บทที่ 3

การออกแบบและสร้างโวลเตจดิไวเดอร์

3.1 บทนำ

ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2 แล้วว่า โวลเตจดิไวเดอร์ใช้วัดแรงดันอิมพัลส์นั้นมีหลายแบบ เมื่อพิจารณาถึงแบบที่เหมาะสมที่จะพัฒนาขึ้นใช้ในห้องทดลองต่างๆ เพื่อใช้วัดแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าขนาด 300 กิโลโวลท์ โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานจะมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากว่า

ก) หลักการของโวลเตจดิไวเดอร์แบบนี้เป็นแบบง่ายๆ เหมาะสมต่อการริ เริ่มสร้างขึ้นเอง การวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นก็ทำได้ง่ายกว่า และเป็นพื้นฐานในการพัฒนาขั้นต่อไปได้อย่างดี

ข) สามารถออกแบบให้มีผลตอบสนองดีตามต้องการได้ง่าย โดยเพียงแต่เลือกใช้ค่าความต้านทานและออกแบบโครงสร้างให้เหมาะสม การปรับปรุงผลตอบสนองให้ดีขึ้นอาจทำได้โดยเพียงแต่เพิ่มชีลด์อีเลกโตรดประกอบที่ตอนบนของโวลเตจดิไวเดอร์

ค) องค์ประกอบวงจรหาได้ง่ายกว่า ราคาถูกกว่าแบบที่ต้องใช้คะแปซิเตอร์ เพราะว่าคะแปซิเตอร์ที่มีคุณภาพดีเหมาะกับการใช้วัดแรงดันสูง ความถี่สูง ค่าความสูญเสียเปล่าน้อยและสเตร-อินดัคแตนซ์ต่ำๆ ราคาจะแพงมาก

ง) ผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่มีต่ออัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานน้อยกว่าแบบอื่นๆ ทำให้ไม่มีปัญหาซับซ้อนในทางปฏิบัติมากนัก

ดังนั้นจึงออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานสำหรับใช้วัดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 300 กิโลโวลท์ เพื่อพัฒนาขึ้นใช้ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ ต่อไป

ดังได้กล่าวแล้วว่าโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานประกอบด้วย ตัวความต้านทานสองชุด คือ ภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำต่ออนุกรมกัน ภาคแรงสูงต้องรับแรงดันแทบทั้งหมดที่ป้อนให้แก่โวลเตจดิ-ไวเดอร์ ฉะนั้นในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า คือ จะต้องไม่เกิดเบรคดาวน์ (breakdown) หรือเกิดการวาบไฟตามผิว (flashover) นอกจากนั้นตัวความต้านทานภาคแรงสูงต้องมีลักษณะสมบัติทางความร้อนดีเพียงพอ คือ สามารถทนต่อพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดัน

อิมพัลส์ได้โดยไม่ชำรุดเสียหาย และอุณหภูมิเพิ่มของตัวความต้านทานต้องอยู่ในขอบเขตที่ไม่ทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในภาวะทรานเซี้ยนสูงเกินไป เพื่อรักษาอัตราส่วนแรงดันให้คงที่ ภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์มีหน้าที่แบ่งแรงดันส่วนน้อยไปเข้าเครื่องวัดจึงไม่มีปัญหาในเรื่องการฉนวนและลักษณะสมบัติทางความร้อนมากนัก แต่อย่างไรก็ดีต้องขึ้นอยู่กับระดับของแรงดันออกที่ต้องการให้เหมาะสมกับเครื่องวัดที่ใช้ด้วย นอกจากการออกแบบสร้างความต้านทานทั้งสองภาคแล้วในที่นี้ยังพิจารณาการออกแบบสร้างชีลด์อีเลกโตรดเพื่อปรับปรุงผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นด้วย รายละเอียดได้กล่าวเป็นลำดับขั้น คือ

การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง

การออกแบบและสร้างภาคแรงต่ำ

การออกแบบและสร้างชีลด์อีเลกโตรด

3.2 การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง

การออกแบบภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน พิจารณาเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ก) การฉนวน

ข) พลังงานสูญเสียในตัวความต้านทาน

ค) การเลือกความต้านทาน

3.2.1 การฉนวน

ความต้านทานภาคแรงสูงต้องบรรจุอยู่ในท่อฉนวน ซึ่งมีระยะการฉนวนเพียงพอไม่ให้เกิดการวาบไฟตามผิวเมื่อแรงดันสูงถึงค่ากำหนด ระยะการฉนวนจะเป็นตัวกำหนดความสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวของท่อฉนวน จากเทคนิคไฟฟ้าแรงสูงทั่วๆ ไปกำหนดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิว อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในอาคารที่ภาวะความชื้นน้อยไม่ควรเกิน 4 กิโลโวลท์ต่อเซนติเมตรในอากาศ จึงจะไม่เสี่ยงต่อการวาบไฟตามผิว {7} การกำหนดระยะการฉนวนจึงถือค่านี้เป็นเกณฑ์ เมื่อออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 300 กิโลโวลท์ ระยะการฉนวนจึงต้องไม่ต่ำกว่า 75 เซนติเมตร และถ้าคำนึงถึงภาวะที่ความชื้นสูงขึ้นควรใช้ระยะการฉนวนเพิ่มขึ้น แต่ไม่ควรเผื่อไว้มากเกินไปเพราะจะทำให้สเตรคะแปซิแตนซ์มากขึ้นโดยไม่จำเป็น ในที่นี้เลือกใช้ระยะการ

ฉนวน 100 เซนติเมตร ในการออกแบบ ท่อฉนวนที่ใช้กันเป็นส่วนใหญ่ในต่างประเทศ คือ ท่อเบกกะไลต์ (bakelite paper cylinder) เพราะมีคุณสมบัติเหมาะสม คือ มีความแข็งแรงทางกลและเป็นฉนวนไฟฟ้าอย่างดี แต่การออกแบบเพื่อพัฒนาขึ้นใช้เองในที่นี้อาจใช้ท่อพีวีซีอย่างหนาที่ผลิตภายในประเทศไทยแทนได้ เพราะคุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อพีวีซีเป็นฉนวนอย่างดี และความยาวท่อที่ใช้ยังไม่มากนัก เมื่อเลือกใช้ท่ออย่างหนาก็สามารถรับแรงทางกลได้อย่างดีด้วย ท่อที่ใช้ต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่พอสมควร เพื่อให้ได้ว่าเมื่อบรรจุความต้านทานภาคแรงสูงแล้วยังมีช่องว่างรอบตัวความต้านทานนั้นมากพอสำหรับการหมุนเวียนของน้ำมันฉนวน ซึ่งใช้เป็นตัวระบายความร้อนออกจากตัวความต้านทาน ในที่นี้เลือกใช้ท่อพีวีซีอย่างหนาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 12 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร เป็นท่อฉนวนบรรจุความต้านทานภาคแรงสูงซึ่งมีฝาโลหะปิดปลายท่อทั้งสองด้านอย่างสนิท สามารถบรรจุน้ำมันฉนวนโดยไม่รั่วซึม ดังภาพถ่ายในรูป 3.1 ผิวนอกของท่อพีวีซีฉาบด้วยสีฉนวนเพื่อช่วยให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าดีขึ้น

รูป 3.1 ท่อฉนวนพีวีซีสำหรับยึดและบรรจุความต้านทานภาคแรงสูง

น้ำมันฉนวนนอกจากมีหน้าที่ระบายความร้อนดังกล่าวแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างขั้นของความต้านทานภาคแรงสูง และช่วยลดการเกิดโคโรน่าในส่วนที่จมอยู่ในน้ำมันฉนวนนั้นด้วย {8} ในที่นี้ใช้น้ำมันหม้อแปลงที่มีคุณภาพดีและมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength) เท่ากับ 30 กิโลโวลท์* เป็นฉนวน

3.2.2 พลังงานสูญเสียในตัวความต้านทาน

เมื่อตัวความต้านทาน R ของโวลเตจดิไวเดอร์ได้รับแรงดันอิมพัลส์ v(t) จะเกิดพลังงานทางไฟฟ้าสูญเสียขึ้นในตัวความต้านทานนั้น คำนวณได้ดังนี้

$$W_{el} = \int_0^\infty \frac{v^2(t)}{R}\, dt \qquad (3.1)$$

W_{el} มีหน่วยเป็น จูล (Joule) ถ้า v(t) มีหน่วยเป็น โวลต์ และ R มีหน่วยเป็น โอห์ม

โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีค่า R คงที่ ดังนั้นจากสมการ (3.1) เขียนเสียใหม่ได้ว่า

$$W_{el} = \frac{1}{R} \int_0^\infty v^2(t)\, dt$$

กำหนดให้ $W_v = \int_0^\infty v^2(t)\, dt \qquad (3.2)$

W_v จะมีมิติเป็น V^2S หรือ $(kV)^2S$

แทนค่า W_v ในสมการ (3.1)

$$W_{el} = \frac{W_v}{R} \qquad (3.3)$$

พลังงานทางไฟฟ้าที่สูญเสียในความต้านทาน W_{el} นี้ถือได้ว่า เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน W_{th} ในตัวความต้านทานทั้งหมด {3,4}

---

* เป็นค่าระยะ 2.5 มิลลิเมตร ตามที่กำหนดในมาตรฐานไออีซี {16}

ดังนั้น $$W_{th} = W_{el} \quad (3.4)$$

พลังงานความร้อน W_{th} นี้ทำให้เกิดอุณหภูมิเพิ่มในตัวความต้านทาน คำนวณได้จาก

$$W_{th} = m.\beta.\Delta\theta \quad (3.5)$$

W_{th} มีหน่วยเป็น จูล

เมื่อ m คือ มวลของโลหะผสมที่ใช้ทำตัวความต้านทาน หน่วยเป็น gm

β คือ ความร้อนจำเพาะของโลหะผสม หน่วยเป็น $\frac{J}{gm^{\circ}C}$

$\Delta\theta$ คือ อุณหภูมิเพิ่มของโลหะผสม หน่วยเป็น $^{\circ}C$

ความร้อนที่เพิ่มขึ้น Δt จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ซึ่งมีผลกับอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานในภาวะทรานเซี้ยนคำนวณได้จาก

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha.\Delta\theta \quad (3.6)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของโลหะผสมที่ใช้ทำตัวความต้านทาน มีหน่วยเป็น $ppm/^{\circ}C$

3.2.3 การเลือกตัวความต้านทานภาคแรงสูง

จากสมการ (3.1) จะเห็นได้ว่าพลังงานสูญเสียในความต้านทานจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ใช้ คือ ถ้าความต้านทานต่ำพลังงานสูญเสียจะมาก ซึ่งจะเป็นผลกระทบ คือ เป็นโหลดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ การเลือกค่าความต้านทานเพื่อออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์จึงควรจะเลือกให้มีค่าสูงขึ้น แต่ถ้าใช้ค่าความต้านทานสูงมากก็จะมีผลเสียต่อผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์ คือ เวลาตอบสนองจะมากเกินไป ทั้งนี้เนื่องจากเวลาตอบสนองแปรโดยตรงกับค่าความต้านทานดังสมการที่ (2.9) ทำให้โวลเตจดิไวเดอร์ไวไม่พอที่จะใช้วัดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงค่าอย่างรวดเร็วได้ ค่าความต้านทานที่พอเหมาะจึงมีทั้งขีดจำกัดล่างและขีดจำกัดบน จากประสบการณ์ทางภาคปฏิบัติ ทำให้ทราบช่วงค่าความต้านทานที่เหมาะสม คือ ระหว่าง 5 ถึง 20 กิโลโอห์ม ดังได้กล่าวแล้วในบทที่ 2

การออกแบบนอกจากจะต้องคำนึงถึงค่าความต้านทานแล้วยังจะต้องคำนึงถึงชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเป็นตัวความต้านทานด้วย เพราะลักษณะของแรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันทรานเซี้ยนที่เกิดในเวลาสั้นๆ แต่มีขนาดสูงพลังงานที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะเป็นทรานเซี้ยนด้วย ถ้าเลือกตัวความต้านทานไม่เหมาะสมกับการใช้งานลักษณะนี้จะทำให้เกิดการไหม้ หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในภาวะทรานเซี้ยนมากทำให้อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์เปลี่ยนแปลงมากด้วย จากสมการที่ (3.5) และ (3.6) ทำให้ทราบว่าตัวความต้านทานที่ใช้ต้องมีมวลของวัสดุที่เป็นตัวต้านทานมากพอ และต้องมีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำมากๆ ด้วย จึงจะเหมาะสมสำหรับใช้เป็นโวลเตจดิไวเดอร์เพื่อวัดแรงดันอิมพัลส์ ด้วยเหตุนี้เองจึงนิยมใช้ลวดความต้านทานทำเป็นตัวความต้านทานภาคแรงสูง งานวิจัยนี้ได้ทดลองสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ด้วยลวดความต้านทานเช่นกัน และเพื่อศึกษาเปรียบเทียบจึงได้ทำการทดลองวิจัยโดยใช้ความต้านทานที่ทำด้วยวัสดุอื่น คือ ความต้านทานแบบฟิล์มโลหะออกไซด์ และความต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน

ก) ความต้านทานแบบเส้นลวด

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าการเลือกใช้ตัวความต้านทานภาคแรงสูงนั้น ต้องคำนึงถึงพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวความต้านทานเป็นประการสำคัญ ดังนั้นเพื่อให้สามารถหาเกณฑ์ในการตัดสินเลือกมิติลวดความต้านทาน จึงได้ทำการพิสูจน์วิเคราะห์ในเชิงคณิตศาสตร์ ดังต่อไปนี้

ถ้าให้เส้นลวดความต้านทานที่ใช้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง d เซนติเมตร ความยาว 1 เซนติเมตร ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ทำลวดความต้านทาน γ gm/cm^3 สามารถคำนวณหามวลของวัสดุความต้านทานได้ดังนี้

$$m = \frac{1}{4} \pi d^2 1 \gamma$$

แทนค่ามวลในสมการที่ (3.5)

$$W_{th} = \frac{1}{4} \pi d^2 1 \gamma \beta.\Delta\theta$$

แต่เพราะว่า $W_{th} = W_{el}$ ตามสมการ (3.4) และ $W_{el} = \frac{W_v}{R}$ ตามสมการ (3.3) ดังนั้น

$$\frac{W_v}{R} = \frac{1}{4} \pi d^2 1 \gamma \beta.\Delta\theta$$

$$W_v = \frac{1}{4} R \pi d^2 l \gamma \beta.\Delta\theta$$

แต่เพราะว่า $R = \rho \frac{l}{A}$

เมื่อ ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของวัสดุความต้านทาน หน่วยเป็น Ωcm.

แทนค่าในเทอมของมิติเส้นลวด ได้ดังนี้

$$R = \rho \frac{l}{(\frac{1}{4} \pi d^2)}$$

แทนค่า R ในสมการ W_v ข้างบน จะได้

$$W_v = l^2 \gamma \rho \beta.\Delta\theta \qquad (3.7)$$

จากสมการ (3.2) $W_v = \int_o^\infty v^2(t)\, dt$ จะเห็นได้ว่าเมื่อทราบขนาดและลักษณะของแรงดันอิมพัลส์จะทำให้เราสามารถหามิติลวดความต้านทานที่ใช้ได้ ถ้าหากกำหนดอุณหภูมิที่ยอมให้เพิ่มขึ้นได้ $\Delta\theta$ สมมุติว่ายอมให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้ 300-500°C ($\Delta\theta$ ขนาดนี้ทำให้ค่าความต้านทานของลวดความต้านทานเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.5 % ดังคำนวณได้จากสมการ (3.6)) และถ้าแรงดันที่วัดไม่เกิน 300 กิโลโวลท์ W_v ที่คำนวณได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 3 ถึง 5 $(kV)^2$ S

ถ้าต้องการวัดแรงดันอิมพัลส์รูปฟังชั่นเอกซ์โปเนนเชียล ซึ่งมีสมการดังนี้

$$v(t) = \hat{V} \varepsilon^{-t/\tau}$$

เมื่อ $\hat{V}$ คือ ค่าอัมปลิจูดของคลื่นแรงดัน มีหน่วยเป็น kV

τ คือ ค่าคงที่เวลาของฟังชั่นเอกซ์โปเนนเชียล มีหน่วยเป็น S

คำนวณหา W_v มีหน่วยเป็น $(kV)^2$S จากสมการ (3.2) ได้ดังนี้

$$W_v = \int_o^\infty (\hat{V}\varepsilon^{-t/\tau})^2 dt$$

$$= \hat{V}^2 \int_o^\infty \varepsilon^{-2t/\tau} dt$$

$$= \hat{V}^2 \frac{\tau}{2} \qquad (3.8)$$

ถ้าใช้ตัวความต้านทานที่มีค่า $W_v = 3(kV)^2S$ ดังนั้น

$$\hat{V}^2 . \frac{\tau}{2} = 3$$

เมื่อกำหนด τ ของแรงดันให้สามารถคำนวณหาอัมปลิจูดสูงสุดของแรงดัน $\hat{V}$ ที่สามารถใช้ความต้านทานชุดนี้วัดได้ ดังตัวอย่างเช่น

τ (μS)	1	10	100	1000	10000
$\hat{V}$ (kV)	2449	775	244.9	77.5	24.5

ในกรณีเป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μS อาจประมาณได้ว่าแรงดันแบบเอกซ์โปเนนเชียลที่มีค่าคงที่เวลา 70 μS {3} ดังนั้นถ้าต้องการวัดแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐานขนาด 300 กิโลโวลท์ จึงต้องใช้ตัวความต้านทานที่มี W_v เท่ากับค่าที่คำนวณได้จากสมการ (3.8) ดังนี้

$$W_v = (300)^2 \times \frac{70 \times 10^{-6}}{2}$$

$$= 3.15\ (kV)^2S$$

ในการออกแบบตัวความต้านทานภาคแรงสูงเพื่อใช้กับโวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 300 กิโลโวลท์ ในที่นี้ ใช้ลวดความต้านทานแบบไม่มีฉนวนหุ้มซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างนิเกิลและโครเมียม ลวดความต้านทานที่ใช้มีข้อมูล ดังนี้

ความต้านทานจำเพาะ	ρ	=	79.5	μΩ cm
ความหนาแน่น	γ	=	8.1	gm/cm^3
ความร้อนจำเพาะ	β	=	0.46	$J/gm^\circ C$
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ	α	=	10	$ppm/^\circ C$
เส้นผ่าศูนย์กลาง	d	=	90	μm
ความต้านทานต่อเมตร		=	125	Ω

จากสมการ (3.7) ความยาวลวดความต้านทานที่ต้องใช้ หน่วยเป็น เซนติเมตร ได้ดังนี้

$$1 = \sqrt{\frac{W_v}{\gamma \rho \beta . \Delta\theta}} \qquad (3.9)$$

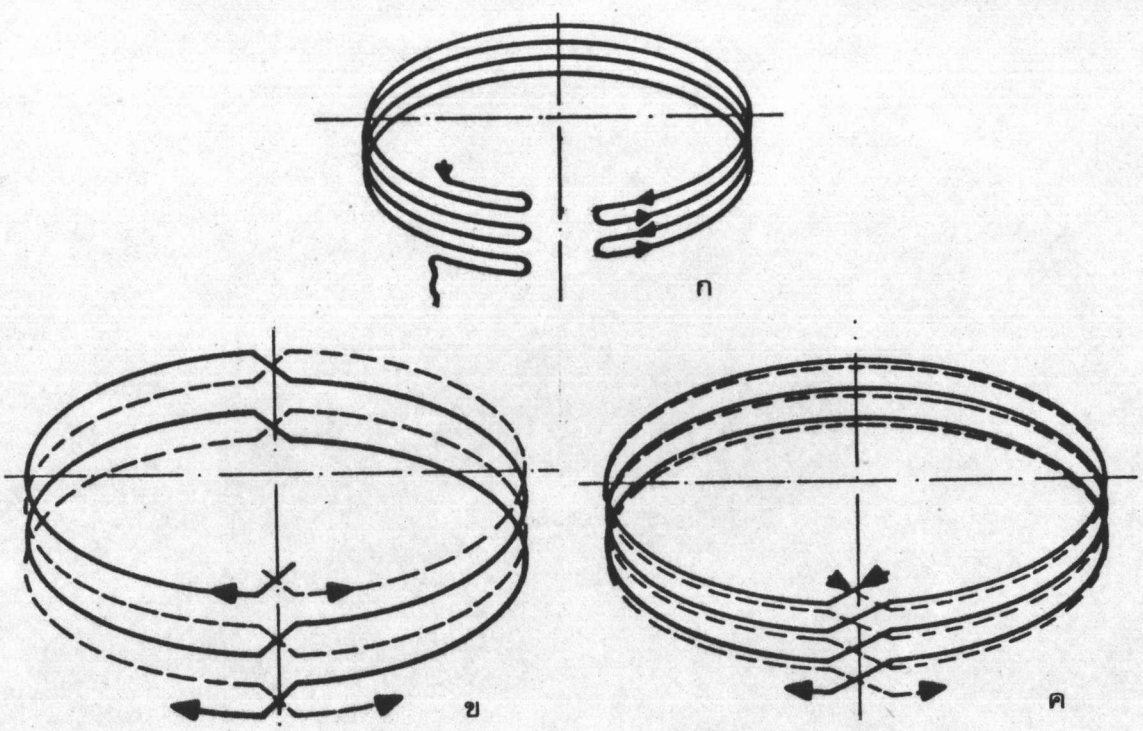
เมื่อ W_v มีหน่วยเป็น V^2S และ $\Delta\theta$ มีหน่วยเป็น $^\circ C$ ถ้ากำหนดให้ $\Delta\theta = 300^\circ C$ และดังที่ทราบแล้วว่า W_v ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน 300 กิโลโวลท์ เท่ากับ 3.15 $(kV)^2S$ และแทนค่าข้อมูลของลวดความต้านทานในสูตร (3.9) คำนวณหาความยาว 1 ของลวดความต้านทานที่ควรใช้ ได้ 1 = 59.5 เมตร นำไปใช้คำนวณหาความต้านทานทั้งหมดได้

ความต้านทานทั้งหมด = 59.5 x 125

= 7437 Ω

ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่จะออกแบบสร้างเป็นโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานดังได้กล่าวแล้วในบทที่ 2

เพื่อให้สเตรอินดัคแตนซ์ในตัวความต้านทานภาคแรงสูงมีค่าต่ำ จึงต้องพันลวดให้กระแสในลวดความต้านทานที่อยู่ใกล้กันไหลสวนทางกัน เพื่อให้หักล้างผลกระทบของสเตรอินดัคแตนซ์ให้มากที่สุด การพันลวดความต้านทานให้ได้สเตรอินดัคแตนซ์ต่ำๆ อาจทำได้หลายวิธี {3} เช่นการพันที่แสดงไว้ในรูป 3.2



รูป 3.2 การพันลวดความต้านทานให้มีสเตรอินดัคแตนซ์ต่ำ

วิธีการในรูป ก. เหมาะสำหรับลวดความต้านทานที่ไม่มีฉนวนหุ้ม ส่วนวิธีการในรูป ข. และ ค. เหมาะกับการพันลวดความต้านทานที่มีฉนวนหุ้มสองเส้นพันสวนทางกัน ทำให้ได้ thermal capacity เพิ่มขึ้น ซึ่งจำเป็นเมื่อแรงดันกำหนดสูงขึ้น ในที่นี้ใช้วิธีการพันลวดแบบลดสเตรอินดัค-แตนซ์ตามวิธีในรูป ก. โดยพันบนท่อฉนวนพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.5 เซนติเมตร กลึงร่องเล็กๆ บนผิวท่อลึกประมาณ 1-2 มิลลิเมตร สำหรับเป็นช่องให้ลวดความต้านทานพันอยู่ได้บนผิวท่อ ในทางทฤษฎีลวดความต้านทานควรจะพันให้อยู่ชิดกันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่ในทางปฏิบัติจะมีปัญหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าระหว่างร่อง ด้วยเหตุนี้เองจึงออกแบบให้ตัวความต้านทานแช่อยู่ในน้ำมัน อย่างไรก็ดีปัญหาในการพันชิดกันมากๆ จะทำให้เกิดความเครียดทางกล ตรงจุดลวดวกกลับมาก ซึ่งเป็นผลเสียต่อตัวความต้านทาน จึงเลือกใช้ระยะห่างระหว่างร่องเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะที่พอเหมาะสะดวกในการพัน ฉะนั้นความยาวของท่อพีวีซีที่ใช้พันลวดความต้านทานอาจหาได้ คือ

เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อพีวีซี = 8.5 เซนติเมตร

กลึงร่องลึก = 0.1 เซนติเมตร

เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อวัดถึงก้นร่อง = 8.5 - 2 (0.1)

= 8.3 เซนติเมตร

ความยาวของลวดความต้านทานต่อหนึ่งรอบ = π x (8.3)

= 26 เซนติเมตร

$$\text{จำนวนรอบเส้นลวดที่พัน} = \frac{\text{ความยาวลวดความต้านทาน}}{\text{ความยาวของลวดความต้านทานต่อหนึ่งรอบ}}$$

$$= \frac{5950}{26}$$

= 229 รอบ

ความยาวท่อพีวีซีที่ใช้พันลวด = จำนวนรอบ x ระยะห่างระหว่างรอบ

= 229 x 0.25

= 57.25 เซนติเมตร

ฉะนั้นเลือกใช้ท่อพีวีซีสำหรับพันเส้นลวดยาว 60 เซนติเมตร

ลักษณะการพันเส้นลวดความต้านทานภาคแรงสูง แสดงในรูป 3.3 ซึ่งได้ความต้านทานรวมทั้งหมด 7170 โอห์ม ดังนั้นจะสามารถหาความยาวจริงของเส้นลวดความต้านทานได้

ความยาวลวดความต้านทาน 1 = $\frac{\text{ความต้านทานรวม}}{\text{ความต้านทานต่อ 1 เมตร}}$

$$= \frac{7170}{125}$$

$$= 57.4 \quad \text{เมตร}$$

จากสมการ (3.7) คำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของสารความต้านทานได้ดังนี้

$$\Delta\theta = \frac{W_v}{1^2 \gamma \rho \beta}$$

$$= \frac{3.15 \times 10^6}{(57.4 \times 10^2)^2 \times 8.1 \times 79.5 \times 10^{-6} \times 0.46}$$

$$= 323^\circ C$$

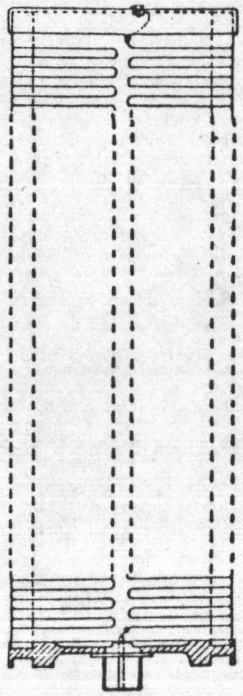
การเปลี่ยนแปลงของค่าโอห์มของความต้านทานคำนวณได้จากสมการ (3.6)

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha\Delta\theta$$

$$= 10 \times 10^{-6} \times 323 \times 100 \quad \%$$

$$= 0.32 \quad \%$$

ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดได้ตามต้องการ



ก

ข

รูป 3.3 ความต้านทานภาคแรงสูงแบบเส้นลวดความต้านทาน

ก. ลักษณะการพัน

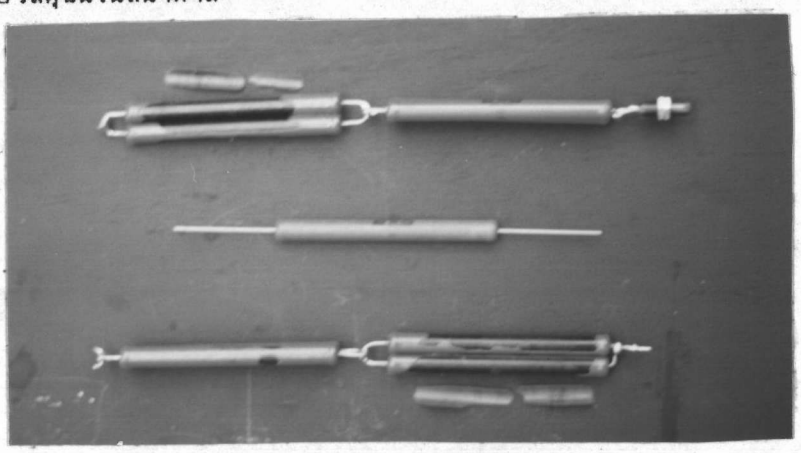
ข. ภาพถ่ายความต้านทานเมื่อพันและประกอบเสร็จเรียบร้อย

ข) ความต้านทานแบบฟิล์มโลหะออกไซด์

ความต้านทานแบบฟิล์มโลหะออกไซด์ ที่นำมาใช้ในที่นี้เป็นความต้านทานแบบที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูง (high voltage resistors) ซึ่งสร้างขึ้นด้วยกรรมวิธีทันสมัย โดยเผาสารความต้านทานให้ระเหิดไปเกาะบนแกนเซรามิคส์ที่วางอยู่ในอากาศที่อุณหภูมิมากกว่า 760 องศาเซลเซียส ความต้านทานแบบนี้มีเสถียรภาพทางความร้อนดี และมีความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลัน (thermal - shock) มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิน้อยกว่า 80 ppm/°C เนื่องจากเป็นฟิล์มบางจึงมีผลกระทบเกี่ยวกับกระแสไหลในผิว (skin effect) น้อย

ตัวความต้านทานที่ใช้เป็นความต้านทานภาคแรงสูงในที่นี้มีค่า 10.28 กิโลโอห์ม ซึ่งประกอบด้วยตัวความต้านทาน 10 ชุด ชุดละ 2 ตัวต่อขนานกัน แต่ละตัวมีขนาด 2 กิโลโอห์ม 7.5 วัตต์ และมี

แรงดันที่กำหนด 15 กิโลโวลท์ ทนต่อแรงดันเกินได้ 1.5 เท่าของแรงดันที่กำหนดภายในเวลา 5 วินาที ตัวอย่างความต้านทานแสดงไว้ในรูป 3.4 สีดำที่ปรากฏในภาพนั้นเป็นฟิล์มโลหะออกไซด์ ซึ่งฉาบหุ้มด้วยวัสดุฉนวนสีน้ำตาล



รูป 3.4 ความต้านทานแบบฟิล์มโลหะออกไซด์

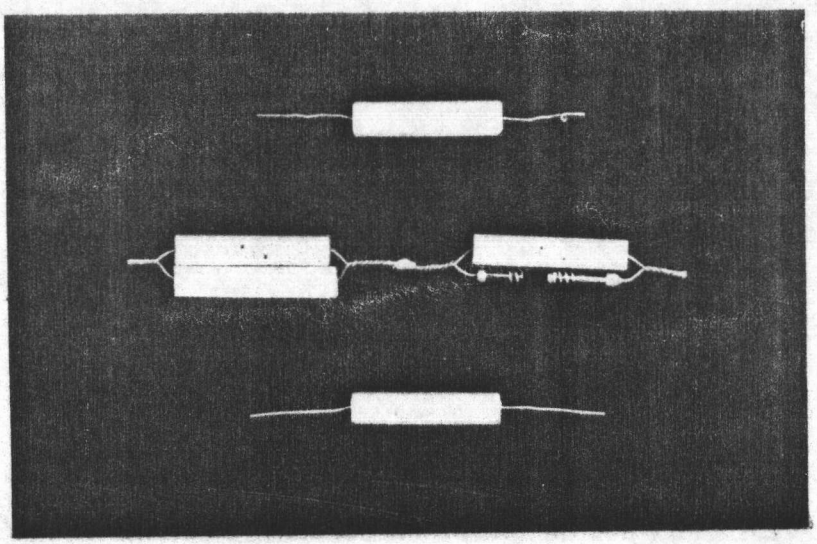
การประกอบความต้านทานภาคแรงสูงแบบฟิล์มโลหะออกไซท์ แสดงในรูป 3.5 ตัวความต้านทานภาคแรงสูงจะยึดอยู่ในท่อฉนวนพีวีซี (สีเทา ในรูป) แช่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลงซึ่งบรรจุอยู่ในท่อฉนวนพีวีซีอีกชั้นหนึ่ง (สีน้ำตาลแดง)

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป 3.5 การประกอบความต้านทานภาคแรงสูงแบบฟิล์มโลหะออกไซด์

ค) ความต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน

เพื่อทดลองศึกษาคุลักษณะสมบัติของโวลเตจดิไวเดอร์ ที่ใช้ตัวความต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอนที่มีขายทั่วไปตามห้องตลาดเป็นความต้านทานภาคแรงสูง ความต้านทานแบบนี้มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นลบ คือ มีค่าประมาณ -230 ppm/°C ถ้าฟิล์มมีความหนาลดลงสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจะยิ่งน้อยลง อาจลดลงถึง -400 ppm/°C {5} งานทดลองนี้ใช้ความต้านทานรวม 9870 โอห์ม ซึ่งประกอบด้วยความต้านทาน 10 ชุด ชุดละ 2 ตัวต่อขนานกัน แต่ละตัวมีขนาด 2 กิโลโอห์ม 10 วัตต์ ดังในรูป 3.5 ตัวความต้านทานเหล่านี้บรรจุไว้ในท่อพีวีซีทำนองเดียวกันกับตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะออกไซด์



รูป 3.6 ความต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน

3.3 การออกแบบภาคแรงต่ำ

3.3.1 หลักเกณฑ์ทั่วไป

การออกแบบความต้านทานภาคแรงต่ำคำนึงถึงปัญหาต่างๆ ดังนี้

ก) แรงดันขาออกต้องไม่ต่ำเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น จากกระแสที่ไหลในเปลือกนอกของสายเคเบิลวัด หรือจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ

ของระบบ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้น เป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด

ข) การจัดวางองค์ประกอบความต้านทานภาคแรงต่ำต้องพิจารณาเป็นพิเศษ เพื่อไม่ให้เกิดการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กบนสายนำออกจากโวลเตจดิไวเดอร์อันเนื่องมาจากกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน จึงควรวางตัวความต้านทานให้เป็นทรงกระบอกโคแอกเชียลกับสายนำออก คือ ตัวความต้านทานอยู่รอบนอกและสายนำออกเป็นแกนกลาง

ค) ตัวความต้านทานที่ใช้ทำเป็นอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ ต้องมีสเตรอินดัคแตนซ์น้อยมากๆ เพื่อไม่ให้เกิดการแกว่งในผลตอบสนองที่เนื่องมาจากภาคแรงต่ำ

ง) ความต้านทานภาคแรงต่ำต้องเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในภาวะทรานเซี้ยนน้อยมาก เพื่อรักษาอัตราส่วนแรงดันให้คงที่

จ) ภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์พัฒนาขึ้นใช้ควรเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนได้ง่าย เพื่อให้ได้แรงดันขาออกเหมาะสมกับเครื่องวัดที่มีอยู่ จึงออกแบบโครงสร้างของภาคแรงต่ำแยกต่างหากจากภาคแรงสูงเพื่อให้ถอดเปลี่ยนได้สะดวก จะทำให้ได้โวลเตจดิไวเดอร์ที่มีความคล่องตัวในการใช้งานมากขึ้น

3.3.2 การเลือกแรงดันขาออก

แรงดันขาออกสูงสุดของโวลเตจดิไวเดอร์จะกำหนดด้วยแรงดันป้อนเข้าสูงสุดของเครื่องวัดด้านแรงต่ำ ซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคป หรือโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอด ออสซิลโลสโคปแบบธรรมดาที่ใช้อยู่ทั่วไปจะรับแรงดันขาเข้าได้ไม่เกิน 200 โวลท์ ดังนั้นเพื่อให้ใช้กับออสซิลโลสโคปที่มีอยู่ทั่วไปดังกล่าวนี้ได้ แรงดันขาออกของโวลเตจดิไวเดอร์จึงไม่ควรเกิน 200 โวลท์ เว้นเสียแต่ว่าจะใช้กับอิมพัลส์ออสซิลโลสโคป หรือโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดที่ออกแบบมาวัดแรงดันอิมพัลส์โดยเฉพาะ หรืออาจลดทอนแรงดันขาออกด้วยโพรบช่วยอีกทอดหนึ่ง เมื่อทราบแรงดันสูงและแรงดันขาออกที่กำหนดจะทำให้คำนวณอัตราส่วนแรงดัน a ของโวลเตจดิไวเดอร์จากสมการ (2.5) ได้ซึ่งอัตราส่วนแรงดันนี้มีความสัมพันธ์อยู่ในเทอมของอัตราส่วนความต้านทาน ดังที่ได้พิสูจน์วิเคราะห์ไว้ในภาคผนวก1 คือ

$$a = \frac{R_m(R_d + R_1 + R_2) + R_2(R_d + R_1)}{R_2 R_m} \qquad (3.10)$$

เมื่อ R_1 คือ ความต้านทานภาคแรงสูง

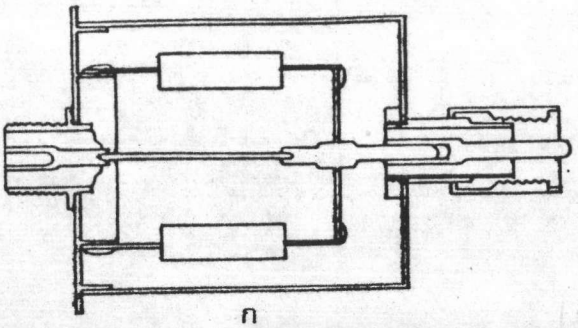
R_2 คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ

R_d คือ ความต้านทานหน่วงในสายนำ

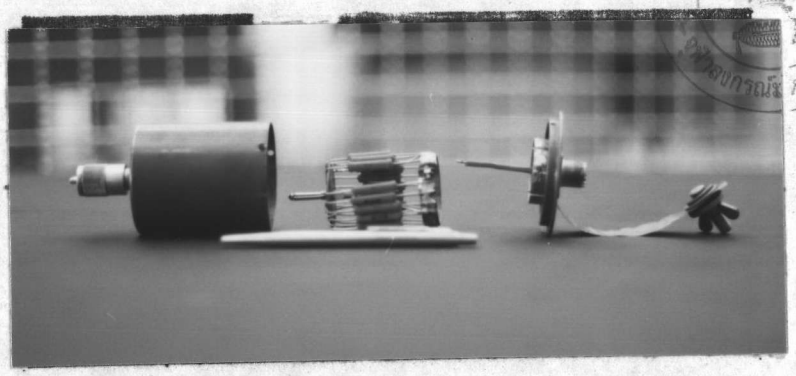
R_m คือ ความต้านทานแมทชิ่ง

ฉะนั้นจากสมการ (3.10) จะคำนวณหาความต้านทานภาคแรงต่ำได้

การทดลองในที่นี้ใช้ตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะออกไซด์ขนาด 500 โอห์ม 4 วัตต์ จำนวน 23 ตัวต่อขนานกัน ความต้านทานแต่ละตัวมีแรงดันที่กำหนด 2 กิโลโวลท์ ทนแรงดันเกินได้ 1.5 เท่าของแรงดันที่กำหนดภายในเวลา 5 วินาที อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 275°C ใช้โหลดเกินได้ 5 เท่าภายใน 5 วินาที สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ 50 ppm/°C ตัวความต้านทานชุดนี้บรรจุอยู่ในทรงกระบอกทองเหลืองเพื่อกันการรบกวนที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายนอก ลักษณะโครงสร้างและการประกอบตัวความต้านทานภาคแรงต่ำที่สร้างขึ้น แสดงให้ดูในรูป 3.7 ความต้านทานภาคแรงต่ำชุดนี้ใช้ได้สำหรับความต้านทานภาคแรงสูงแบบลวดความต้านทานและแบบฟิล์มโลหะออกไซด์ ส่วนความต้านทานภาคแรงต่ำสำหรับใช้กับโวลเตจดิไวเดอร์ที่มีตัวความต้านทานภาคแรงสูงเป็นแบบฟิล์มคาร์บอน ใช้ตัวความต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอนขนาด 220 โอห์ม จำนวน 10 ตัวต่อขนานกันได้ความต้านทานรวม 22.2 โอห์ม



ก



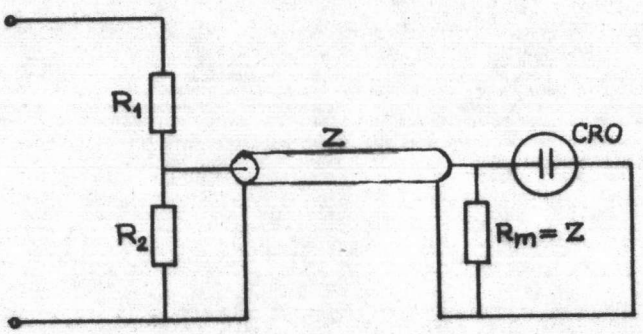
ข

รูป 3.7 ตัวความต้านทานภาคแรงต่ำ ขนาด 21.7 Ω

ก. ลักษณะโครงสร้าง ข. การประกอบ

3.4 การต่อโวลเตจดิไวเดอร์ในระบบการวัด

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าการวัดแรงดันสูงด้วยโวลเตจดิไวเดอร์นั้นจะวัดแรงดันจากส่วนที่เป็นภาคแรงดันต่ำด้วยเครื่องวัด แม้ว่าจะเป็นแรงดันต่ำก็ตามก็ไม่สามารถที่จะใช้เครื่องวัดเข้าไปวัดโดยตรงได้ เพราะจะไม่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน จำเป็นต้องต่อวงจรด้วยสายเคเบิลวัดเพื่อนำแรงดันขาออกที่ต้องการวัดไปเข้าเครื่องวัดในระยะที่ห่างไกลพอสมควรและโดยเหตุที่ว่าต้องใช้เครื่องวัดที่มีอิมพีแดนซ์ขาเข้าสูง และสัญญาณแรงดันที่ต้องการวัดมีความถี่สูง จะเป็นเหตุให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับที่จุดต่อของสายเคเบิลกับเครื่องวัด ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดแรงดัน จึงจำเป็นต้องใส่แมทชิ่งอิมพีแดนซ์ (matching impedance) ที่มีค่าโอห์มเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลวัดที่ปลายสายก่อนเข้าเครื่องวัด ดังในรูป 3.8

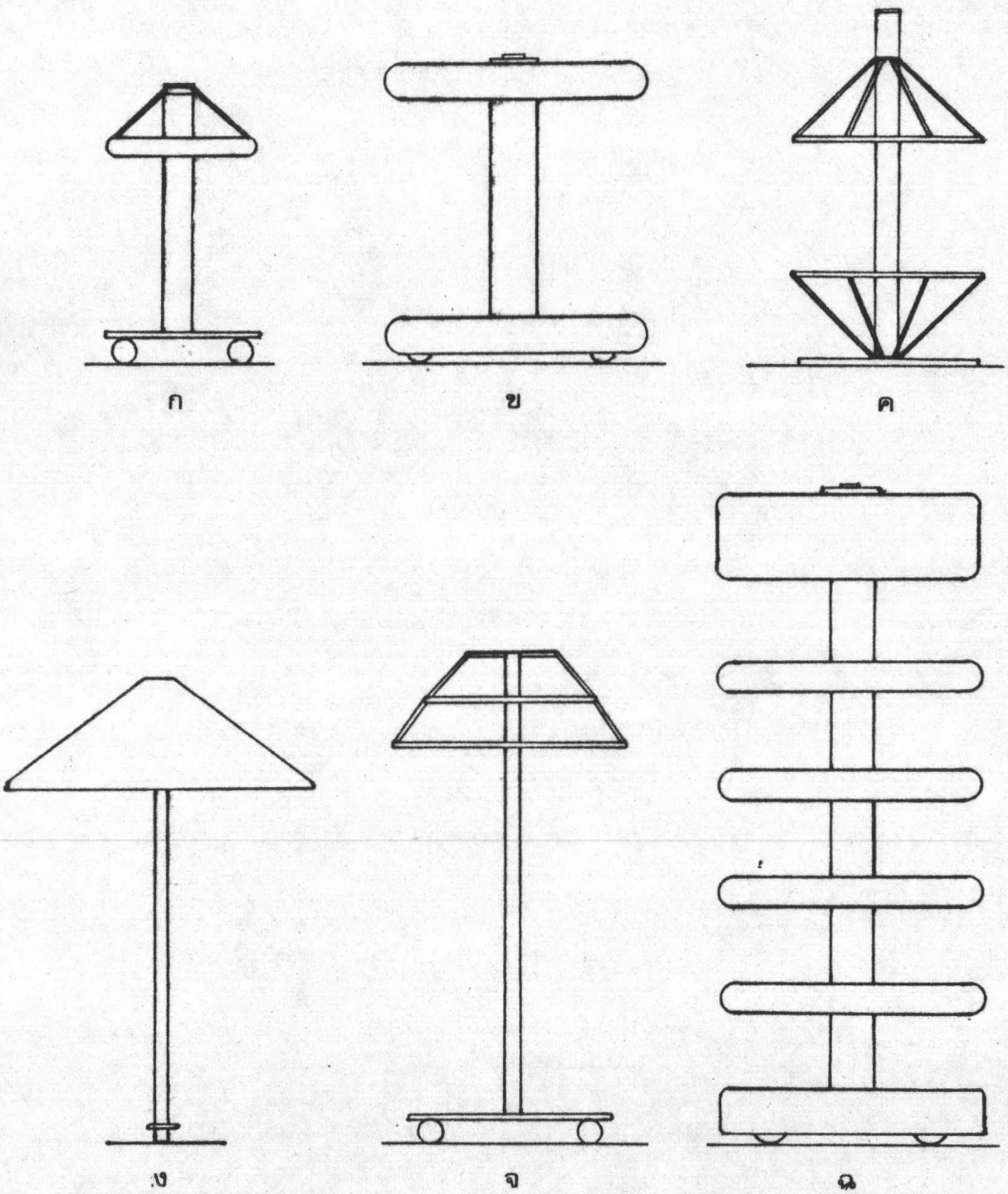


รูป 3.8 ระบบการวัดโดยใช้โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน

แมทชิ่งอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในที่นี้จะเป็นความต้านทาน ซึ่งออกแบบและประกอบทำนองเดียวกันกับความต้านทานภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์ คือ ใช้ความต้านทานแบบฟิล์มโลหะออกไซด์ขนาด 750 โอห์ม จำนวน 10 ตัว ต่อขนานกัน ได้ความต้านทานรวม 75 โอห์ม หัวสายเคเบิลที่ใช้เป็นข้อต่อแบบ UHF

3.5 การออกแบบชีลด์อีเลกโตรด

ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2 แล้วว่ารูปร่างและขนาดของชีลด์อีเลกโตรดที่ใช้ประกอบตอนบนของโวลเตจดิไวเดอร์เพื่อปรับปรุงเวลาตอบสนองให้ดีขึ้นนั้นไม่มีกฎเกณฑ์ตายตัว จึงมีการทำขึ้นในหลายแบบดัง ในรูป 3.9 รูป ก. เป็นชีลด์อีเลกโตรดตามมาตรฐานบีเอสมีลักษณะเป็นวงแหวนตัวนำติดตั้ง



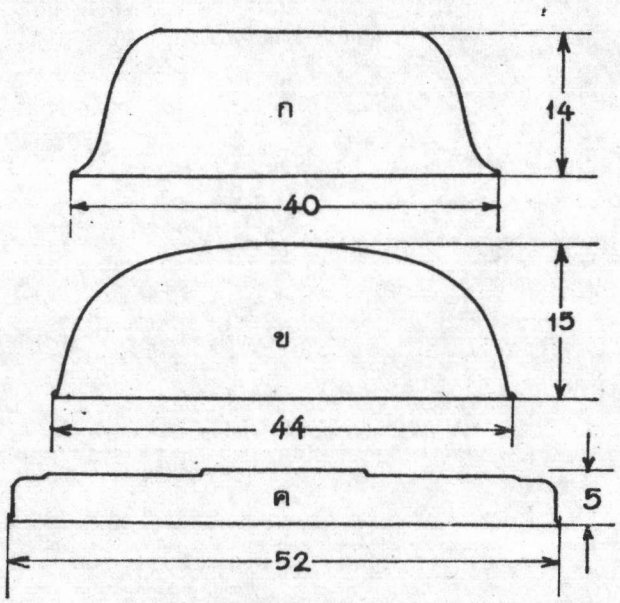
รูป 3.9 โวลเตจดิไวเดอร์แบบชีลด์ลักษณะต่างๆ

ตอนบนแต่ต่ำกว่าระดับบนสุดของโวลเตจดิไวเดอร์ {8} รูป ข. และ ฉ. เป็นชีลด์อีเลกโตรดออกแบบโดย Berger มีลักษณะเป็นวงแหวนตัวนำติดตั้งที่ตอนบนและล่างหรือติดตั้งเป็นช่วงๆ ตลอดความสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ {4} รูป ค. เป็นชีลด์อีเลกโตรดตามแบบของ Kuffel มีลักษณะเป็นชี่ๆ เชื่อมติดกับวงแหวนติดตั้งทั้งตอนบนและล่างของโวลเตจดิไวเดอร์ {6} รูป ง. เป็นชีลด์อีเลกโตรดแบบกรวย {8} รูป จ. เป็นอีเลกโตรดที่มีลักษณะแบบรูป ก. แต่มีชั้นมากขึ้นติดตั้งตอนบนของโวลเตจดิไวเดอร์ ในกรณีที่โวลเตจดิไวเดอร์แบบมีชีลด์มีแรงดันกำหนด 300 กิโลโวลท์ อาจใช้ชีลด์อีเลกโตรดติดตั้งตอนบนอันเดียวก็เพียงพอ {5} ชีลด์อีเลกโตรดที่สร้างขึ้นทำเลียนแบบชีลด์อีเลกโตรดตามมาตรฐานบีเอส ซึ่งให้คำแนะนำไว้ว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวน ประมาณ 65 % ของความสูงของโวลเตจดิ-ไวเดอร์ยึดอยู่ในแนวระดับต่ำกว่าส่วนยอดสุด ประมาณ 25 % ของความสูง ทำด้วยท่ออลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ทำเป็นรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 65 เซนติเมตร ต่อก้านอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร เพื่อยึดติดกับตอนบนของโวลเตจดิไวเดอร์ ดังรูป 3.10

รูป 3.10 ชีลด์อีเลกโตรดสำหรับโวลเตจดิไวเดอร์ 300 กิโลโวลท์

นอกจากนั้นยังได้ทดลองใช้ภาชนะอลูมิเนียมที่มีขายในท้องตลาด คือ อ่าง กะทะ และฝาโอ่ง ซึ่งมีน้ำหนักเบา ผิวเรียบ สัณฐานมน ทำเป็นชีลด์อีเลกโตรดภาชนะอลูมิเนียมดังกล่าว แสดงในรูป 3.11 ก. อ่าง ข. กะทะ ค. ฝาโอ่ง

โวลเตจดิไวเดอร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น แสดงไว้ในรูป 3.12



รูป 3.11 ซีลด์อีเลกโตรดที่ตัดแปลงจากภาชนะอลูมิเนียมต่างๆ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ

ก ข

รูป 3.12 ลักษณะของอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 300 กิโลโวลท์

ก. อิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์แบบธรรมดา

ข. อิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์แบบมีซีลด์