บทที่ 3

การออกแบบและสร้างมัลติเปิลซ็อบปิ้งแกป

3.1 บทนำ

การเลือกขนาดแรงดันอิมพัลส์ที่นำมาใช้กำหนดเป็นขนาดการออกแบบและสร้างมัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปนี้ เลือกออกแบบและสร้างให้ใช้กับแรงดันอิมพัลส์ขนาด 400 กิโลโวลต์ ดังที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 1 หน้าที่หลักของมัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปที่จะต้องนำมาพิจารณาประกอบการออกแบบมีดังนี้

การทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด

ใช้เป็นโวลเตจดิไวเดอร์วัดแรงดันอิมพัลส์

ใช้เป็นโหลดคะแปซิเตอร์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ก) การทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด มัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปที่ออกแบบนี้จะต้องสามารถทำให้เกิดการตัดคลื่นในเวลาช่วงคลื่นตัดที่ต้องการได้อย่างถูกต้องและเที่ยงตรง โดยมีความผิดพลาดของเวลาช่วงคลื่นตัดอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด นั่นหมายถึงว่าจะต้องมีการกระจัดกระจายเวลาการตัดน้อยที่สุด ดังได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 นอกจากนี้ควรมีพิสัยการกระตุ้นกว้างๆ จึงจะดี เพื่อไว้ใช้สำหรับศึกษาค้นคว้า และวิจัยเกี่ยวกับปรากฏการณ์ต่างๆ ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดได้อย่างกว้างขวาง ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงจะใช้พิสัยการกระตุ้นอยู่ในช่วงที่จำกัดช่วงหนึ่ง คือ ช่วงที่การกระจัดกระจายเวลาการตัดน้อยกว่า ± 0.1 ไมโครวินาที {6} การออกแบบครั้งนี้คำนึงถึงการนำไปใช้กับการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงเป็นหลัก คือ จะต้องทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดภายในช่วงเวลา 2 ถึง 6 ไมโครวินาที ตามกำหนดของมาตรฐานสากลไออีซี { 8 } ว่าด้วยการทดสอบหม้อแปลงด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด

ข) ใช้เป็นโวลเตจดิไวเดอร์วัดแรงดันอิมพัลส์ การวัดแรงดันอิมพัลส์เป็นผลได้ของมัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปอย่างหนึ่งซึ่งเป็นหน้าที่รองจากข้อ ก. โดยเหตุที่ว่าคอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดันของสปาร์กแกปที่ใช้ควบคุมการกระจายแรงดันให้สม่ำเสมอตลอดทุกแกปนั้น ถ้าหากมีการออกแบบโดยใช้หลักการของโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงต่ำ ดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2

จะสามารถใช้คอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดันของสปาร์กแกปนี้ เป็นภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ได้เป็นอย่างดี และถ้าออกแบบภาคแรงต่ำให้ได้ลักษณะสมบัติที่เหมาะสมจะใช้เป็นโวลเตจดิไวเดอร์วัดแรงดันได้หลายลักษณะ เช่น แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า แรงดันอิมพัลส์แบบสวิทชิ่ง และแรงดันกระแสสลับ เป็นต้น

ค) ใช้เป็นโหลดคะแปซิเตอร์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ หน้าที่นี้จะเป็นผลได้อย่างที่สองของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป เพราะว่าคอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดันของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปประกอบด้วยคะแปซิเตอร์แรงสูงที่มีค่าความต้านทานหน่วงต่ำ จึงสามารถใช้เป็นโหลดคะแปซิเตอร์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วย

เหตุผลทั้งสามข้อที่กล่าวมานี้จะนำมาใช้เป็นบรรทัดฐานในการออกแบบมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปที่จะสร้างขึ้น ดังได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 ว่ามัลติเปิลช็อบปิ้งแกป ประกอบด้วยส่วนสำคัญต่างๆ หลายส่วนและต้องต่อขนานอยู่กับอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ ดังนั้นแรงดันทั้งหมดที่ป้อนให้อุปกรณ์ทดสอบ จะปรากฏคร่อมมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปด้วย จึงต้องออกแบบส่วนประกอบต่างๆ อย่างเหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดการดิสชาร์จทำลายหรือเกิดวาบไฟตามผิว นอกจากนั้นยังคำนึงถึงคุณสมบัติทางกลของโครงสร้างต่างๆ ด้วย เพราะมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปจะมีขนาดใหญ่โตมากตามขนาดของแรงดัน รายละเอียดการออกแบบได้กล่าวเป็นลำดับขั้นดังนี้

การออกแบบโครงสร้างทั่วไปและการฉนวน

การออกแบบคอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดัน

การออกแบบภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์

การออกแบบส่วนประกอบอื่นๆ

3.2 การออกแบบโครงสร้างทั่วไปและการฉนวน

มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปมีลักษณะเป็นชั้นๆ (stage) {6} แต่ละชั้นมีลักษณะเหมือนกัน ยกเว้นชุดล่างสุดที่ต้องออกแบบไว้ให้แตกต่างจากชั้นอื่นๆ เพื่อให้ประกอบกับภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์ได้ การที่แต่ละชั้นมีลักษณะเหมือนกันทำให้สะดวกต่อการออกแบบสร้าง ประกอบติดตั้งและซ่อมแซม ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถใช้งานทีละส่วนเฉพาะชั้นต้นๆ เมื่อแรงดันต่ำ หรือเพิ่มจำนวนชั้นขึ้นไปอีกเมื่อใช้กับแรงดันสูงขึ้น ฉะนั้นการออกแบบลักษณะนี้จะมีความคล่องตัวในการทำงานเป็นอย่างมาก

มัลติเปิลช็อบปิ้งแกป ต้องมีระยะการฉนวนเพียงพอไม่ให้เกิดการวาบไฟตามผิว เมื่อแรงดันสูงถึงค่ากำหนด 400 กิโลโวลต์ ระยะการฉนวนเป็นตัวกำหนดความสูงของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป ซึ่งต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวของท่อฉนวน จากเทคนิคไฟฟ้าแรงสูงทั่วๆ ไป กำหนดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในอาคารที่ภาวะความชื้นน้อยไม่ควรเกิน 4 กิโลโวลต์ต่อเซ็นติเมตรในอากาศ {10} การกำหนดการฉนวนจึงถือค่านี้เป็นเกณฑ์ เมื่อออกแบบสร้างมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปขนาด 400 กิโลโวลต์ ระยะการฉนวนจึงต้องไม่ต่ำกว่า 100 เซ็นติเมตร ถ้าคำนึงถึงภาวะที่ความชื้นสูงขึ้นและค่าความปลอดภัยของการฉนวนอีกประการหนึ่ง จึงควรออกแบบให้ระยะการฉนวนเพิ่มขึ้นอีก 50–100 เปอร์เซ็นต์ ถ้ากำหนดค่าความปลอดภัยเท่ากับ 2 เท่า ระยะการฉนวนมีค่าประมาณ 200 เซ็นติเมตร แต่ความสูงของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป คือ ความสูงของระยะการฉนวนรวมกับระยะของโลหะตัวนำที่ยึดระหว่างชั้น ควรจะมีขนาดประมาณความสูงของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อให้เหมาะสมในการใช้งานและทำให้เข้าชุดกัน ความสูงของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 400 กิโลโวลต์ อยู่ในช่วงประมาณ 220–230 เซ็นติเมตร* มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปที่ออกแบบสร้างขึ้นในที่นี้เมื่อรวมระยะการฉนวน ระยะตัวนำโลหะระหว่างชั้น และฐานล้อ (ดูรายละเอียดการสร้างในภาคผนวก) มีความสูง 225 เซ็นติเมตร จากขนาดของแรงดันและโครงสร้างความสูงนี้ จะนำมาพิจารณาในการเลือกจำนวนสปาร์กแกปของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปที่เหมาะสม ในการออกแบบนี้ได้เลือกสปาร์กแกปทั้งหมดจำนวน 4 คู่ เพราะจะเหมาะสมกับแรงดันอิมพัลส์ขนาด 400 กิโลโวลต์ และสามารถแสดงให้เห็นถึงการทำงานของแกปหลายๆ แกปได้ชัดเจนพอ ฉะนั้นแกปแต่ละคู่ควรจะรับแรงดันสูงสุดประมาณ 100 กิโลโวลต์ โดยมีระยะห่างฉนวนที่จับยึดแกปแต่ละคู่นี้ประมาณ 50 เซ็นติเมตร ซึ่งเป็นค่าระยะการฉนวนที่ไม่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว และเหมาะสมในการทำโครงสร้างการจับยึดทางกลของส่วนต่างๆ จากตัวเลขนี้ได้นำไปใช้ในการออกแบบโดยกำหนดการออกแบบเป็นชั้นๆ ละ 100 กิโลโวลต์

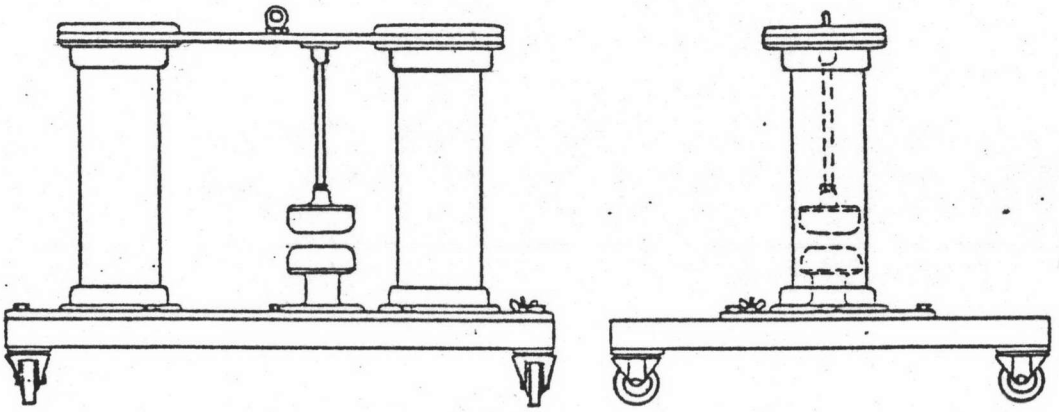
แกปแต่ละคู่จะมีคอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดันรองรับอยู่ด้านหนึ่ง และจะมีคอลัมน์รองรับ (support column) ซึ่งมีความสูงเท่ากันอยู่อีกทางด้านหนึ่ง มีแผ่นเหล็กชุบโครเมียมปิดหัวท้ายเป็นตัวยึดอีเลคโตรด ท่อฉนวนที่ใช้เป็นท่อพีวีซีอย่างหนาซึ่งเคยมีผู้ใช้เป็นกระบอกฉนวนมาก่อนแล้วซึ่งใช้ได้ผลดี {1} การออกแบบปิดหัวท้ายทำแบบกันรั่วกันซึม เพื่อเติมน้ำมันฉนวนช่วยให้ความเป็นฉนวนขององค์

---

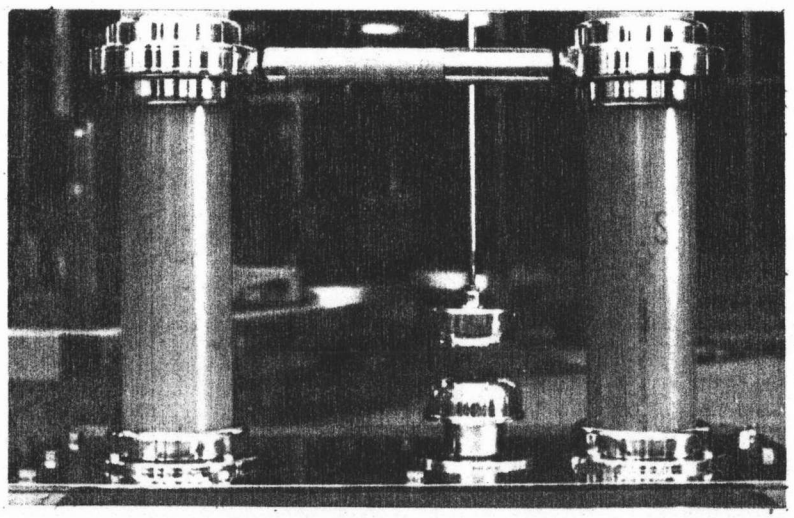
* เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 400 กิโลโวลต์ ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16504756

ประกอบภายในสูงขึ้น ลักษณะของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปแต่ละชั้นเป็นดังรูป 3.1 ดูรายละเอียดการสร้างและส่วนประกอบที่ใช้ในภาคผนวก



ก



ข

รูป 3.1 ลักษณะของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปหนึ่งชั้น

ก. ลักษณะโครงสร้าง ข. การประกอบ

3.3 การออกแบบคอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดัน

การออกแบบส่วนนี้เป็นเรื่องสำคัญของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป เพราะเป็นตัวกำหนดลักษณะสมบัติของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปดังกล่าวแล้ว การออกแบบใช้หลักการของโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงต่ำ ซึ่งประกอบด้วยคะแปซิเตอร์และความต้านทาน ต่อไปจะได้กล่าวถึงการพิจารณาเลือกค่าและชนิดตลอดจนการจัดวางองค์ประกอบเหล่านั้นอย่างละเอียด

3.3.1 การเลือกคะแปซิเตอร์

ดังที่ทราบจากบทก่อนแล้วว่าคอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดันต้องรับแรงดันอิมพัลส์ทั้งหมดคร่อมตัวมัน ฉะนั้นองค์ประกอบที่ใช้ต้องเป็นแบบที่ใช้กับแรงดันสูง ความถี่สูงและมีความสูญเสียเปล่าน้อย ส่วนค่าคะแปซิแตนซ์ที่ใช้สำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบมีคะแปซิเตอร์ทั่วไปต้องไม่น้อยกว่า (30...50) ปิโคฟารัดต่อเมตร {13} เมื่อพิจารณาถึงเงื่อนไขดังกล่าวการออกแบบมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปในที่นี้จึงเลือกใช้คะแปซิเตอร์ขนาดแรงดันไฟตรง 15 กิโลโวลต์ 0.01 ไมโครฟารัด ทั้งหมด 28 ตัวต่ออนุกรมกัน เพื่อให้ทนแรงดันสูงขึ้นอย่างพอเพียง และค่าคะแปซิแตนซ์ต้องไม่น้อยกว่าค่าในทางปฏิบัติที่อ้างไว้ด้วย

$$\text{คะแปซิแตนซ์รวม} = \frac{0.01}{28}\ \mu F = 357\ pF$$

เงื่อนไขในทางปฏิบัติคะแปซิเตอร์ต้องไม่น้อยกว่า $(30...50)\times 2.25 = (65...110)$ pF ทนแรงดันคร่อมสูงสุด (ในอากาศ) = 15 x 28 = 420 kV แต่เมื่อแช่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลงตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้ความเป็นฉนวนดีขึ้นอีก จึงเชื่อแน่ได้ว่าคะแปซิเตอร์ทั้งชุดทนแรงดันตามกำหนด 400 kV ได้

3.3.2 การเลือกค่าความต้านทาน

การเลือกค่าความต้านทานที่กระจายอยู่ในคอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดัน อาศัยหลักการของโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงต่ำ จากสมการ (2.8) กำหนดเงื่อนไขสำหรับค่าความต้านทานดังนี้

$$R \simeq (0.25...1.5)\sqrt{L/C}$$

โดยทั่วไปอินดัคแตนซ์ของวงจรไฟฟ้าแรงสูงมีค่าประมาณ 1 ไมโครเฮนรี่ต่อเมตร {13} ส่วนค่าคะแปซิแตนซ์ที่ใช้คือ C = 357 ปิโคฟารัด ดังนั้นคำนวณค่า R ได้ผลดังนี้

$$R \simeq 55...330 \quad \text{โอห์ม}$$

หมายความว่าเมื่อออกแบบค่า R ให้อยู่ในช่วงนี้ จะได้ผลตอบสนองเข้าลักษณะโวลเตจดิไว-เดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงค่าต่ำ และยังอยู่ในช่วงเงื่อนไขที่กำหนด ที่สำคัญกว่านี้คือเหตุผลที่ค่าคงที่เวลาของโวลเตจดิไวเดอร์จะต้องน้อยกว่าเวลาขึ้นของแรงดันที่จะวัดประมาณ 5 ถึง 10 เท่า {11} จึงเลือกใช้ R = 280 โอห์ม นั่นคือค่าคงที่เวลาของโวลเตจดิไวเดอร์

$$RC = 280\ (357 \times 10^{-12}) = 100 \quad \text{นาโนวินาที}$$

เวลาขึ้นของแรงดันอิมพัลส์ T หาได้จากความสัมพันธ์

$$T = \frac{T_1}{1.67}$$

เมื่อ T คือ เวลาช่วงหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์เท่ากับ 1.2 ไมโครวินาที { 8 }

ฉะนั้นได้ $T = \frac{1.2}{1.67}$ ไมโครวินาที

$= 718$ นาโนวินาที

จะได้จำนวนเท่า $= \frac{\text{เวลาขึ้นของแรงดันที่วัด}}{\text{ค่าคงที่เวลาของโวลเตจดิไวเดอร์}}$

$= \frac{718}{100}$

$= 7.1$ เท่า

จะเห็นได้ว่าค่าคงที่เวลาของโวลเตจดิไวเดอร์ (RC) อยู่ในช่วงที่กำหนด

เหตุผลที่สำคัญอีกประการหนึ่งดังได้กล่าวมาแล้ว คือ หลักการของโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแป-ซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงค่าต่ำ ไม่จำเป็นต้องมีความต้านทานหน่วงในสายนำไฟแรงสูง ทั้งนี้เพราะความต้านทานหน่วงที่มีอยู่ในคอลัมน์ควบคุมแรงดัน จะมีค่าอยู่ในอันดับเดียวกัน การสะท้อนของคลื่นอิมพัลส์ซึ่งเป็นสาเหตุของความผิดพลาดจะมีค่าน้อยมาก เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำไฟแรงสูงที่ใช้ในห้องทดลองมีค่าประมาณ 250-350 โอห์ม ทั้งนี้ขึ้นกับความสัมพันธ์ดังนี้ {13}

$$Z \simeq \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}}\ \ln\frac{4h}{d}$$

เมื่อ μ_o - permeability ของสูญญากาศ = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

ε_o - permittivity ของสูญญากาศ = 8.85×10^{-12} F/m

d - เส้นผ่าศูนย์กลางของสายนำ เป็น เมตร

h - ความสูงจากพื้นดิน เป็น เมตร

แทนค่าที่มีลงในสมการข้างต้นจะได้

$$Z \simeq 60 \ln\frac{4h}{d} \quad \text{โอห์ม}$$

ดังนั้น เมื่อใช้ R = 280 โอห์ม คลื่นจะเกิดการสะท้อนกลับน้อยมากคำนวณได้จาก

$$\text{คลื่นสะท้อน} = \frac{R - Z}{R + Z} \times 100 \quad \%$$

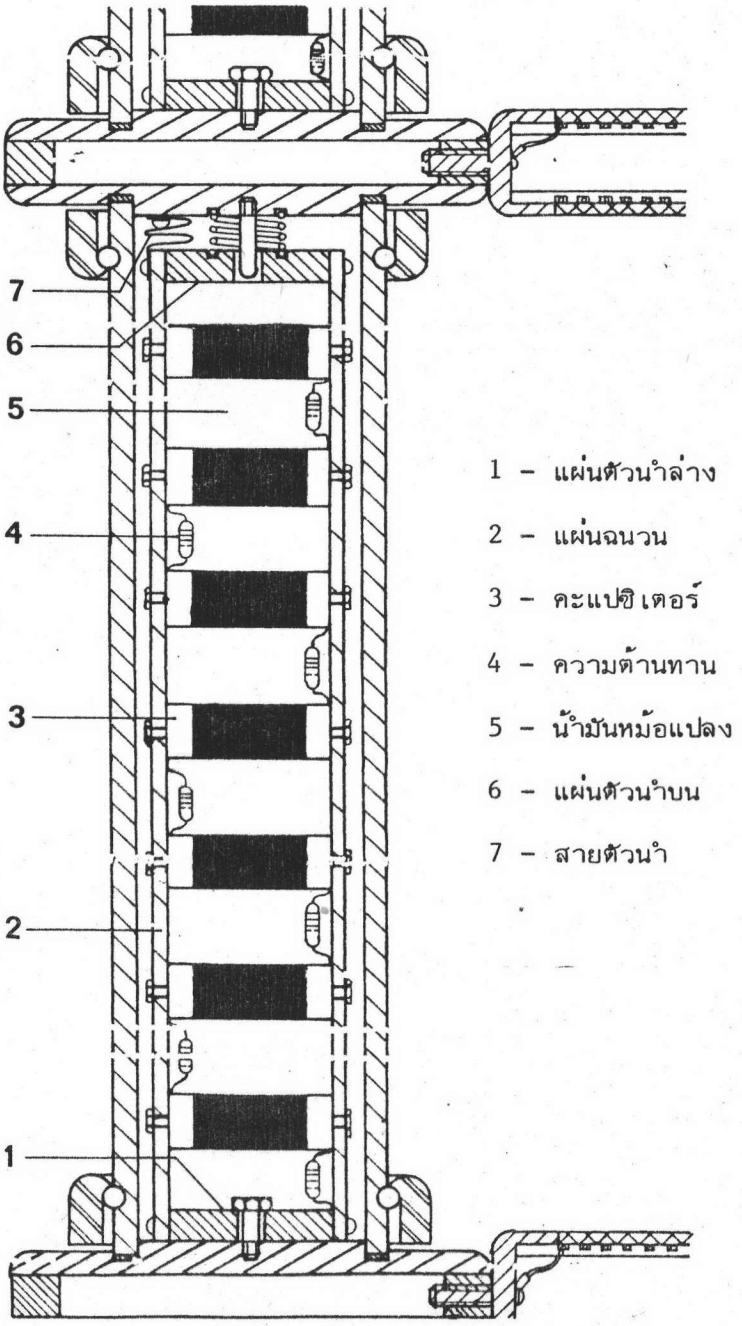
แทนค่า R = 280 Ω

สมมุติ Z = 300 Ω

คลื่นสะท้อน = 3.5 % ถือว่าน้อยมาก

ชนิดของความต้านทานที่ใช้เนื่องจากต้องการหลีกเลี่ยงปัญหา เรื่องการแกว่งภายในจากผลกระทบของสเตรอินดัคแตนซ์และคะแปซิเตอร์ จึงเลือกใช้ความต้านทานแบบฟิล์ม เพื่อลดปัญหาดังกล่าว ในที่นี้ใช้ความต้านทาน 20 โอห์ม 4 วัตต์ ขนานกันเพื่อให้ได้ 10 โอห์ม จำนวน 28 ชุด ต่ออนุกรมกับคะแปซิเตอร์ที่ออกแบบไว้ในข้อ 3.3.1

3.3.3 การจัดวางคะแปซิเตอร์และความต้านทาน



รูป 3.2 คอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดัน

คะแปซิเตอร์และความต้านทานที่ออกแบบในหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 ต้องนำมาเรียงต่อกันแบบสลับตัวต่อตัวจำนวน 7 ชุด ในหนึ่งชั้น การจัดวางทำได้ดังแสดงในรูป 3.2 การยึดท่อฉนวนและเติมน้ำมันของแต่ละชั้นเป็นอิสระต่อกัน กล่าวคือ เมื่อต่อวงจรองค์ประกอบความต้านทานและคะแปซิเตอร์เรียบร้อยในหนึ่งชั้น เติมน้ำมันฉนวนจนเต็มคอลัมน์ที่มีองค์ประกอบอยู่นั้นแล้วปิดอัดแน่นสนิทเฉพาะชั้นนั้นๆ เลย คอลัมน์รองรับต่อไว้ทางอีกด้านหนึ่งเพื่อรองรับแผ่นเหล็กยึดอิเลคโตรด เสร็จแล้วจึงค่อยยกมาต่อกันเป็นมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปหลายๆ ชั้นต่อไป

3.4 การออกแบบสปาร์กแกป

จากที่กล่าวมาแล้วว่าแกปที่ใช้จะมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 4 คู่ โดยที่แต่ละคู่จะเหมือนกัน ยกเว้นแกปลูกล่างเท่านั้นที่แตกต่างไป คือ จะประกอบด้วยตัวกระตุ้น แกปทั้งหมดจะทำหน้าที่เป็นอิเลคโตรดสำหรับเป็นตัวสปาร์กเมื่อเกิดแรงดันเกินคร่อมระยะแกป นั่นคือเมื่อเกิดการสปาร์กระหว่างแกปหมายถึงการลัดวงจรระหว่างขั้วแรงสูงกับศักย์ดิน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอย่างรวดเร็ว ย่อมหมายถึงการทำให้เกิดรูปคลื่นตัดนั่นเอง ลักษณะของอิเลคโตรดต้องเป็นแบบให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ นั่นคือต้องเป็นวัสดุผิวเรียบ เป็นมัน ไม่สกปรกหรือเป็นสนิมง่าย และมีความแข็งเพียงพอไม่เกิดการละลายหรือทำให้ผิวขรุขระเมื่อเกิดประกายไฟขณะสปาร์ก ลักษณะของอิเลคโตรดที่ใช้กันทั่วไปเป็นทรงกลม (sphere) หรือรูปขันขอบมน (round shape) โดยทั่วไปกำหนดให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเมื่อตัวกลางเป็นอากาศน้อยกว่า 25 kV/cm. ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุด การคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าของตัวนำทรงกลมใช้สูตรอย่างง่าย คือ

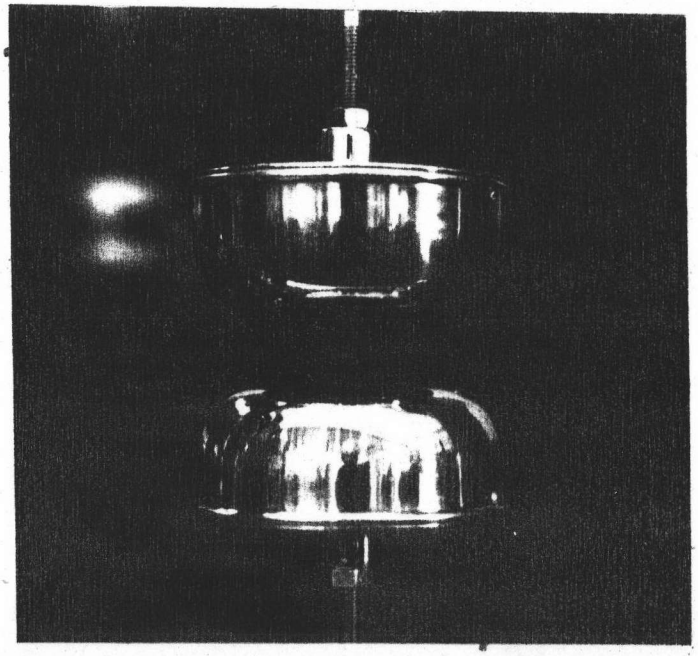
$$E = \frac{V}{r}$$

เมื่อ E - ความเครียดสนามไฟฟ้า หน่วยเป็น kV/cm.
V - แรงดันไฟฟ้าบนทรงกลม หน่วยเป็น kV
r - รัศมีของทรงกลม หน่วยเป็น cm.

สำหรับอิเลคโตรดรูปขันขอบมนไม่มีกฎเกณฑ์อย่างง่ายในการคำนวณ แต่ในทางปฏิบัติให้ขนาดของอิเลคโตรดใหญ่ๆ และรัศมีความโค้งมากๆ จะทำให้ได้อิเลคโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ ไม่เกิดโคโรน่า (corona) อย่างแน่นอน แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมและความสวยงามด้วย

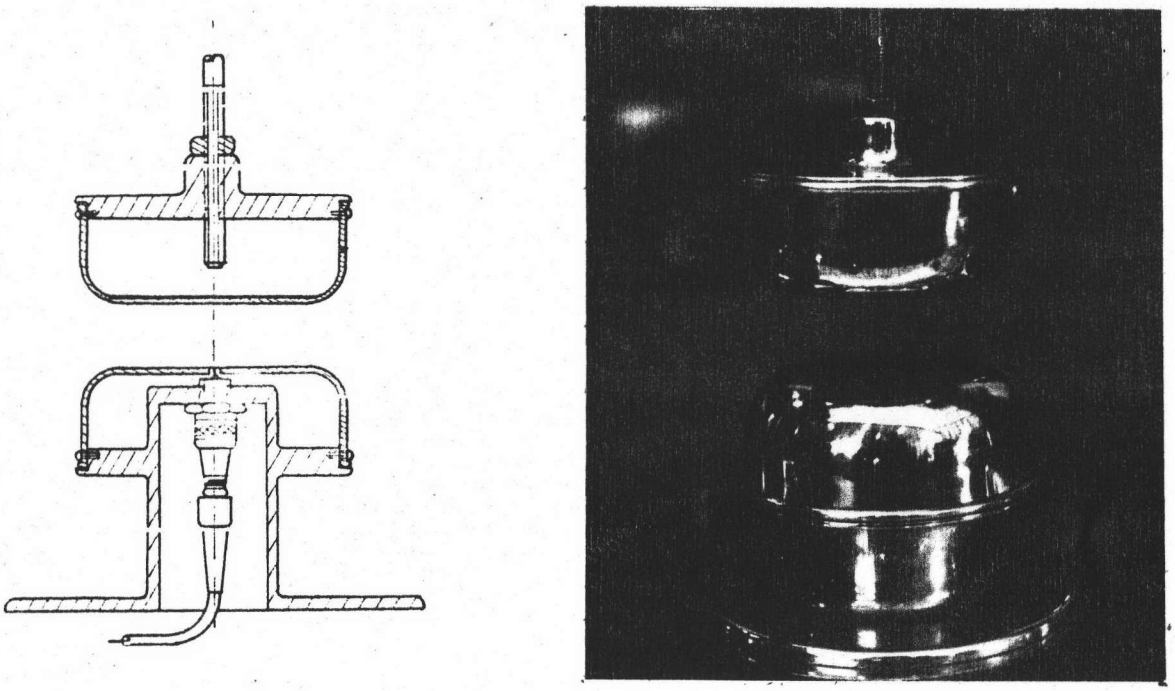
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในที่นี้เลือกใช้อิเลคโตรดเป็นแบบรูปขันขอบมน เพราะสามารถใช้ขันน้ำสแตนเลส (stainless) แทนได้ อิเลคโตรดทรงกลมหาซื้อตามห้องตลาดยาก ถ้าทำเองราคาจะแพงมาก ลักษณะของอิเลคโตรดที่ออกแบบสร้างขึ้นแสดงในรูป 3.3 โดยใช้ขันน้ำสแตนเลสมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12.5 เซ็นติเมตร โดยกลึงฝาปิดส่วนปากขันแล้วยึดด้วยสกรูให้ฝาปิดติดกับตัวขัน ส่วนตรงกลางของฝาปิดจะทำที่สำหรับใส่ก้านยึดแกป โดยทำเป็นเกลียวตัวเมียให้สามารถปรับระยะแกปขึ้นลงได้ ลักษณะของแกปแสดงในรูป 3.3 รายละเอียดดูภาคผนวกประกอบ



รูป 3.3 ลักษณะของแกปใช้อิเลคโตรดรูปขันขอบมน

แกปล่างสุดของมัลติเปิลช็อบบิ้งแกปจะแตกต่างไปจากแกปอื่น คือ ออกแบบให้มีแกปช่วย (auxiliary gap) โดยเจาะรูตรงกลางขันที่ทำเป็นสปาร์กแกปให้หัวกระตุ้นที่ยึดอยู่บนฉนวนมีระยะห่างจากขอบรูประมาณ 1 มิลลิเมตร หัวกระตุ้นจะได้รับสัญญาณกระตุ้นจากการบังคับภายนอกเกิดการสปาร์กที่แกปช่วยขึ้นเป็นผลทำให้เกิดสปาร์กที่สปาร์กแกปได้ แกปนี้เรียกว่าแกปมีตัวกระตุ้น (triggered gap) ดูรูป 3.4 รายละเอียดการสร้างดูภาคผนวก



ก ข

รูป 3.4 แกปมีตัวกระตุ้น

ก. ลักษณะโครงสร้าง ข. การประกอบ

3.5 การออกแบบความต้านทานขนาน

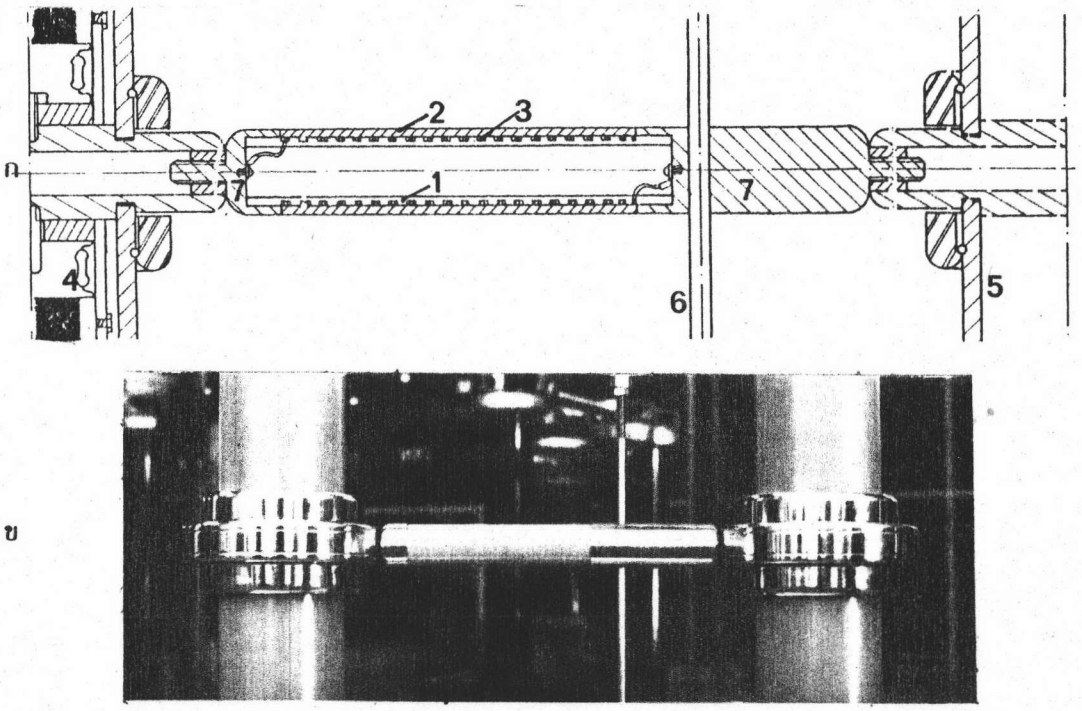
ความต้านทานขนานจะทำหน้าที่เป็นตัวรับการคายประจุของคะแปซิเตอร์ในวงจรของแต่ละชั้น เพื่อทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวมันเอง เป็นผลทำให้แกปในชุดถัดขึ้นไปได้รับแรงดันเกิน และเกิดการสปาร์กของแกปขึ้นทันทีทันใดดังได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 ค่าของความต้านทานที่เลือกใช้จะมีค่าประมาณ 1 กิโลโอห์ม {5}

3.5.1 การเลือกใช้วัสดุทำความต้านทานขนาน

วัสดุที่ใช้ทำความต้านทานขนานเป็นความต้านทานแบบเส้นลวด มีค่าความต้านทาน 125 โอห์มต่อเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 90 ไมโครเมตร เหตุที่ใช้ความต้านทานลักษณะนี้ เพราะว่าตัวความต้านทานจะต้องมีความยาวพอที่จะไม่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวของความต้านทานเอง และลักษณะโครงสร้างต้องเป็นส่วนช่วยยึดคอลัมน์ทั้งสอง กับเป็นส่วนประกอบในการจับยึดก้านของแกปด้วย

3.5.2 การพันลวดความต้านทาน

เนื่องจากเลือกความต้านทานเป็นแบบเส้นลวด และต้องการให้ได้ค่าความต้านทานตามความต้องการ และมีความยาวได้ตามกำหนดจึงต้องพันความต้านทานเอง โดยวิธีพันลงบนท่อฉนวนพีวีซี ลักษณะการพันจะพันลวดให้สวนทางกัน เพื่อลดค่าอินดัคแตนซ์ โดยพันอยู่บนช่องของฉนวนพีวีซีที่กลึงร่องไว้สำหรับพันลวดดังกล่าวได้ การพันลวดจะพันทั้งหมดจำนวน 67 รอบ จึงจะได้ค่าความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม จากนั้นจะทากาวอิพอกซี (epoxy) ให้ลวดจับอยู่กับร่องฉนวน แล้วสวมท่อฉนวนหุ้มอีกชั้นหนึ่ง เพื่อกันมิให้ลวดความต้านทานถูกระทบกระแทกจากวัสดุอื่นอันอาจทำความเสียหายให้กับเส้นลวดความต้านทานได้



รูป 3.5 ความต้านทานขนาน

ก. ลักษณะโครงสร้าง ข. การประกอบ

1 – ท่อฉนวนพีวีซี
2 – ท่อฉนวนพีวีซีหุ้ม
3 – ร่องสำหรับพันลวดความต้านทาน
4 – คอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดัน
5 – คอลัมน์รองรับ
6 – ก้านยึดแกป
7 – โลหะยึดปลายความต้านทาน

3.6 การออกแบบภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์

จากหัวข้อ 2.8 เรื่องโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงต่ำทำให้ทราบว่า อัตราส่วนแรงดันขึ้นอยู่กับค่าคะแปซิแตนซ์ทั้งภาคแรงสูงและแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์ คะแปซิ-แตนซ์ของสายเคเบิลวัดก็มีผลเหมือนกันแต่ในระดับแรงดันขนาดนี้ยังมีผลไม่มากนัก จากความสัมพันธ์ในสมการ (2.10) เมื่อกำหนดอัตราส่วนแรงดันที่ต้องการสามารถหาค่าคะแปซิแตนซ์ภาคแรงต่ำได้สำหรับค่าคะแปซิแตนซ์ภาคแรงสูงค่ากำหนดค่าหนึ่ง ในที่นี้การออกแบบภาคแรงต่ำทำไว้เป็น 2 ชุด เพื่อให้ใช้ได้กับออสซิลโลสโคป 2 แบบ คือ แบบธรรมดา และอิมพัลส์ออสซิลโลสโคป ออสซิลโลสโคปแบบธรรมดาที่มีใช้อยู่ทั่วไปรับแรงดันขาเข้าสูงสุดได้ไม่เกิน 100 โวลต์ ส่วนอิมพัลส์ออสซิลโลสโคปออกแบบให้รับแรงดันขาเข้าสูงถึง 1000 โวลต์

3.6.1 การคำนวณหาค่าคะแปซิแตนซ์ภาคแรงต่ำ

การคำนวณค่าคะแปซิแตนซ์ภาคแรงต่ำ c_2 ชุดที่ใช้กับอิมพัลส์ออสซิลโลสโคปทำดังนี้

$$\text{อัตราส่วนลดทอนแรงดัน } a = \frac{\text{แรงดันที่ต้องการวัด}}{\text{แรงดันป้อนเข้าเครื่องวัด}}$$

แรงดันที่ต้องการวัด = 400 kV

กำหนดให้แรงดันที่จะป้อนเข้าเครื่องวัด = 800 V

$$\text{ฉะนั้น } a = \frac{400 \times 1000}{800}$$

$$= 500$$

จากสมการ (2.9) $$a = \frac{c_1 + c_2 + c_c}{c_1}$$

$$\text{ฉะนั้น } c_2 = ac_1 - c_1 - c_c$$

ผลกระทบของ c_c น้อยสามารถละเลยได้

คะแปซิแตนซ์ c_1 จากหัวข้อ 3.3 กำหนดไว้เท่ากับ 357 pF

แทนค่าในความสัมพันธ์ข้างต้นได้

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$C_2 = 0.1781 \quad \mu F$$

ในที่นี้เลือกใช้ คะแปซิเตอร์ ค่า 0.022 μF จำนวน 8 ตัว ต่อขนานกัน ได้คะแปซิแตนซ์ C_2 เท่ากับ 0.176 μF ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่คิดจากการคำนวณ

การคำนวณค่า C_2 ในกรณีที่ออกแบบภาคแรงต่ำที่จะใช้กับออสซิลโลสโคปแบบธรรมดาก็กระทำในทำนองเดียวกัน ในที่นี้กำหนดแรงดันขาออกเท่ากับ 65 โวลต์ (อัตราส่วนแรงดัน = 6153) คำนวณค่า C_2 ได้เท่ากับ 2.196 μF ซึ่งในการสร้างใช้คะแปซิเตอร์ ค่า 0.22 μF จำนวน 10 ตัว ต่อขนานกัน ได้คะแปซิแตนซ์ C_2 เท่ากับ 2.2 μF

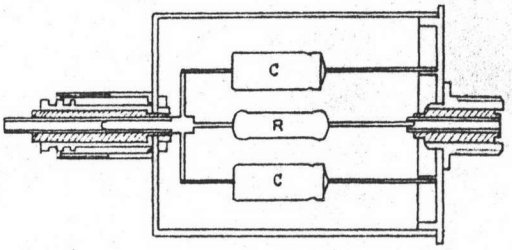
3.6.2 ความต้านทานแมทชิ่ง

โวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงค่าต่ำ ต้องมีความต้านทานแมทชิ่งที่ภาคแรงต่ำก่อนต่อเข้าสายเคเบิลวัดเพื่อกันการสะท้อนในสายเคเบิล ค่าความต้านทานต้องเหมาะกับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลที่ใช้ ความต้านทานที่ใช้ต้องมีค่าสเตรอินดัคแตนซ์น้อยๆ ในที่นี้ใช้ความต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน ค่าความต้านทาน 75 Ω ขนาด 2 วัตต์ เป็นความต้านทานแมทชิ่ง

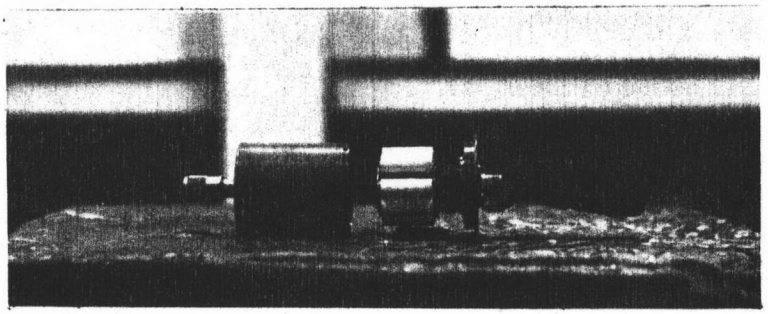
3.6.3 การประกอบภาคแรงต่ำ

อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์ต้องให้มีสเตรอินดัคแตนซ์น้อยที่สุด คะแปซิเตอร์ที่ใช้ต้องเป็นแบบหลายๆ ตัวต่อขนานกัน การจัดวางต้องวางเรียงเป็นลักษณะทรงกระบอกอยู่รอบความต้านทานแมทชิ่งซึ่งเป็นแกนกลางต่อกับแกนกลางของสายเคเบิลวัด ทั้งหมดนั้นต้องบรรจุอยู่ในกระป๋องตัวนำเพื่อใช้เป็นชีลด์กันการรบกวนจากสนามไฟฟ้าภายนอก ที่หัวและท้ายของกระป๋องตัวนำประกอบเข้ากับหัวต่อเคเบิลยูเอชเอฟ (UHF connector) เพื่อใช้ต่อกับภาคแรงสูงและต่อกับสายเคเบิลวัด ลักษณะการประกอบภาคแรงต่ำจะเป็นดังรูป 3.6

รายละเอียดการออกแบบและสร้างส่วนประกอบของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปขนาด 400 กิโลโวลต์นอกเหนือจากนี้ดูได้ในภาคผนวกท้ายเล่ม มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปที่ออกแบบและสร้างขึ้นแสดงไว้ในรูป 3.7



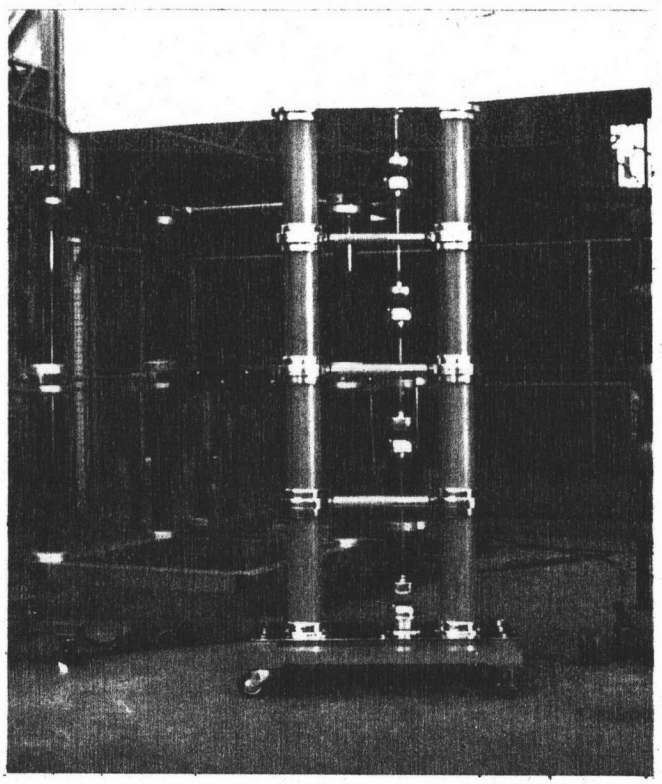
ก



ข

รูป 3.6 การประกอบภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์

ก. ลักษณะโครงสร้าง ข. การประกอบ



รูป 3.7 มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปที่ออกแบบและสร้างขึ้น