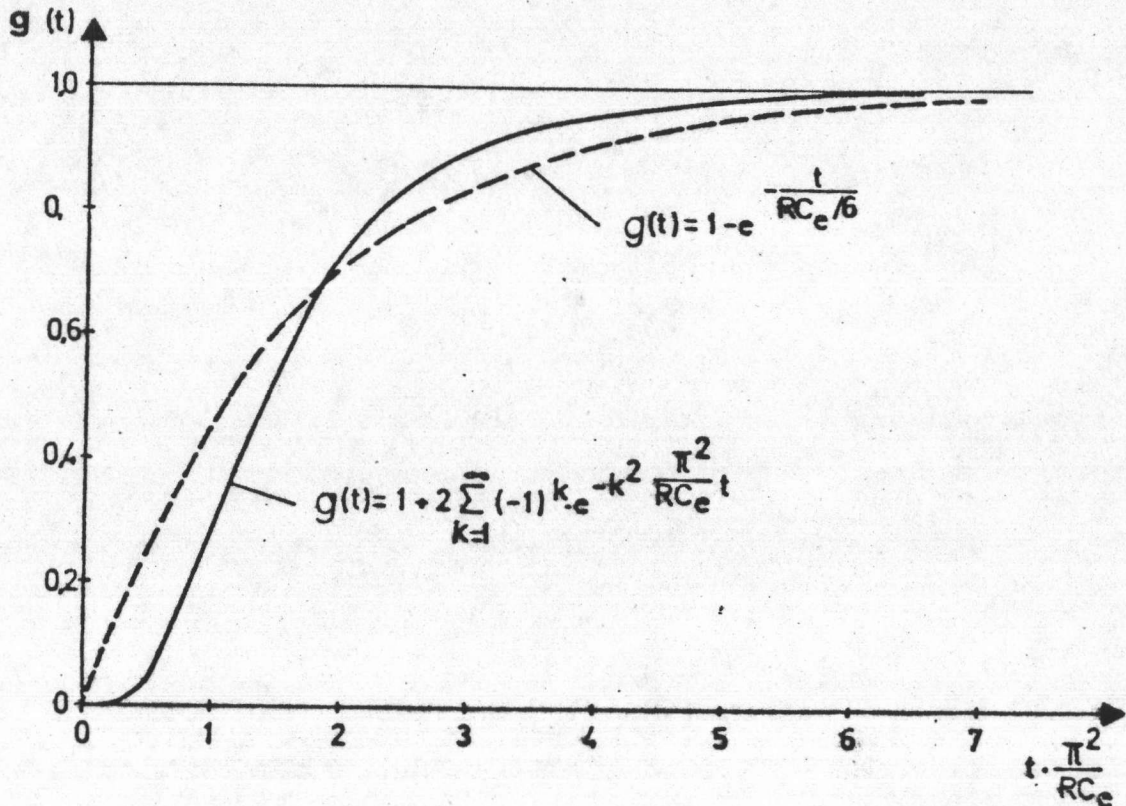
และจากสมการ (2.2) หาผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยได้ {3} คือ

$$g(t) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \exp \left(-\frac{k^2 \pi^2}{RC_e} \right) \cdot t \quad (2.8)$$

เวลาตอบสนอง ในทางทฤษฎี คำนวณได้จากสมการ (2.3) {3} ได้ผลคือ

$$T \approx \frac{RC_e}{6} \quad (2.9)$$

ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย $g(t)$ ของโวลเตจติไวเคอร์แบบความต้านทานอย่างง่าย ที่
 คำนวณได้จากสมการ (2.8) แสดงไว้ในรูป 2.10 โดยแสดงเปรียบเทียบกับกราฟของฟังก์ชันเอกซ์โป-
 เนนเชียลที่มีค่าคงที่เวลาเท่ากับ $\frac{RC_e}{6}$



รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วยของโวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทาน

ผลกระทบของสเตรเคแปซิแตนซ์ลงดิน C_e ที่มีต่อโวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานพิจารณาได้จากวงจรสมมูลย์ของโวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานอย่างง่าย รูป 2.9 เมื่อแรงดันรูปขั้นเดินทางมาถึงตอนบนของโวลเตจดีไวเคอร์จะเริ่มอัดประจุให้กับ C_e กระแสที่ผ่านจะลดลงเรื่อยๆ จากตอนบนถึงตอนล่าง ลักษณะเช่นนี้จะทำให้การกระจายแรงดันในภาวะเริ่มแรกไม่เป็นเชิงเส้น และจะยังไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้นเมื่ออัตราส่วน C_p/C_e มีค่าน้อยลง ช่วงระยะหนึ่ง C_e จะถูกอัดประจุจนเต็ม หลังจากนั้นแล้วการกระจายแรงดันจะเนื่องมาจากความต้านทานซึ่งจะเป็นเชิงเส้นตลอดความสูง ช่วงเวลาระหว่างนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของการกระจายแรงดัน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาในเรื่องนี้จึงต้องออกแบบให้การกระจายแรงดันคะแพซิตีฟ (capacitive voltage distribution) ซึ่งทำให้เกิดการกระจายแรงดันในภาวะเริ่มแรกสอดคล้องหรือเหมือนกับการกระจายแรงดันเนื่องจากความต้านทาน (resistive voltage distribution) ซึ่งทำให้เกิดการกระจายแรงดันเมื่อภาวะทรานเซียนต์ผ่านพ้นไปแล้ว ทำให้เกิดการพัฒนาร่างโวลเตจดีไวเคอร์ความต้านทานแบบซิลค์และโวลเตจดีไวเคอร์แบบผสมขนานขึ้น [4, 8]

2.4.2 โวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานมีซิลด์

ผลกระทบของสเตรคเคแปซิแตนซ์ลงดินที่มีต่อโวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานสามารถลดลงได้ โดยจัดวางโวลเตจดีไวเคอร์ให้อยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform electric field) {4, 5, 8} ในทางปฏิบัติการทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอตลอดความสูงของโวลเตจดีไวเคอร์ที่ไม่สูงนัก ทำได้โดยใช้ฉนวนโวลเตจดีไวเคอร์ที่ตอนบนของโวลเตจดีไวเคอร์ ขนาดและรูปร่างของซิลด์ฉนวนโวลเตจดีไวเคอร์ไม่มีกฎเกณฑ์ตายตัว การปรับปรุงลักษณะสมบัติของโวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานโดยวิธีนี้เป็นที่นิยมมาก แต่อย่างไรก็ตามก็จะมีปัญหาเกิดขึ้นเมื่อดีไวเคอร์มีขนาดแรงดันสูงมาก เพราะจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอรอบตัวโวลเตจดีไวเคอร์ ต้องใช้ซิลด์ที่มีขนาดทางกายภาพใหญ่มากซึ่งจะเป็นปัญหาในทางปฏิบัติ โวลเตจดีไวเคอร์ความต้านทานแบบซิลด์จึงมีขีดจำกัดในการใช้งาน ที่ทำใช้กันในปัจจุบันส่วนใหญ่มีขนาดแรงดันไม่เกิน 2 MV

Goosens และ Provoost {4} เสนอวิธีแก้ปัญหาเรื่องขนาดของซิลด์ฉนวนโวลเตจดีไวเคอร์ โดยการออกแบบสร้างสนามความต้านทานของภาคแรงสูงให้ไม่เป็นเชิงเส้นในแนวความสูง เพื่อปรับการกระจายของแรงดันเนื่องจากความต้านทานให้สอดคล้องกับการกระจายแรงดันในภาวะเริ่มแรก วิธีนี้ช่วยให้ใช้ซิลด์ฉนวนโวลเตจดีไวเคอร์ขนาดเล็กลงได้ แต่ยังคงจำเป็นต้องใช้ยูติเพื่อช่วยลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตอนบนของโวลเตจดีไวเคอร์

ผลตอบสนองรูปคลื่นโวลเตจดีไวเคอร์แบบซิลด์จะเกิดการแกว่งอย่างมาก เพราะผลกระทบของสเตรคเคแปซิแตนซ์ขนานของซิลด์ฉนวนโวลเตจดีไวเคอร์กับสเตรคเคแปซิแตนซ์ของสายนำไฟแรงสูง จึงจำเป็นต้องใช้ความต้านทานหน่วงต่อไว้ในสายนำไฟแรงสูง ความต้านทานหน่วงที่ใช้ควรมีค่าประมาณเท่ากับเลิรจิมพีแดนซ์ของสายนำไฟแรงสูง ปกติมีค่าระหว่าง 200 ถึง 500 โอห์ม ซึ่งจะมีผลกับอัตราส่วนแรงดันด้วย {4}

โวลเตจดีไวเคอร์แบบนี้จะมีลักษณะสมบัติความถี่สูงเป็นช่วงกว้าง และมีผลตอบสนองรูปคลื่นได้ต่างๆ กัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปทรงและขนาดของซิลด์ฉนวนโวลเตจดีไวเคอร์ และขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบความต้านทานในภาคแรงสูงให้เป็นเชิงเส้นมากน้อยเพียงใด เมื่อความสูงของโวลเตจดีไวเคอร์มากขึ้นอาจใช้ซิลด์ฉนวนโวลเตจดีไวเคอร์หลายอันติดตั้งกระจายตามความสูงแต่ต้องไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดติดกับความต้านทานภาคแรงสูง โดยทั่วไปโวลเตจดีไวเคอร์ขนาดต่ำกว่า 500 กิโลโวลต์ ใช้ซิลด์ฉนวนโวลเตจดีไวเคอร์อันเดียวติดตั้งตอนบนก็เพียงพอ {5}

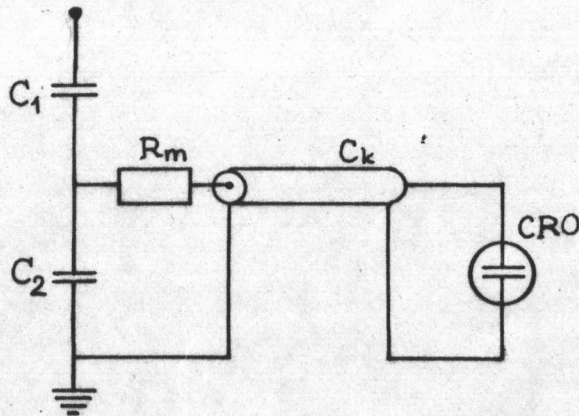


2.4.3 โวลเตจดีไวเคอร์แบบผสม

ในหัวข้อ 2.4.1 ได้แสดงให้เห็นอย่างแจ่มชัดแล้วว่าถ้าการใส่คะแพซิแตนซ์ขนาน C_p เข้าไปนั้นทำให้ผลตอบสนองดีขึ้น ทั้งนี้เพราะการกระจายแรงดันในภาวะเริ่มแรกจะเป็นเชิงเส้นมากขึ้น เมื่ออัตราส่วน C_p/C_e มีค่าเพิ่มขึ้น โวลเตจดีไวเคอร์แบบนี้จะทำงานอย่างโวลเตจดีไวเคอร์แบบคะแพซิเตอร์เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันสูง และจะทำงานอย่างโวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่ำลง [8] แต่อย่างไรก็ดีการเพิ่มคะแพซิแตนซ์ขนาน C_p มีขีดจำกัดเพราะถ้าเพิ่มมากเกินไปจะกลายเป็นโหลดแบบคะแพซิตีฟของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ จากผลการทดลองของ Elsner [4] ในการปรับปรุงผลตอบสนองให้ดีขึ้นตามความต้องการควรใช้ C_p ประมาณ 3 เท่าของ C_e สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกประการหนึ่งในการใช้ C_p ต่อขนานเข้าไป คือ ต้องทำให้ค่าคงที่เวลาเท่ากัน นั่นคือ ผลคูณของค่าความต้านทานกับคะแพซิแตนซ์ขนานของทั้งสองภาคต้องเท่ากันจึงจะให้ลักษณะสมบัติความถี่สูงดีที่สุด [4, 5]

2.4.4 โวลเตจดีไวเคอร์แบบคะแพซิเตอร์

โวลเตจดีไวเคอร์แบบคะแพซิเตอร์ คือ โวลเตจดีไวเคอร์ที่มีอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำเป็นตัวคะแพซิเตอร์ คะแพซิเตอร์ภาคแรงสูงอาจจะเป็นคะแพซิเตอร์แบบอัดก๊าซ (compressed gas capacitor) หรือเป็นคะแพซิเตอร์ย่อยประกอบกัน เช่น คะแพซิเตอร์แบบกระดาษชุบน้ำมัน (impregnated paper capacitor) ส่วนภาคแรงต่ำมักจะใช้คะแพซิเตอร์หลายๆ ตัวต่อขนานกันอยู่ที่ส่วนล่างของภาคแรงสูง ดังในรูป 2.11



รูป 2.11 วงจรของโวลเตจดีไวเคอร์แบบคะแพซิเตอร์

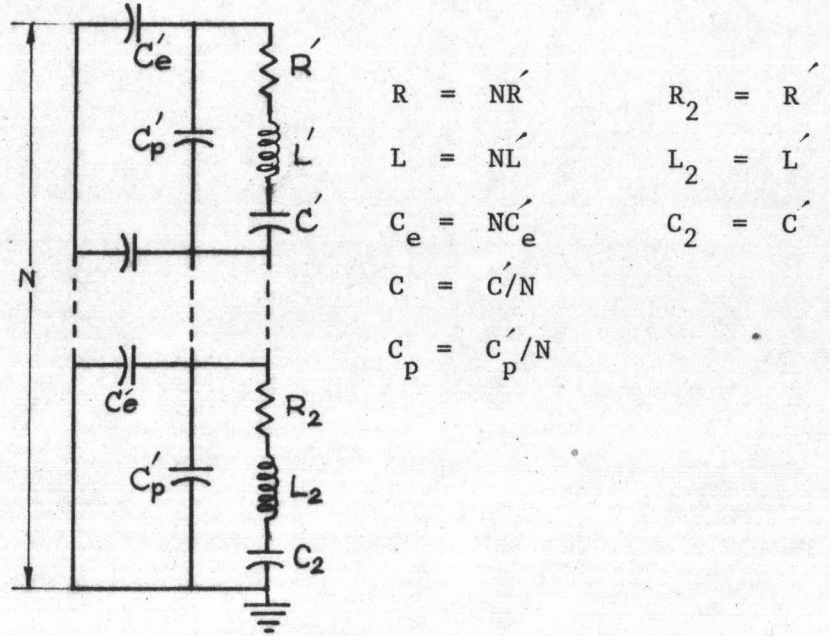
C_1 คือ คะแพซิเตอร์ภาคแรงสูง

C_k คือ คะแพซิแตนซ์ของสายเคเบิลวัด

C_2 คือ คะแพซิเตอร์ภาคแรงต่ำ

R_m คือ ความต้านทานแมทซิ่ง

การวิเคราะห์หาผลตอบสนองของโวลเตจติไวเตอร์แบบคัพเพซิเตอร์ ก็อาจหาได้ในทำนองเดียวกันกับโวลเตจติไวเตอร์แบบความต้านทานโดยใช้วงจรสมมูลย์ ดังแสดงในรูป 2.12 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์หลัก คือ C' มีสเตร L' ; R' อนุกรมอยู่ และ C'_e , C'_p



รูป 2.12 วงจรสมมูลย์ของโวลเตจติไวเตอร์แบบคัพเพซิเตอร์

ดังนั้นผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยจะเขียนได้ด้วยสมการต่อไปนี้ {3}

$$g(t) = 1 - \frac{C_e}{6(C + C_p)} + 2 \epsilon^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(b_k t) + \frac{a}{b_k} \sinh(b_k t)}{A \cdot B} \quad (2.10)$$

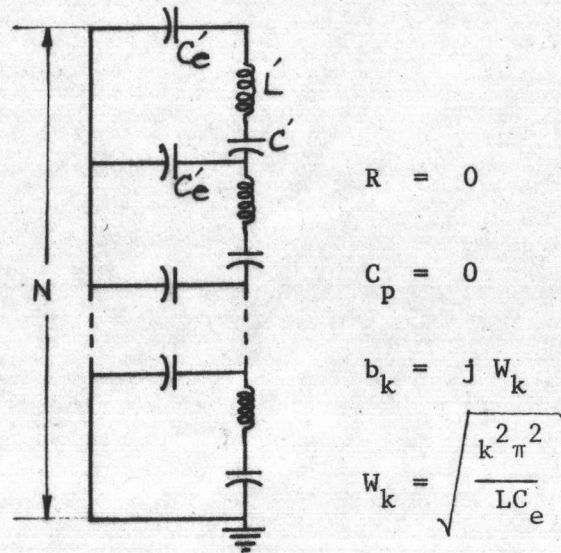
$$\text{เมื่อ } A = 1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{C k^2 \pi^2}$$

$$B = 1 + \frac{C_p k^2 \pi^2}{C_e}$$

$$a = \frac{R}{2L}$$

$$b_k = \sqrt{a^2 - \frac{k^2 \pi^2 A}{LC_e B}}$$

ถ้ากำหนดว่าตัวกะแปซิเตอร์ที่เลือกใช้มีความสูญเสียภายในน้อย คือ $R = 0$ และละเลยค่า C_p จะได้วงจรสมมูล ดังแสดงในรูป 2.13 ซึ่งเรียกโวลเตจดีไวเคอร์แบบนี้ว่า โวลเตจดีไวเคอร์แบบกะแปซิเตอร์ล้วน



รูป 2.13 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเคอร์แบบกะแปซิเตอร์ล้วน

ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วยของโวลเตจดีไวเคอร์แบบกะแปซิเตอร์ล้วน {3} คือ

$$g(t) = 1 - \frac{C_e}{6C} + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(W_k t)}{1 + \frac{C_e}{C k^2 \pi^2}}$$

จากผลตอบสนองหนึ่งหน่วยแสดงว่าเกิดการแกว่งอย่างมาก ด้วยความถี่อันดับแรกกำหนด

โดย $k = 1$ แทนค่าใน W_k

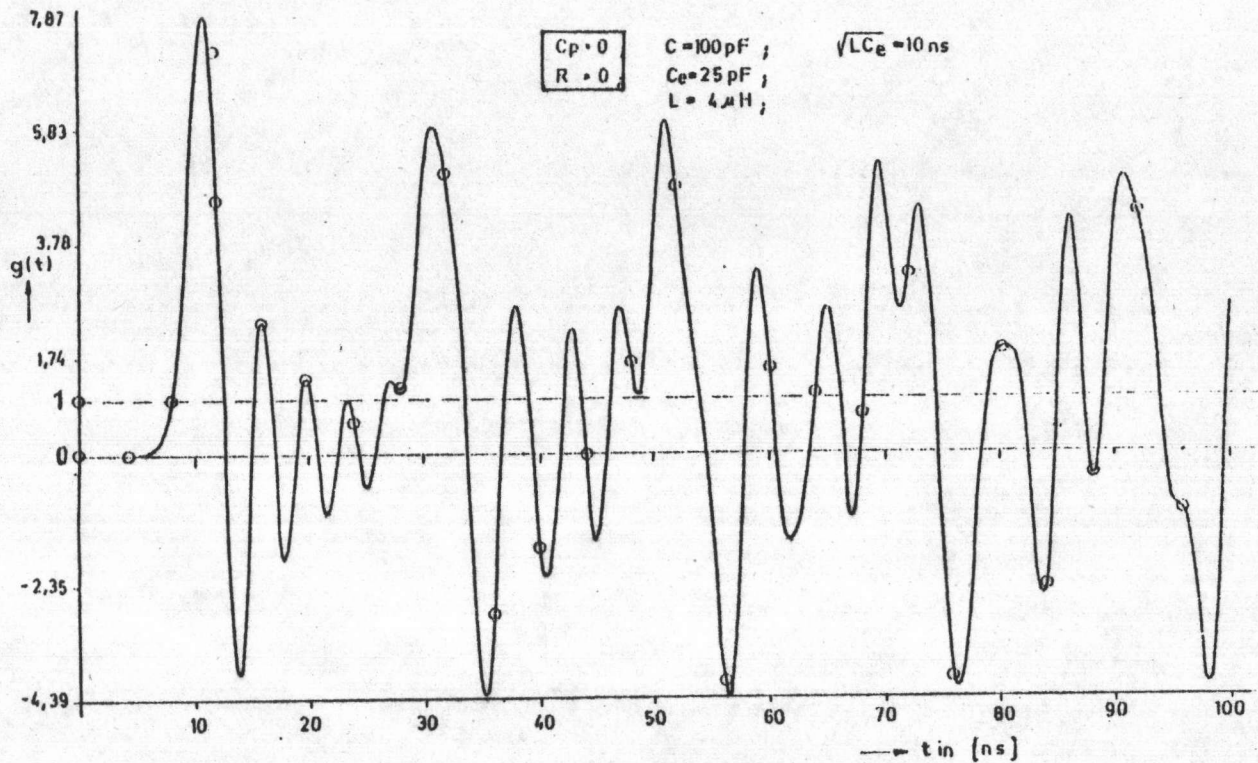
$$W_1 = 2\pi f_1 = \sqrt{\frac{\pi^2 + C_e/C}{LC_e}}$$

$$\approx \frac{\pi}{\sqrt{LC_e}} \quad \text{เพราะ } \frac{C_e}{C} \ll \pi^2$$

$$f_1 = \frac{1}{2\sqrt{LC_e}}$$

$\sqrt{LC_e}$ นี้เรียกว่า เวลาจร (travel time) ของโวลเตจดีไวเคอร์

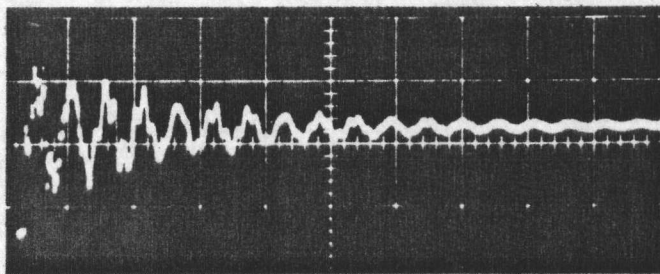
เมื่อแทนค่าตัวประกอบวงจรที่ใช้ในทางปฏิบัติคำนวณหาผลตอบสนองรูปคลื่นหนึ่งหน่วย ผลที่ได้ {3}
แสดงด้วยกราฟดังในรูป 2.14



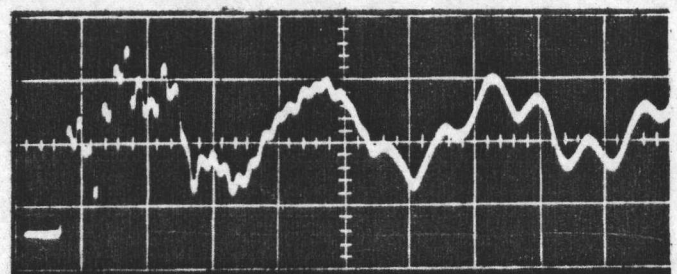
รูป 2.14 ผลตอบสนองรูปคลื่นหนึ่งหน่วยของโวลเตจดีไวเคอร์แบบกะแปซิเตอร์ล้วน

ตัวอย่างผลการทดลองหาผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเคอร์แบบกะแปซิเตอร์ล้วน

ขนาด 3 MV C = 450 pF {10} แสดงไว้ในรูป 2.15



สเกลแกนเวลา 1 μ s/div.

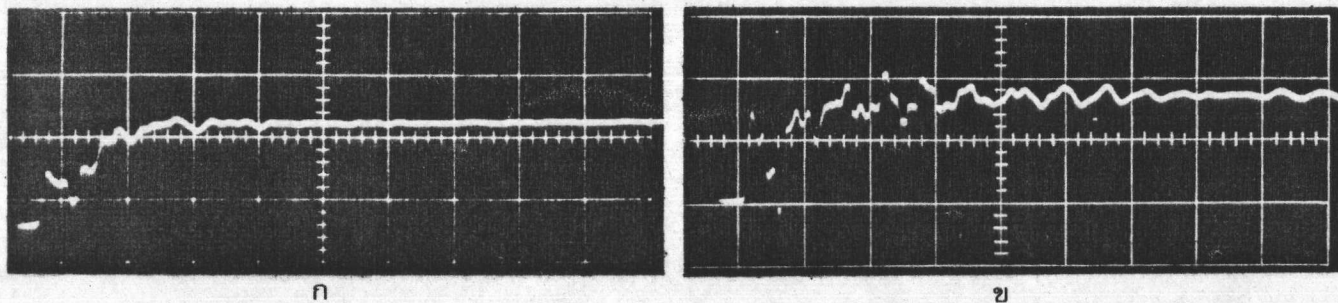


สเกลแกนเวลา 200 ns/div.

รูป 2.15 ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเคอร์แบบกะแปซิเตอร์ล้วน 3 MV C = 450 pF

โวลเตจดีไวเคอร์แบบคัพเพซิเตอร์เหมาะสมที่จะใช้วัดไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับความถี่กำลัง และแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตชิ่ง แต่จะไม่เหมาะสำหรับวัดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เพราะผลตอบสนองรูปคลื่นเกิดการแกว่งอย่างมากเนื่องจากผลกระทบของสเตรอินดักแตนซ์ของสายนำไฟแรงสูง และส่วนอื่นๆ ซึ่งขจัดออกไปได้ยาก นอกจากนั้นคัพเพซิเตอร์ของสายเคเบิลวัด C_k จะมีผลกระทบต่ออัตราส่วนแรงดันด้วย {3, 4, 5}

การแก้ปัญหาการแกว่งในผลตอบสนองรูปคลื่นหนึ่งหน่วยของโวลเตจดีไวเคอร์แบบคัพเพซิเตอร์-ล้วน ทำได้โดยเพิ่มความต้านทานหน่วงในวงจร วิธีง่ายๆ ที่ใช้กัน คือ การใส่ตัวต้านทานค่าพอเหมาะไว้ตอนบนของโวลเตจดีไวเคอร์ ผลปรากฏว่าจะหน่วงการแกว่งได้ดีพอสมควร โวลเตจดีไวเคอร์แบบนี้เรียกว่าโวลเตจดีไวเคอร์แบบคัพเพซิเตอร์หน่วงในสายนำ (Capacitor voltage divider with damped lead-in) ผลตอบสนองรูปคลื่นหนึ่งหน่วยจากการทดลอง {10} แสดงในรูป 2.16

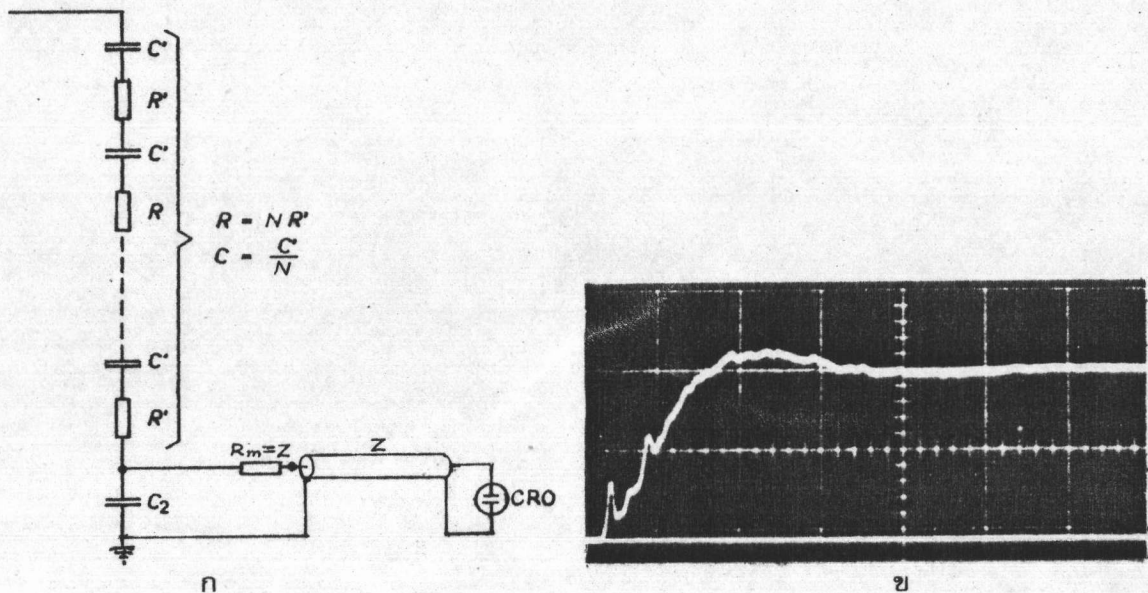


รูป 2.16 ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเคอร์แบบคัพเพซิเตอร์ขนาด 3 MV มีตัวต้านทานหน่วงในสายนำไฟแรงสูง สเกลแกนเวลา 200 ns/div.

รูป ก. ตัวต้านทานหน่วง $R_d = 270 \Omega$ อยู่ที่ขาเข้าของสายนำไฟแรงสูง

รูป ข. ตัวต้านทานหน่วง $R_d = 270 \Omega$ อยู่ที่ปลายออกของสายนำไฟแรงสูง

การแก้ปัญหานี้ไม่สามารถจัดการสะท้อนของคลื่นภายในตัวโวลเตจดีไวเคอร์ได้ K. Feser จึงได้คิดแปลงเพิ่มเติมต่อไปอีกโดยใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับคัพเพซิเตอร์กระจายอยู่ตลอดภาคแรงสูง ทำให้ได้โวลเตจดีไวเคอร์ที่มีผลตอบสนองรูปคลื่นดีขึ้นอีก โวลเตจดีไวเคอร์แบบนี้เรียกว่าโวลเตจดีไวเคอร์แบบคัพเพซิเตอร์ความต้านทานหน่วงกระจายในภาคแรงสูง (Capacitive voltage divider with damping resistors distributed on the primary side) โครงสร้างของโวลเตจดีไวเคอร์และผลตอบสนองรูปคลื่นหนึ่งหน่วยจากการทดลอง {10} แสดงในรูป 2.17



รูป 2.17 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบคะแปซิเตอร์ความต้านทานท่วงกระจายในภาคแรงสูง

$$C = 900 \text{ pF} \quad R = 152 \text{ } \Omega$$

ก. โครงสร้างของโวลต์เตจติไวเตอร์

ข. ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย 200 nS/div.

2.4.5 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานท่วง

โวลต์เตจติไวเตอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานท่วง คือ โวลต์เตจติไวเตอร์ผสมอนุกรม ซึ่งภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำประกอบด้วยความต้านทานและคะแปซิเตอร์ต่ออนุกรมกัน ความต้านทานที่ต่ออนุกรมไว้นั้นจะเป็นตัวท่วงการแก่วงภายในตัวโวลต์เตจติไวเตอร์เหมือนดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อ

2.4.4 วงจรสมมูลย์ของโวลต์เตจติไวเตอร์แบบนี้เหมือนวงจรสมมูลย์ของโวลต์เตจติไวเตอร์แบบคะแปซิเตอร์ดังแสดงในรูป 2.12 W. Zaengl {3} ศึกษาทฤษฎีและทดลองเกี่ยวกับโวลต์เตจติไวเตอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานท่วงนี้ และสรุปว่าถ้าเลือกใช้ค่าความต้านทานอย่างเหมาะสมจะได้ผลตอบสนองดีมาก แม้ว่าจะจะเป็นโวลต์เตจติไวเตอร์ที่มีขนาดแรงดันสูงมากก็ตาม การเลือกค่าความต้านทานพิจารณาจากผลตอบสนองรูปขึ้นสมการที่ (2.10) argument ของไฮเปอร์โบลิกฟังก์ชันต้องไม่เป็นศูนย์หรือจำนวนจินตภาพ ดังนั้น

นั่นคือ

$$a^2 > \frac{k^2 \pi^2 A}{LC_e \cdot B}$$

$$\frac{R}{2L} > \frac{k\pi}{\sqrt{LC_e}} \sqrt{\frac{1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{C k^2 \pi^2}}{1 + \frac{C_p}{C_e} k^2 \pi^2}}$$

เมื่อ $k = 1$, $C_p \ll C$, $C_e < \pi^2 C$

จะประมาณได้ว่า

$$R > 2\pi \sqrt{\frac{L}{C_e}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{C_p}{C_e} \pi^2}}$$

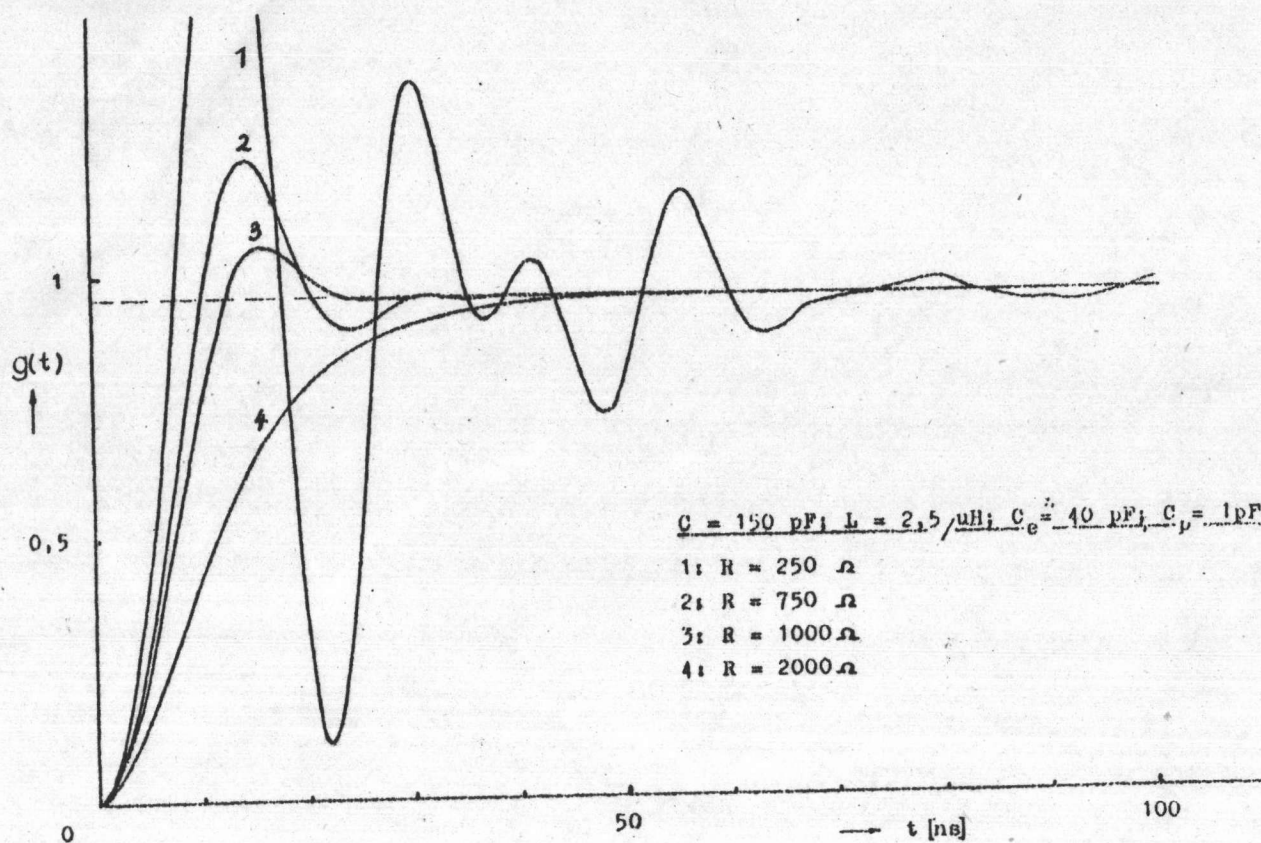
จากประสบการณ์ในทางปฏิบัติ สรุปได้ว่า

$$\frac{1}{1 + \frac{C_p}{C_e} \pi^2} \text{ มีค่าประมาณ } 0.7 \dots\dots 0.8$$

ความต้านทานที่เหมาะสม $R_{opt.}$ ควรมีค่า ดังนี้

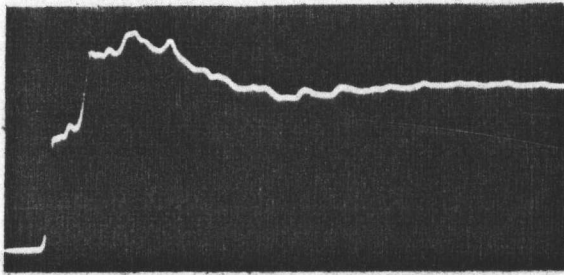
$$R_{opt.} \approx (4 \dots\dots 6) \sqrt{\frac{L}{C_e}}$$

ในรูป 2.18 เป็นตัวอย่างผลตอบสนองรูปคลื่นที่คำนวณได้จากสมการ (2.10) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน R 4 ค่า คือ 250, 750, 1000 และ 2000 Ω โดยมี $C = 150$ pF, $L = 2.5$ μ H, $C_e = 40$ pF, $C_p = 1$ pF จากกราฟในรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อ R มากขึ้นการแกว่งจะลดลง ผลตอบสนองรูปคลื่นหนึ่งหน่วยที่ต้องการคือ กราฟเส้นที่ 3 เมื่อใช้ค่าความต้านทาน 1000 Ω ซึ่งเป็นค่าอยู่ในช่วงความต้านทานที่เหมาะสม $R_{opt.}$ คือ เท่ากับ $4 \sqrt{\frac{L}{C_e}}$



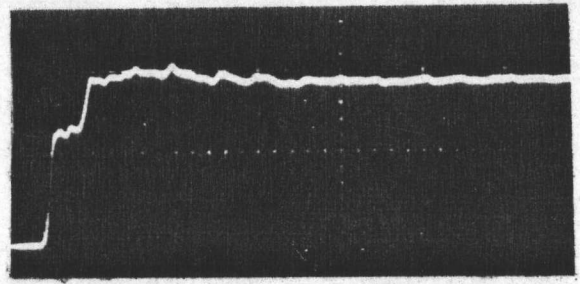
รูป 2.18 ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยของโวลเตจดีไวเตอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหนึ่ง

ตัวอย่างผลการทดลองหาผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเตอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหนึ่ง ขนาด 1.6 MV , $C = 900 \text{ pF}$, $R = 152 \Omega$ แสดงไว้ในรูป 2.19



สเกลเวลา 200 nS/div.

ก



สเกลเวลา 200 nS/div.

ข

รูป 2.19 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเคอร์แบบคะแปซิเตอร์ถูกหน่วง ขนาด 1.6 MV

$$C = 900 \text{ pF}, R = 152 \text{ } \Omega$$

ก. ไม่มีความต้านทานหน่วงในสายนำไฟแรงสูง

ข. มีความต้านทานหน่วง $R_d = 100 \text{ } \Omega$ ที่ขาเข้าของสายนำไฟแรงสูง