

บทที่ 4

การทดสอบและการประเมินผล

4.1 บทนำ

การหาลักษณะสมบัติของโวลเตจดีไวเซอร์โดยการพิจารณาในทางทฤษฎี มีประโยชน์ในการทำนายลักษณะสมบัติและแก้ไขปรับปรุง แต่จะทำให้ถูกต้องนั้นจะต้องมีข้อมูลพื้นฐานและข้อมูลต่างๆ ที่แน่นอนและถูกต้องเพียงพอ ในทางภาคปฏิบัติเป็นการยากที่จะทราบค่าต่างๆ เหล่านั้นได้ จึงจำเป็นต้องตรวจสอบลักษณะสมบัติของโวลเตจดีไวเซอร์ โดยการทดสอบซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะจะช่วยให้ทราบว่าโวลเตจดีไวเซอร์ที่สร้างขึ้นมีลักษณะสมบัติเหมาะสมที่จะใช้วัดแรงดันอิมพัลส์ได้ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ มาตรฐานสากลไออีซี {2} กำหนดการทดสอบที่สำคัญสองประการ คือ การทดสอบผลตอบสนองรูปคลื่น และการหาอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเซอร์ ในที่นี้ทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว และทดสอบเพิ่มเติมบางอย่างเพื่อความเหมาะสมในการพัฒนาขึ้น การทดสอบทำตามลำดับขั้นดังนี้

- ก) ทดสอบความคงทนต่อแรงดันตามกำหนดของการฉนวน
- ข) ทดสอบผลตอบสนองรูปคลื่น
- ค) หาอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเซอร์
- ง) ทดสอบการวัดแรงดันตามกำหนด

4.2 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันตามกำหนดของการฉนวน

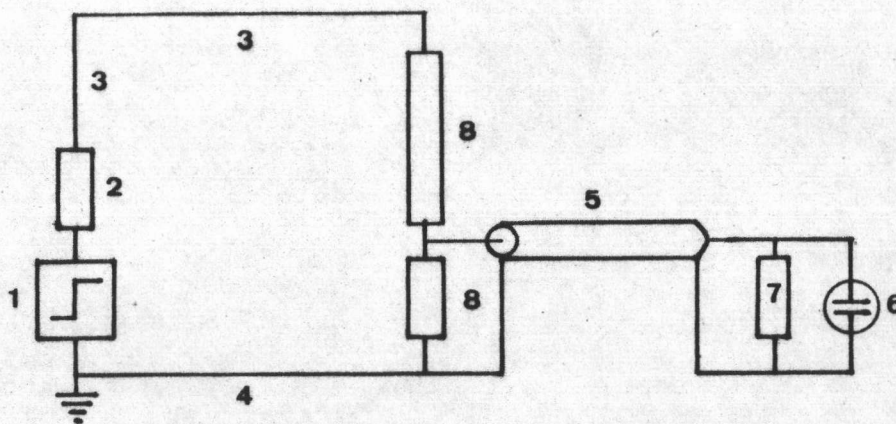
เมื่อออกแบบและสร้างท่อฉนวนที่ใช้บรรจุความต้านทานภาคแรงสูงเสร็จแล้ว ก่อนที่จะบรรจุความต้านทานเข้าไปควรทดสอบดูก่อนเพื่อความแน่ใจว่าโครงสร้างของโวลเตจดีไวเซอร์ทนความเครียดทางไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันที่กำหนดได้ โดยไม่เกิดวาบไฟตามผิวหรือดิสชาร์จทำลาย ซึ่งทำได้โดยวิธีการเดียวกับการทดสอบการทนต่อแรงดันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ ตามมาตรฐานสากลไออีซี เล่มที่ 60-1973 ตอน 1 ใช้โวลเตจดีไวเซอร์ที่ติดตั้งลักษณะภายนอกเหมือนสภาพจริงและบรรจุ น้ำมันหม้อแปลงเต็มเป็นอุปกรณ์ทดสอบ ต่อฐานของโวลเตจดีไวเซอร์ลงดิน ป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานเท่าแรงดันตามกำหนด 15 ครั้งที่ปลายบนของโวลเตจดีไวเซอร์ ผลการทดสอบต้องไม่มีการวาบไฟเกิด

ขึ้นเลย จึงจะแน่ใจได้ว่าการฉนวนของโครงสร้างโวลเตจดีไวเซอร์ที่ออกแบบไว้เพียงพอ

ผลการทดสอบโครงสร้างที่สร้างขึ้นปรากฏว่าทนแรงดันดังกล่าวได้โดยไม่เกิดการวาวไฟเลย และไม่เกิดโคโรน่าให้สังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า เมื่อทดสอบโวลเตจดีไวเซอร์ที่มีซิลิโคนเรซินเคลือบติดตั้งตอนบนตามที่ออกแบบไว้ก็สามารถทนต่อแรงดันตามกำหนดได้เช่นกัน จึงสรุปได้ว่าการฉนวนของโครงสร้างของโวลเตจดีไวเซอร์คงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ขนาด 300 กิโลโวลต์ ได้ตามต้องการ

4.3 การทดสอบผลตอบสนองรูปขึ้น

มาตรฐานสากลไออีซีแนะนำวิธีทดสอบผลตอบสนองรูปขึ้นโดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขึ้นแรงดันต่ำ ตัวอย่างดังรูป 4.1 จากข้อขาเข้าของระบบการวัดที่จุด A ใช้สายตัวนำขนาดเท่าสายนำไฟแรงสูงในแนวราบต่อลงมาตามแนวตั้งถึงเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขึ้น วงจรนี้เป็นวงจรคัตตแปลง คือ มีสายนำในแนวตั้งเพิ่มขึ้นจากสภาพใช้งานทั่วไป การคัตตแปลงวงจรเช่นนี้ก็เพื่อให้เป็นไปในทางปฏิบัติ เพราะเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของวงจร สายนำในแนวตั้งจะมีผลกับผลตอบสนองของระบบการวัดด้วยจึงต้องนำไปหักออกจากผลตอบสนองของวงจรคัตตแปลงก่อน จึงจะได้ผลตอบสนองที่แท้จริงของระบบการวัด



รูป 4.1 วงจรการทดสอบผลตอบสนองรูปขึ้น

- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| 1. เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขึ้น | 2. ความต้านทานทนวง R_D |
| 3. สายนำในแนวตั้งและแนวนอน | 4. สายดิน |
| 5. สายเคเบิลวัด | 6. ออสซิลโลสโคป |
| 7. ความต้านทานแมทซิ่ง | 8. โวลเตจดีไวเซอร์ |

4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการทดสอบผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเซอร์ คือ

เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขึ้น

ความต้านทานทอน่วง

สายนำในแนวตั้งและสายนำในแนวนอน

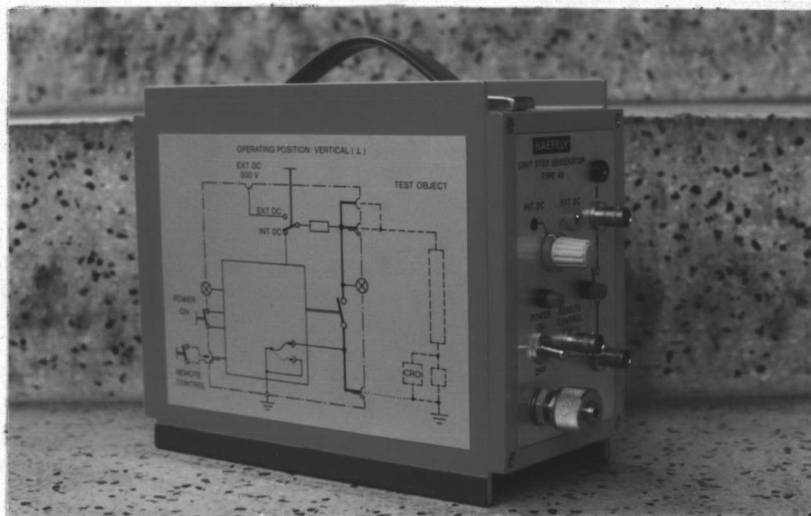
สายดิน

สายเคเบิลวัดและการแมทซิ่ง

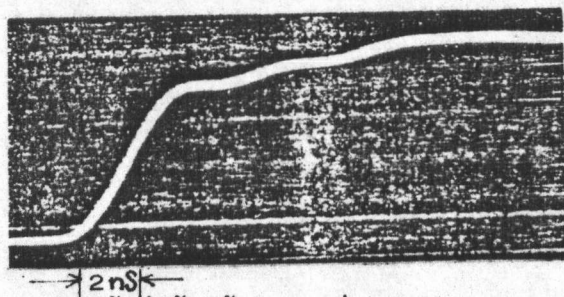
ออสซิลโลสโคปและกล้องบันทึกภาพ



ก) เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขึ้น มีลักษณะสมบัติที่ต้องการ คือ สามารถสร้างแรงดันได้ใกล้เคียงกับแรงดันรูปขึ้นในอุดมคติมากที่สุด และต้องมีอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์ทั้งขณะเริ่มสร้างแรงดันรูปขึ้นและในช่วงผลตอบสนองที่ตามมา หลักการทำงานของเครื่องนี้ คือ ป้อนแรงดันไฟตรงครบสวิทช์แล้วสวิทช์จรวจอย่างรวดเร็ว สวิทช์ที่ใช้ต้องทำงานด้วยความเร็วสูง เช่น สวิทช์แบบปรอท (mercury-wetted contact switch) หรือช่องว่างอากาศที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอขนาดช่องว่างประมาณ 1 มิลลิเมตร ช่องว่างอากาศที่กว้างเกินไปใช้ไม่ได้ เพราะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเร็วไม่พอในขณะเกิดสปาร์กโอเวอร์ และอิมพีแดนซ์หลังสปาร์กโอเวอร์ก็ต่ำไม่เพียงพอด้วย เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขึ้นที่ใช้ในที่นี้เป็นแบบ 40 ของ Haefely ดังแสดงในรูป 4.2 ซึ่งสามารถสร้างแรงดันรูปขึ้นที่มี rise time น้อยกว่า 5 nS ขนาด 90 โวลต์ ดังแสดงในรูป 4.3



รูป 4.2 เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขึ้นของ Haefely แบบ 40



รูป 4.3 แรงดันรูปคลื่นที่สร้างขึ้นโดยเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นในรูป 4.2

ข) ความต้านทานหน่วง เป็นความต้านทานที่ต้องใส่ไว้ในสายนำไฟแรงสูง เพื่อช่วยหน่วงการแกว่งของผลตอบสนองที่เนื่องมาจากสเตรอินดักแตนซ์ของสายนำและสเตรคแพซิแตนซ์ของโวลเตจดีไวเซอร์ ความต้านทานหน่วงยังเป็นตัวแมทซ์ซึ่งไม่ให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณในสายนำ ซึ่งเกิดจากอิมพีแดนซ์ของโวลเตจดีไวเซอร์และเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำไม่เท่ากัน ความต้านทานหน่วงที่ใช้ปกติจึงมีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำ และอาจอยู่ที่ปลายขาเข้า R'_d หรือปลายขาออก R_d หรือทั้งสองปลายของสายนำ ความต้านทานหน่วงจะมีผลกระทบต่ออัตราส่วนแรงดันและผลตอบสนองรูปคลื่นอย่างมาก ฉะนั้นการคิดอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเซอร์แบบความต้านทานจึงต้องนำค่าความต้านทานหน่วงไปคิดเป็นส่วนหนึ่งของความต้านทานภาคแรงสูง และเมื่อนำโวลเตจดีไวเซอร์ไปใช้งานจริงต้องมีความต้านทานหน่วงต่อไว้เหมือนตอนทดลองหาผลตอบสนองด้วย

ค) สายนำในแนวตั้งและสายนำในแนวนอน ใช้สายนำขนาดที่ใช้งานจริง ความยาวของสายนำในแนวนอนต้องยาวพอให้โวลเตจดีไวเซอร์อยู่ห่างจากอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อลดการเหนี่ยวนำรบกวนซึ่งกันและกัน ปกติใช้สายนำในแนวนอนยาวเท่ากับ ความสูงของโวลเตจดีไวเซอร์หรือมากกว่า ในที่นี้ใช้ท่ออลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ยาว 3 เมตร วางสูงจากพื้นดินประมาณ 120 เซนติเมตร ส่วนสายนำในแนวตั้งใช้ท่ออลูมิเนียมชนิดเดียวกัน ความยาว 80 เซนติเมตร เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำในแนวนอนคำนวณได้จากสูตร {2}

$$Z \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{4h}{d} \quad (4.1)$$

เมื่อ μ_0 คือ permeability of free space $= 4\pi \times 10^{-7}$ H/m

ϵ_0 คือ permittivity of free space $= 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของสายนำ

h คือ ความสูงจากพื้นดิน

ส่วนเล็วจิมพีแดนซ์ของสายนำในแนวตั้ง จะมีค่าไม่คงที่ คือ มีค่าลดลงเมื่อคิดจากบนลงล่าง แต่ความสูงของวงจรถดลองไม่มากนักจึงถือว่า เล็วจิมพีแดนซ์นี้มีค่าเท่ากับค่าของสายนำแนวนอน {2} โดยไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดมากนัก การที่เล็วจิมพีแดนซ์ไม่เท่ากันจะทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่น มีผลกระทบกับลักษณะของผลตอบสนอง

จากสมการ (4.1) คำนวณหาเล็วจิมพีแดนซ์ของสายนำในวงจรถดลองได้ประมาณ 305 โอห์ม

ง) สายดิน ใช้สายตัวนำที่มีสเตรอิมพีแดนซ์ต่ำมากๆ เพื่อลดความผิดพลาดในการวัด โดยเลือกใช้สายตัวนำให้สั้นที่สุดต่อกับสายดินของห้องทดลองโดยตรง ในที่นี้ใช้แผ่นทองแดงกว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 3 เมตร วางบนพื้นห้องทดลองเป็นสายดินของวงจรถดลอง

จ) สายเคเบิลวัดและการแมทซิ่ง ใช้สายเคเบิลวัดแบบโคแอก เชี่ยวชาญงานที่ความถี่สูง เล็วจิมพีแดนซ์ 75 Ω ความยาว 10 เมตร มีการแมทซิ่งที่ปลายสายเคเบิลด้านต่อกับเครื่องวัดดังรูป 3.8

ฉ) ออสซิลโลสโคปและกล้องบันทึกภาพ ต้องใช้ออสซิลโลสโคปที่มีลักษณะสมบัติความถี่สูงตีช่วงความถี่กว้างและต้องมีความไวมากด้วย เพราะแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเคอร์มีค่าน้อยมาก ในที่นี้ใช้ออสซิลโลสโคปของ Tektronix แบบ 465 มีช่วงความถี่ 150 เมกะเฮิรตซ์ rise - time 3.5 nS ใช้กล้องบันทึกภาพแบบฟิล์มโพลาไรซ์ เพื่อบันทึกภาพออสซิลโลแกรมนำไปคำนวณหาเวลาตอบสนองต่อไป

4.3.2 การหาเวลาตอบสนอง

การหาเวลาตอบสนองหาได้จากการป้อนแรงดันรูปขั้นให้กับโวลเตจดีไวเคอร์ตามวงจรถดลองในรูปที่ 4.1 แล้วบันทึกผลตอบสนองทางขาออกด้วยออสซิลโลสโคป จากภาพถ่ายผลตอบสนองที่ทดลองได้นำมาหาเวลาตอบสนองของระบบการวัด ขั้นแรกต้องหาจุดศูนย์เสมือน $0'$ ของ ผลตอบสนองเสียก่อน จุดศูนย์เสมือนนี้ถือเป็นจุดเริ่มของคลื่นรูปขั้นของผลตอบสนอง และของสัญญาณที่ต้องการวัดดังในรูป 2.1 จากนั้นจึงคำนวณพื้นที่ระหว่างคลื่นรูปขั้นกับคลื่นผลตอบสนองเพื่อนำไปหาเวลาตอบสนองของระบบการวัดซึ่งดัดแปลงขึ้น และสามารถหาเวลาตอบสนองของระบบการวัด เมื่อไม่มีสายนำซึ่งเป็นตัวแสดงคุณภาพของดีไวเคอร์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ก) จุดศูนย์เสมือน $0'$ และอัมพลิจูดหนึ่งหน่วย

จุดศูนย์เสมือน O' ของภาพถ่ายผลตอบสนองรูปขึ้น นิยามว่าเป็นจุดตัดของแกนเวลาและเส้นตรงที่ลากสัมผัสรูปคลื่นส่วนหน้าของผลตอบสนองที่มีความชันมากที่สุด ในกรณีที่มีการแกว่งที่หน้าคลื่น ต้องลากเส้นโค้งเฉลี่ยผ่านการแกว่งนั้นก่อน แล้วหาเส้นสัมผัสเส้นโค้งเฉลี่ย และในกรณีที่มีการเพี้ยนตอนเริ่มต้นมากให้ละทิ้งส่วนที่เพี้ยนนั้นไปแล้วหาจุดศูนย์เสมือนแบบเดียวกับวิธีดังกล่าวข้างต้น (รูป 2.1) ส่วนอัมพลิจูดหนึ่งหน่วยนั้นให้ถือค่าที่ผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะคงตัว

ข) เวลาตอบสนอง T

เวลาตอบสนอง T หาได้จากพื้นที่ T_α , T_β , T_γ ซึ่งเป็นพื้นที่ระหว่างคลื่นรูปขึ้นกับผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยโดยถือว่าทั้งสองคลื่นเกิดพร้อมกันที่เวลา O' ในกรณีที่มีความแตกต่างของจุดเริ่มต้นของผลตอบสนองและเส้นตรงที่กำหนด O' จะถือว่าเส้นตรงที่ลากตั้งขึ้นไปจากจุด O' เป็นตัวกำหนดพื้นที่ในส่วนนั้น รูป 2.1 เวลาตอบสนองของระบบดัดแปลง T_n เมื่อยังไม่ได้แก้ผลกระทบของสายนำแนวตั้งหาได้จากสมการ

$$T_n = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma \quad (4.2)$$

เวลาตอบสนองของระบบเมื่อแก้ผลกระทบของสายนำแนวตั้ง {2}

$$T = T_n + \tau_v \left(1 - \frac{Z}{R}\right) \quad (4.3)$$

$$\tau_v = \frac{h}{c}$$

เมื่อ τ_v คือเวลาจรในสายนำแนวตั้ง

h คือความยาวของสายนำแนวตั้ง

c คือความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศ (300 เมตรต่อไมโครวินาที)

Z คือเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำแนวตั้ง

R คือความต้านทานรวมของโวลเตจดีไวเซอร์

ค) เวลาตอบสนองของระบบการวัดเมื่อไม่มีสายนำไฟแรงสูง T_t

เวลาตอบสนองของระบบการวัดเมื่อไม่มีสายนำไฟแรงสูง T_t หาได้ดังนี้

$$T_t = T + \tau_1 \left(1 - \frac{Z}{R}\right) \quad 4.4$$

$$\tau_1 = \frac{1}{c}$$



เมื่อ τ_1 คือเวลาจรในสายนำแวนอน

1 คือความยาวของสายนำแวนอน

4.3.3 ผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเคอร์ที่มีความต้านทานภาคแรงสูงเป็นแบบลวดความต้านทาน

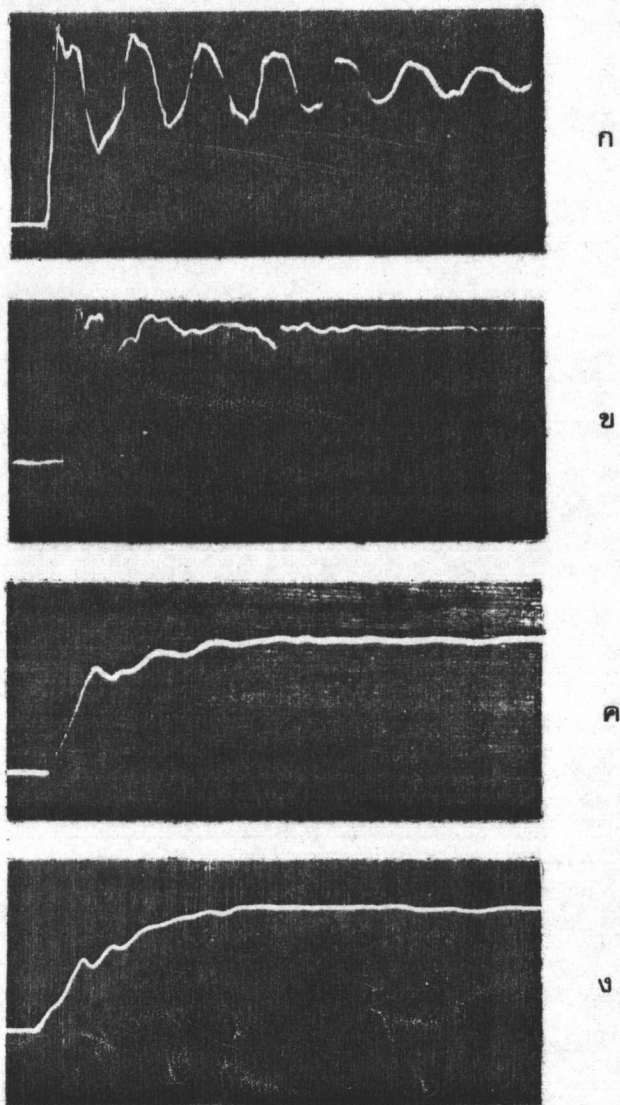
ในที่นี้ทดลองหาผลกระทบของความต้านทานหน่วงที่มีต่อระบบการวัดและทดลองดัดแปลงโวลเตจดีไวเคอร์เป็นแบบมิซัลด์ ดังรายละเอียดดังนี้

ก) ผลของความต้านทานหน่วงที่มีต่อผลตอบสนองของระบบการทดลองได้เปลี่ยนค่าความต้านทานหน่วง ที่ปลายขาเข้าของสายนำไฟแรงสูงเป็นค่าต่างๆ คือ 0, 75, 250 และ 375 โอห์ม ผลการทดลองแสดงไว้ในรูป 4.4 ผลปรากฏว่า ถ้าหากไม่มีความต้านทานหน่วง ผลตอบสนองจะแกว่งดังในรูป ก. ถ้าเพิ่มความต้านทานหน่วงเป็น 75 โอห์ม จะพบว่าผลตอบสนองดีขึ้นโดยมีการแกว่งน้อยลงดังรูป ข เพื่อขจัดการแกว่งให้หมดไปจึงเพิ่มความต้านทานเป็น 250 โอห์มและ 375 โอห์ม ตามลำดับ ผลปรากฏว่าการแกว่งหายไป แต่ทำให้เวลาตอบสนองมากขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานหน่วงหลายๆค่าดังนี้ทำให้เห็นได้ว่าถ้าจะให้ได้ผลตอบสนองที่ดีนั้นจะต้องเลือกความต้านทานหน่วงที่เหมาะสม

จากออสซิลโลแกรมผลตอบสนองของระบบวัดจะเห็นว่า ความต้านทานหน่วง 375 โอห์ม ให้ผลตอบสนองที่ดี ความต้านทานหน่วงที่ใช้มีค่าต่างจากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำในวงจรที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งเท่ากับ 305 โอห์ม แต่ความแตกต่างนี้ไม่มีผลกับผลตอบสนองมากนัก

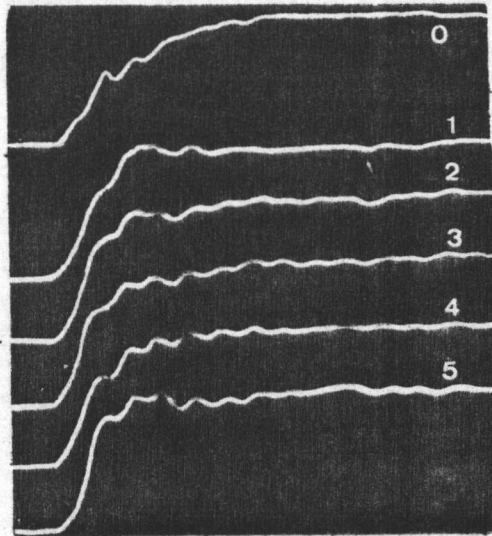
ข) ผลของการใส่ชิลด์ที่มีต่อผลตอบสนองของระบบวัด

เพื่อทดลองหาผลกระทบของการใส่ชิลด์ จึงได้เลือกผลตอบสนองในรูป 4.4 ง. ซึ่งไม่มีชิลด์โดยใช้ชิลด์รูปแบบต่างๆ กันคือ ชิลด์คือ เลกโตรดแบบวงแหวนอลูมิเนียม (ดังในรูป 3.10) อ่างกะทะ และฝาโอ่ง (ดังในรูป 3.11) ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูป 4.5



รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์ที่มีภาคแรงสูงเป็นลวดความต้านทาน มีความต้านทานหน่วง R_d อยู่ที่ปลายขาเข้าของสายนำไฟแรงสูง

ก) $R_d = 0$		สเกลแกนเวลา	50 nS/div.
ข) $R_d = 75$ โอห์ม		สเกลแกนเวลา	50 nS/div.
ค) $R_d = 250$ โอห์ม		สเกลแกนเวลา	20 nS/div.
ง) $R_d = 375$ โอห์ม		สเกลแกนเวลา	20 nS/div.



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบระหว่างไม่มีและมีซิลด์อี เลกโตรดแบบต่างๆ มีความต้านทานหน่วย R_d 375 โอห์ม ที่ปลายขาเข้าของสายนำไฟแรงสูง สเกลแกนเวลา 20 nS/div.

- 0 เมื่อไม่มีซิลด์อี เลกโตรด
- 1 เมื่อใช้ซิลด์อี เลกโตรดวงแหวนดังรูป 3.10 ติดตั้งดังรูป 3.12
- 2 เมื่อใช้อ่างดังรูป ก ในรูป 3.11
- 3 เมื่อใช้กะทะดังรูป ข ในรูป 3.11
- 4 เมื่อใช้ซิลด์อี เลกโตรดวงแหวนดังรูป 3.10 ติดตั้งเสมอระดับบนของโวลเตจดีไวเดอร์
- 5 เมื่อใช้ฝาโอ่งดังรูป ค ในรูป 3.11

จากออสซิลโลแกรมผลตอบสนองของระบบวัดในรูป 4.5 แสดงให้เห็นเด่นชัดว่าการใส่ซิลด์อี เลกโตรดไม่ว่าแบบใดๆ ในการทดลองนี้มีผลต่อผลตอบสนอง กล่าวคือเวลาตอบสนองจะดีขึ้น เส้นหมายเลข 0 ซึ่งเป็นผลตอบสนองเมื่อไม่มีซิลด์ได้เวลาตอบสนองของระบบ 17 nS เมื่อใส่ซิลด์ เวลาตอบสนองจะเป็น 10 nS

4.3.4 ผลตอบสนองของโวลเตจติไวเคอร์ที่มีความต้านทานภาคแรงสูงเป็นแบบฟิล์ม

เพื่อให้สะดวกแก่การเปรียบเทียบผลของการทดลองจึงเรียกโวลเตจติไวเคอร์ที่มีความต้านทานภาคแรงสูงเป็นแบบลวดความต้านทานเป็นโวลเตจติไวเคอร์แบบที่ I และที่มีความต้านทานภาคแรงสูงเป็นแบบฟิล์มโลหะออกไซด์เป็นแบบที่ II และที่มีความต้านทานภาคแรงสูงเป็นแบบฟิล์มคาร์บอนเป็นแบบที่ III ซึ่งแต่ละแบบมีค่าความต้านทานต่างๆ กันดังแสดงไว้ในตาราง 4.1 พร้อมกับได้แสดงค่า R_d และ R_m ที่ใช้สำหรับการทดลองโวลเตจติไวเคอร์แบบนี้ๆ ด้วย

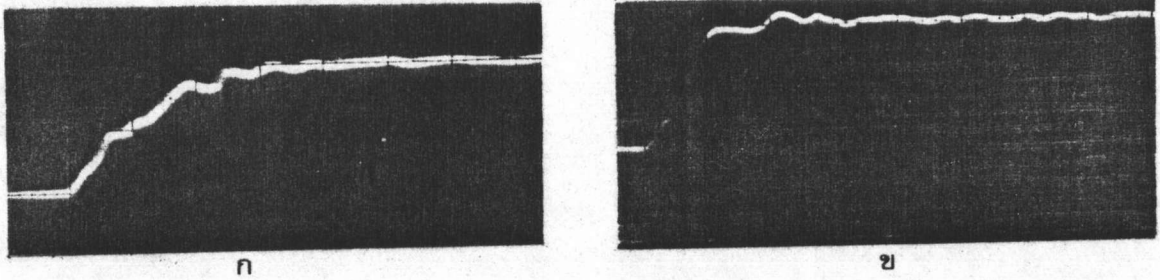
ตารางที่ 4.1

โวลเตจติไวเคอร์แบบต่างๆ ที่สร้างขึ้น

แบบ	ความต้านทานภาคแรงสูง		ความต้านทานภาคแรงต่ำ		ความต้านทานท่วง		ความต้านทานแมทซิ่ง	
	ชนิด	$R_1 (\Omega)$	ชนิด	$R_2 (\Omega)$	ชนิด	$R_d (\Omega)$	ชนิด	$R_m (\Omega)$
I	ลวดความต้านทาน	7170	ฟิล์มโลหะออกไซด์	21.7	ลวดต้านทาน	375	ฟิล์มโลหะออกไซด์	75
II	ฟิล์มโลหะออกไซด์	10280	ฟิล์มโลหะออกไซด์	21.7	ลวดต้านทาน	375	ฟิล์มโลหะออกไซด์	75
III	ฟิล์มคาร์บอน	9870	ฟิล์มคาร์บอน	22.2	ลวดต้านทาน	375	ฟิล์มโลหะออกไซด์	75

ก) ความต้านทานแบบฟิล์มโลหะออกไซด์

การทดลองหาผลตอบสนองของโวลเตจติไวเคอร์แบบนี้เช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.3.3 โดยมีความต้านทานหน่วง 375 โอห์มที่ปลายขาเข้าของสายนำไฟแรงสูง ทดลองกับโวลเตจติไวเคอร์ทั้งแบบไม่มีซิลด์ และมีซิลด์อีเล็กโทรดแบบวงแหวนอลูมิเนียมติดตั้งดังรูป 3.12 ข ผลตอบสนองที่ทดลองได้แสดงไว้ในรูป 4.6



รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจติไวเคอร์ เมื่อความต้านทานภาคแรงสูงเป็นแบบฟิล์มโลหะออกไซด์ มีความต้านทานหน่วง 375 โอห์มที่ปลายขาเข้าของสายนำไฟแรงสูง สเกลแกนเวลา 20 nS/div.

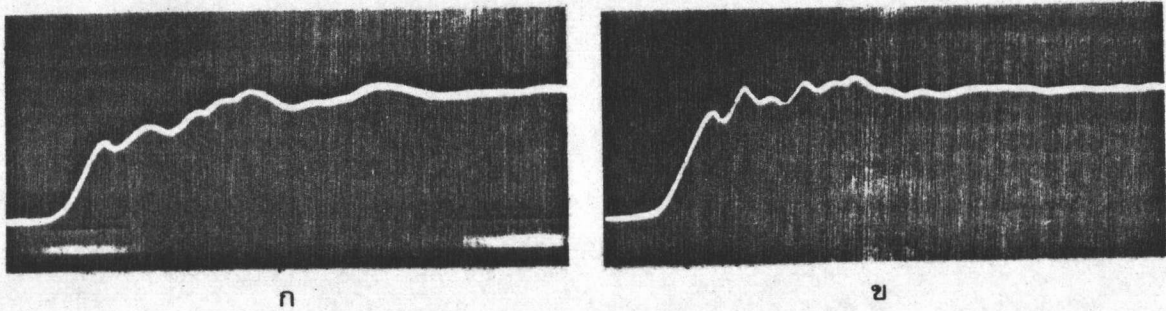
ก. เมื่อไม่มีซิลด์

ข. มีซิลด์อีเล็กโทรดดังรูป 3.12 ข

จากออสซิลโลแกรมในรูป ก. คือเมื่อไม่มีซิลด์ได้เวลาตอบสนอง 20 nS เมื่อใส่ซิลด์เวลาตอบสนองจะเป็น 10 nS ดังออสซิลโลแกรมในรูป ข.

ข) ความต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน

ทดลองหาผลตอบสนองของโวลเตจติไวเคอร์แบบนี้เช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.3.3 โดยมีความต้านทานหน่วง 375 โอห์มที่ปลายขาเข้าของสายนำไฟแรงสูงเช่นกัน และทดลองกับโวลเตจติไวเคอร์ทั้งแบบไม่มีซิลด์และมีซิลด์อีเล็กโทรดดังรูป 3.12 ข ผลตอบสนองที่ทดลองได้ดังแสดงในรูป 4.7



รูป 4.7 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเคอร์ เมื่อมีความต้านทานภาคแรงสูงเป็นแบบฟิล์มคาร์บอน มีความต้านทานหน้า 375 โอห์ม ที่ปลายขาเข้าของสายนำไฟแรงสูง สเกลแกนเวลา 20 nS/div.

ก) เมื่อไม่มีซิลด์

ข) มีซิลด์อีเล็กโทรดตั้งรูป 3.12 ข

จากออสซิลโลแกรมในรูป ก. คือ เมื่อไม่มีซิลด์ได้เวลาตอบสนอง 21 nS เมื่อใส่ซิลด์เวลาตอบสนองจะเป็น 11 nS ดังในรูป ข.

เวลาตอบสนองเมื่อใช้ความต้านทานภาคแรงสูงเป็นแบบฟิล์มจะได้ผลใกล้เคียงกับเวลาตอบสนอง เมื่อใช้ความต้านทานภาคแรงสูงเป็นแบบเส้นลวดความต้านทาน ดังที่ได้แสดงผลเปรียบเทียบไว้ในตาราง 4.2

4.3.5 การหาเวลาตอบสนองโดยการคำนวณ

ในระบบวัดถ้าหาค่าเวลาตอบสนองของสายนำไฟแรงสูงออก และเวลาตอบสนองของสายเคเบิลวัดและออสซิลโลสโคปมีค่าน้อยเวลาตอบสนองที่ได้ก็คือ เวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเคอร์ ในทางทฤษฎีอาจคำนวณเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเคอร์ตามวิธีของไออีซี {2} ในกรณีที่โวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานที่มีค่าสเตรนคักแทนซ์ต่ำ ไม่มีผลกระทบจากภาคแรงต่ำ และไม่มีซิลด์ได้จากสมการ (2.9) ดังนี้

$$T = \frac{R C_e}{6}$$

เมื่อ C_e คือ สเตรคแพซิแตนซ์ของโวลเตจดีไวเคอร์ ซึ่งอาจคำนวณได้จาก {3}

$$C'_e \approx \frac{55.7}{\ln\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{h}{d}\right)} \quad \text{pF/m}$$

เมื่อ C'_e คือ สเตรคะแบซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความสูง

h คือ ความสูงของโวลเตจดีไวเคอร์ในแนวดิ่ง มีหน่วยเป็นเมตร

d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของโวลเตจดีไวเคอร์ มีหน่วยเป็นเมตร

ค่าของ C'_e ขึ้นอยู่กับ $\frac{h}{d}$ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

h/d	10	20	40	90	
C'_e	~22	~17	~14	~12	pF/m

ความสูงของโวลเตจดีไวเคอร์ที่ออกแบบ คือ 1.20 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.14 เมตร
 คำนวณสเตรคะแบซิแตนซ์ C'_e ได้ประมาณ 24 pF/m ฉะนั้นจึงคำนวณเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเคอร์ได้ดังที่แสดงไว้ในตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2

เวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเคอร์ที่สร้างขึ้น

แบบ	เวลาตอบสนองของระบบวัด T (nS)		เวลาตอบสนองของระบบวัด ไม่มีสายนำ T_t (nS)		เวลาตอบสนองของ โวลเตจดีไวเคอร์แบบ ไม่มีซิลด์ (คำนวณ) nS
	แบบไม่มีซิลด์	แบบมีซิลด์	แบบไม่มีซิลด์	แบบมีซิลด์	
I	17	10	27	20	28
II	20	10	30	20	41
III	21	11	31	21	39

หมายเหตุ เวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเคอร์แบบมีซิลด์ทำได้จากการทดลองเฉพาะซิลด์อีเลกโทรด
 แบบใดๆ ไม่มีการหาโดยวิธีการ คำนวณ

4.4 การหาอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเคอร์

ผลการทดลองผลตอบสนองแรงดันรูปคลื่นทำให้ทราบค่าความต้านทานหน่วงที่เหมาะสม เมื่อทราบค่าความต้านทานหน่วง ความต้านทานภาคแรงสูง ความต้านทานภาคแรงต่ำ และเสิร์จอิมพีแดนซ์ของระบบวัด จึงหาอัตราส่วนแรงดันของระบบได้ด้วยวิธีดังต่อไปนี้

- ก) โดยวิธีคำนวณ
- ข) โดยการวัดแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกพร้อมกัน
- ค) โดยใช้วงจรมัดจเทียบค่าแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเคอร์ กับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเคอร์มาตรฐานที่ปรับอัตราส่วนแรงดันได้

4.4.1 อัตราส่วนแรงดันโดยการคำนวณ

เมื่อทราบค่าความต้านทานของแต่ละส่วนในระบบวัด จะคำนวณหาอัตราส่วนแรงดัน a ของโวลเตจดีไวเคอร์ได้จากสมการ (3.10) ดังนี้

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

จากข้อมูลค่าความต้านทานของโวลเตจดีไวเคอร์แต่ละแบบ (I, II และ III) ดังที่แสดงไว้ในตาราง 4.1 จะได้อัตราส่วนแรงดันดังที่แสดงผลไว้ในตาราง 4.3

4.4.2 อัตราส่วนแรงดันโดยการวัดแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกพร้อมกัน

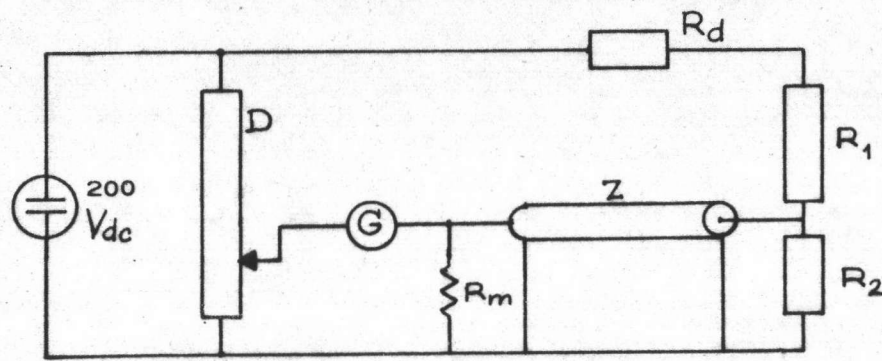
การหาอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานวิธีที่สะดวกอีกวิธีหนึ่ง ทำโดยป้อนแรงดันไฟตรงประมาณ 200 โวลต์ เข้าทางขาเข้าของโวลเตจดีไวเคอร์ วัดแรงดันทั้งขาเข้าและขาออกพร้อมกันโดยใช้โวลต์มิเตอร์สองเครื่องที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน ในที่นี้ใช้โวลต์มิเตอร์แบบตัวเลข DM 44 ของ tektronix 2 เครื่อง วัดแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกในเวลาเดียวกัน คำนวณอัตราส่วนแรงดันได้จากสมการ (2.5) ดังนี้

$$a = \frac{V_1}{V_2}$$

ผลการทดลองวัดอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเคอร์แบบต่างๆ ที่สร้างขึ้น (ดังในตารางที่ 4.1) แสดงเปรียบเทียบไว้ในตาราง 4.3

4.4.3 อัตราส่วนแรงดันโดยใช้วงจรบริดจ์เทียบค่าแรงดันขาออกของโวลต์เตจติไวเตอร์ กับแรงดันขาออกของโวลต์เตจติไวเตอร์มาตรฐานที่ปรับอัตราส่วนแรงดันได้

การทดลองหาอัตราส่วนแรงดันของโวลต์เตจติไวเตอร์โดยวิธีนี้ให้ผลถูกต้องดีกว่าสองวิธีแรก ซึ่งทำได้โดยบ่อนแรงดันไฟตรงขนาดประมาณ 200 โวลต์ ให้แก่โวลต์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทานที่ต้องการวัดและโวลต์เตจติไวเตอร์มาตรฐานพร้อมกัน โวลต์เตจติไวเตอร์มาตรฐานเป็นแบบปรับอัตราส่วนได้ เช่น decade voltage divider ต่อแรงดันขาออกของโวลต์เตจติไวเตอร์ผ่านกัลวาโนมิเตอร์ ดังแสดงในวงจรรูป 4.8



รูป 4.8 การหาอัตราส่วนแรงดันโดยใช้วงจรบริดจ์

เมื่อ D คือ decade voltage divider

G คือ กัลวาโนมิเตอร์

ในที่นี้ใช้ decade voltage divider type 1455-BH ser.319 ของ บริษัท เยนเนอร์ลเรดิโอ ความต้านทาน 100 กิโลโอห์ม เป็นโวลต์เตจติไวเตอร์มาตรฐาน เมื่อปรับอัตราส่วนแรงดันของโวลต์เตจติไวเตอร์มาตรฐานจนทำให้เข็มของกัลวาโนมิเตอร์ชี้ศูนย์หรือชี้ต่ำสุด เท่าที่จะเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ จะได้ว่าอัตราส่วนแรงดันของโวลต์เตจติไวเตอร์ที่ต้องการทราบเท่ากับอัตราส่วนของโวลต์เตจติไวเตอร์มาตรฐานขณะนั้นพอดี ผลการทดลองหาอัตราส่วนแรงดันของโวลต์เตจติไวเตอร์ที่สร้างขึ้น (ในตาราง 4.1) โดยวิธีนี้แสดงเปรียบเทียบไว้ในตาราง 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3

อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเคอร์ที่สร้างขึ้น

โวลเตจดีไวเคอร์แบบ	อัตราส่วนแรงดัน		
	จำนวน	วัตต์แรงดัน	วงจรถบรีดจ์
I	449.3	448.2	449.4
II	634.1	631.5	634.1
III	599.1	594.9	598.8

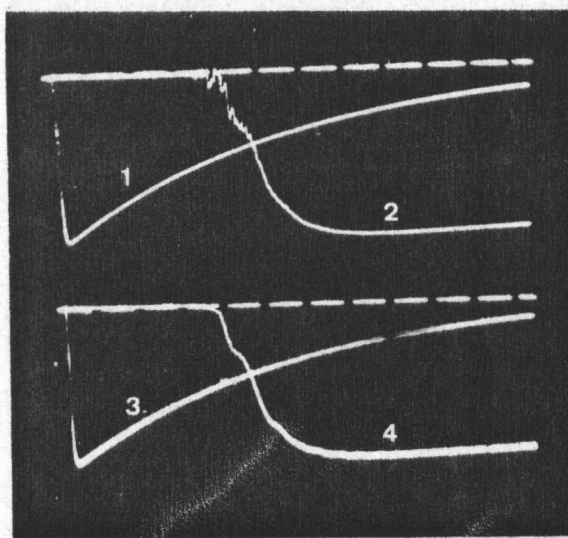
ผลจากการทดลองหาอัตราส่วนแรงดันทั้งสามวิธีดังที่แสดงไว้ในตาราง 4.3 จะเห็นได้ว่า ได้ผลถูกต้องเหมือนกันทุกวิธีคือ ต่างกันไม่เกิน 0.1 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามมาตรฐานไออีซีได้แนะนำว่าการหาอัตราส่วนแรงดันนั้น วิธีใช้วงจรถบรีดจ์เปรียบเทียบในหัวข้อ 4.4.3 จะให้ผลถูกต้องดีกว่าวิธีอื่นๆ

4.5 การใช้งาน

ผลการทดลองตามที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมดนั้น เป็นผลที่ได้จากการทดสอบด้วยแรงดันต่ำคือ ไม่เกิน 200 โวลต์ แต่โวลเตจดีไวเคอร์ที่ออกแบบนี้มีขนาดแรงดันที่กำหนด 300 กิโลโวลต์ เพื่อให้เห็นผลของการใช้งานจริงจึงได้ทำการทดสอบด้วยแรงดันสูงจนถึงค่าแรงดันที่กำหนด

4.5.1 การทดลองใช้งานโดยไม่มีความต้านทานหน่วงในสายนำไฟแรงสูง

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเคอร์นั้นจำเป็นต้องใช้ความต้านทานหน่วงต่ออยู่ในวงจรแรงสูงเพื่อทำหน้าที่หน่วงไม่ให้เกิดการแกว่ง ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นเด่นชัดถึงการที่ไม่ใช้ความต้านทานหน่วงจะทำให้เกิดการแกว่งที่ส่วนหน้าของคลื่นที่ความถี่สูงดัง เส้นหมายเลข 2 ในรูป 4.9 ซึ่งการแกว่งนี้จะหมดไปเมื่อใช้ความต้านทานหน่วง ดังเส้นหมายเลข 4



รูป 4.9 ผลกระทบของความต้านทานหน่วงในสายนำไฟแรงสูง

เส้นหมายเลข 1 และ 3 ใช้สเกลแกนเวลา 10 $\mu\text{S}/\text{div}$.

เส้นหมายเลข 2 และ 4 ใช้สเกลแกนเวลา 500 nS/div .

เส้นหมายเลข 1 และ 2 เป็นรูปคลื่นแรงดันเมื่อไม่มีความต้านทานหน่วงในสายนำ

เส้นหมายเลข 3 และ 4 เป็นรูปคลื่นแรงดันเมื่อมีความต้านทานหน่วง 375 โอห์ม
ในสายนำ

4.5.2 ความคงทนต่อแรงดันที่กำหนดของโวลเตจติไวเคอร์

ในบทที่ 3 ได้กล่าวไว้แล้วว่าขีดจำกัดความสามารถของโวลเตจติไวเคอร์ คือ ความคงทนต่อความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานสูญเสียในตัวความต้านทาน ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันใช้งาน ดังนั้นเพื่อตรวจสอบความคงทนต่อความร้อนของโวลเตจติไวเคอร์ที่สร้างขึ้นทั้ง 3 แบบในตาราง 4.1 จึงทดลองใช้วัฏแรงดันอิมพัลส์ตามค่าที่กำหนด 300 กิโลโวลต์ โดยบั่นต่อเนื่องกันอย่างน้อย 5 ครั้ง ดังผลการตรวจสอบภาพออสซิลโลแกรมดังในตาราง 4.4 ผลปรากฏว่าโวลเตจติไวเคอร์ความต้านทานแบบที่ I สามารถใช้งานที่แรงดันที่กำหนดได้ดีโดยวินิจฉัยจากรูปคลื่นแรงดันทั้ง 5 ครั้ง มีลักษณะคงเดิมซึ่งตรงกันข้ามกับโวลเตจติไวเคอร์ความต้านทานแบบฟิล์มโลหะออกไซด์แบบที่ II ตาราง 4.1 ซึ่งขนาดของรูปคลื่นแรงดันจะลดลงเมื่อบั่นแรงดันครั้งต่อไป เพราะค่าความต้านทานภาคแรงสูงเพิ่มขึ้นตามความร้อนที่เกิดขึ้น เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองได้นำเอาตัวความต้านทานมาพิจารณาจะพบว่าตัวความต้าน

ทานเกิดชำรุดเสียหายตามภาพถ่ายในรูป 3.4 ส่วนโวลเตจดีไวเซอร์ความต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอนแบบที่ III ในตาราง 4.1 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่าไม่สามารถใช้วัดแรงดันตามที่กำหนดได้ เพราะป้อนแรงดันตามที่กำหนดเพียงครั้งเดียวก็เกิดความเสียหาย ทั้งนี้เนื่องจากตัวความต้านทานไม่สามารถจะทนความร้อนได้ (ดูภาพถ่ายในรูป 3.6)

ข้อวินิจฉัยอีกประการหนึ่งที่ยืนยันให้เห็นได้ชัดเจนว่าโวลเตจดีไวเซอร์แบบลดความต้านทานดีกว่าแบบอื่น คือ ผลการทดลองวัดอัตราส่วนแรงดันซึ่งในที่นี้ใช้เทียบกับโวลเตจดีไวเซอร์มาตรฐานขนาด 1200 กิโลโวลต์ แบบความต้านทานมีซิลด์ของห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยต่อโวลเตจดีไวเซอร์ทั้งสองขนานกันเพื่อใช้วัดแรงดันเดียวกันในเวลาพร้อมๆ กัน ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันอิมพัลส์ได้จากสมการ

$$\text{ความคลาดเคลื่อน} = \frac{V - V_{\text{ref}}}{V_{\text{ref}}} \times 100 \%$$

เมื่อ V คือ แรงดันที่วัดได้โดยใช้โวลเตจดีไวเซอร์ที่สร้างขึ้น

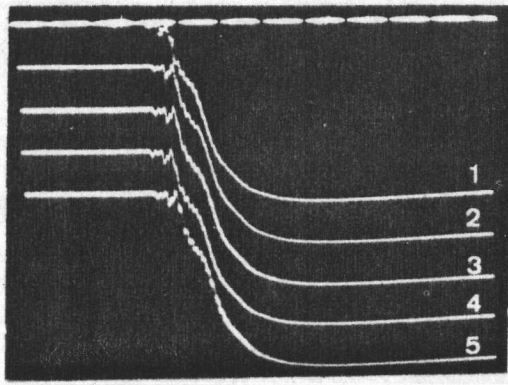
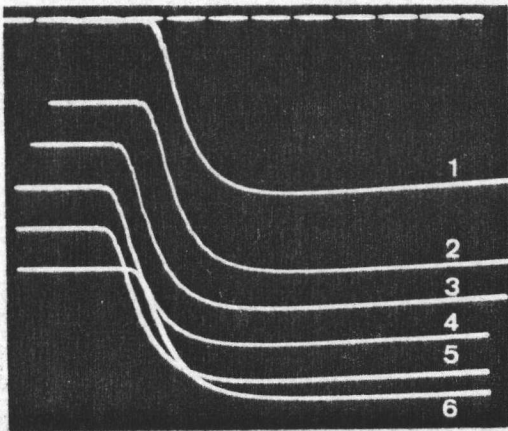
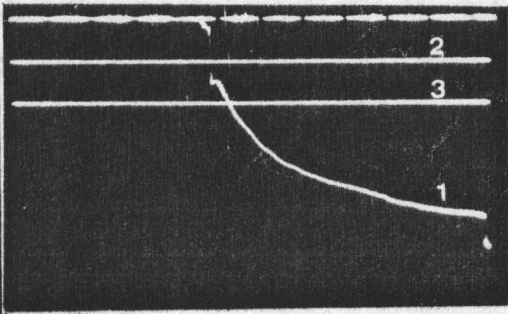
V_{ref} คือ แรงดันที่วัดได้โดยใช้โวลเตจดีไวเซอร์ขนาด 1200 กิโลโวลต์

ผลการทดสอบความคลาดเคลื่อนการวัดแรงดันของโวลเตจดีไวเซอร์ทั้ง 3 แบบแสดงไว้ในตาราง 4.4 พบว่าโวลเตจดีไวเซอร์ความต้านทานแบบเส้นลวดมีค่าความคลาดเคลื่อนคงที่ คือ 2.32 เปอร์เซ็นต์ ส่วนโวลเตจดีไวเซอร์ความต้านทานแบบฟิล์มโลหะออกไซด์ค่าความคลาดเคลื่อนสูงและจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดัน ส่วนโวลเตจดีไวเซอร์แบบความต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอนหาไม่ได้ เพราะเกิดการชำรุดจากการป้อนแรงดันครั้งแรก

การทดสอบโวลเตจดีไวเซอร์แบบที่ I ทำโดยไม่ได้ใส่ความต้านทานหน่วงไว้ในสายนำไฟฟ้าแรงสูง จึงเกิดการแกว่งที่ส่วนหน้าของคลื่น ส่วนการทดสอบโวลเตจดีไวเซอร์แบบที่ II และ III มีความต้านทานหน่วง 375 โอห์ม อยู่ที่ปลายขาเข้าของสายนำไฟฟ้าแรงสูง จึงไม่เกิดการแกว่งขึ้นดังกล่าวแล้วในหัวข้อ 4.5.1

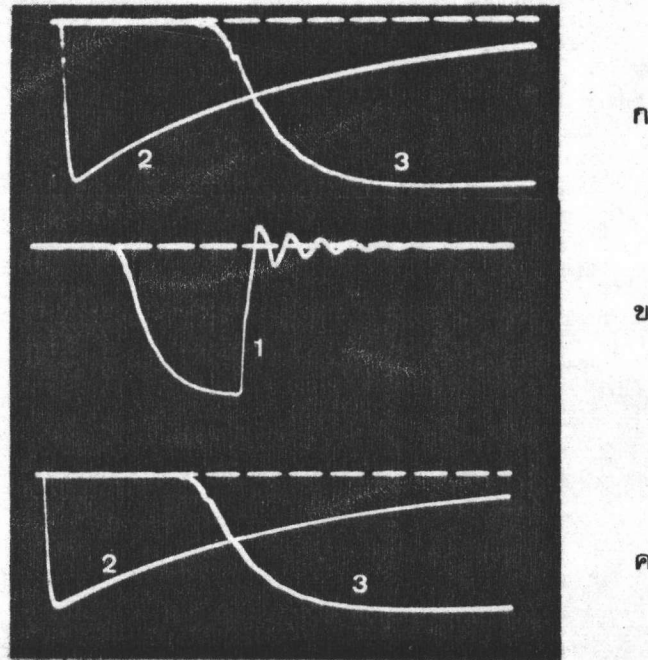
ตารางที่ 4.4

เปรียบเทียบผลการทดสอบการวัดแรงดันตามกำหนด

แบบ	V (กิโลโวลต์)	V _{ref} (กิโลโวลต์)	ความคลาดเคลื่อน (ร้อยละ)	ออสซิลโลแกรม (สเกลเวลา 500 nS/div.)
I	293	300	2.33	
	296	303	2.31	
	293	300	2.33	
	294	301	2.32	
	294	301	2.32	
II	214	303	29.4	
	207	302	31.4	
	204	302	32.4	
	187	300	37.7	
	164	300	45.3	
III	-	300	-	

4.5.3 ใช้โวลเตจดีไวเคอร์วัดแรงดันทดสอบลูกถ้วย

จากผลการทดสอบในข้อ 4.5.1 และ 4.5.2 แสดงให้เห็นว่าโวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานเส้นลวด (แบบที่ I) เป็นแบบที่เหมาะสมที่จะใช้วัดแรงดันอิมพัลส์ จึงใช้โวลเตจดีไวเคอร์แบบนี้ทำการทดลองวัดแรงดันทดสอบลูกถ้วยจนกระทั่งเกิดการวาบไฟตามผิว ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด ในทางภาคปฏิบัติถือกันว่าการทดสอบด้วยแรงดันรูปคลื่นตัดนั้นเป็นการทดสอบคุณภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดสนามไฟฟ้ารวดเร็วด้วย ในที่นี้ทดสอบให้เกิดแรงดันรูปคลื่นตัดที่ขนาดแรงดัน 265 กิโลโวลต์ ผลปรากฏว่าหลังการทดสอบแล้วโวลเตจดีไวเคอร์ยังใช้งานได้ตามปกติ ดังแสดงในรูป 4.10



รูป 4.10 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทดลอง

เส้นหมายเลข 1 และ 3 สเกลแกนเวลา 500 nS/div.

เส้นหมายเลข 2 สเกลแกนเวลา 10 nS/div.

ก) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มที่ใช้ทดสอบลูกถ้วย

ข) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด เมื่อ เกิดการวาบไฟตามผิวลูกถ้วย

ค) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม เมื่อ ไม่มีลูกถ้วยและหลังจากผ่านการวัดแรงดัน

อิมพัลส์รูปคลื่นตัดแล้ว