บทที่ 3

การออกแบบและสร้างโวลเตจดิไวเดอร์

3.1 บทนำ

โวลเตจดิไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง จะเป็นแบบตัวเก็บประจุ ให้สามารถวัดได้ทั้ง แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า แรงดันอิมพัลส์แบบสวิทชิ่ง และ แรงดันกระแสสลับ โดยมีคุณสมบัติตามข้อกำหนดของ ไอ อี ซี [2]

ค่าแรงดันที่กำหนดของโวลเตจดิไวเดอร์ ถูกกำหนดด้วยค่าแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้น ต้องการใช้วัดแรงดันทดสอบการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กับระบบ 72.5 กิโลโวลต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 325 กิโลโวลต์ สำหรับแรงดันแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า และ 145 กิโลโวลต์ สำหรับแรงดันกระแสสลับ ในการทดสอบอาจเกิดแรงดันเกินขึ้นได้ (โดยอาศัยข้อมูลจากต่างประเทศ) จึงเลือกแรงดันที่กำหนดดังนี้

400 กิโลโวลต์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า
250 กิโลโวลต์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์แบบสวิทชิ่ง
200 กิโลโวลต์ สำหรับแรงดันกระแสสลับ

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ จะเลือกเป็นแบบตัวเก็บประจุเดี่ยวที่มีโครงสร้างแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ใช้ก๊าซอัดความดันเป็นไดอิเล็กตริก เพราะมีข้อดี คือ

ก) ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าคงที่ ทำให้อัตราส่วนแรงดันมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งที่ใช้งาน และ สามารถใช้ได้กับความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูงมาก

ข) การใช้ก๊าซอัดความดันเป็นไดอิเล็กตริกในตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ทำให้มีค่าพลังงานสูญเปล่าต่ำ จึงสามารถใช้เป็นตัวเก็บประจุมาตรฐานได้ด้วย

ค) ไม่มีความจุสเตรลงดินกระจาย ภายในตัวเก็บประจุเหมือนกับการใช้ตัวเก็บประจุย่อยมาต่อกัน

ง) สเตรอินดัคแตนซ์มีค่าต่ำ

จ) เนื่องจากทรงกระบอกนอกทำหน้าที่เป็นชีลด์ให้กับตัวเก็บประจุ ทำให้ไม่ไวต่อสัญญาณรบกวนจากภายนอก

ฉ) สามารถสร้างจากวัสดุที่ผลิตได้เองภายในประเทศ เป็นส่วนใหญ่

3.2 การออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

3.2.1 การฉนวน

ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง อาจแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซอัดความดัน การใช้ฉนวนแข็งและฉนวนเหลวเป็นไดอิเล็กตริก ทำให้เกิดพลังงานสูญเปล่าซึ่งมีผลกระทบต่อคุณสมบัติการใช้งานของโวลเตจดิไวเดอร์ ยิ่งกว่านั้นถ้าเกิดเบรกดาวน์จะทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพหรือเสียหาย แต่การใช้ก๊าซอัดความดันเป็นไดอิเล็กตริก แม้ว่าจะเกิดเบรคดาวน์ ก็สามารถกลับสู่สภาพการเป็นฉนวนอย่างเดิมได้รวดเร็ว ยิ่งกว่านั้นค่าเพอร์มิตติวิตีมีค่าเกือบคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ความดัน และ ความถี่ [9] ก๊าซอัดความดันที่ใช้เป็นฉนวนมีหลายชนิด เช่น ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซาฟลูออไรด์ (SF_6)

ในปัจจุบันนิยมใช้ก๊าซ SF_6 กันอย่างแพร่หลาย เพราะมีข้อดี คือ(10)

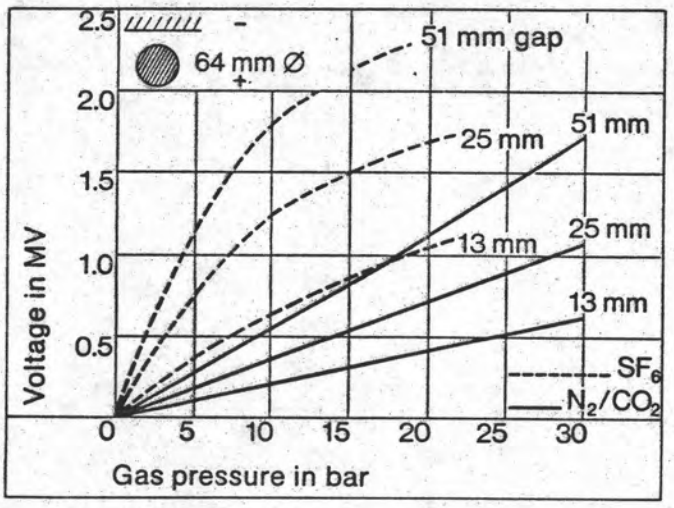
ก) มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซอื่นที่ความดันเดียวกัน ดังรูปที่ 3.1

ข) มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับน้ำมันหม้อแปลง ที่ความดันประมาณ 2.8 บาร์ ดังรูปที่ 3.2

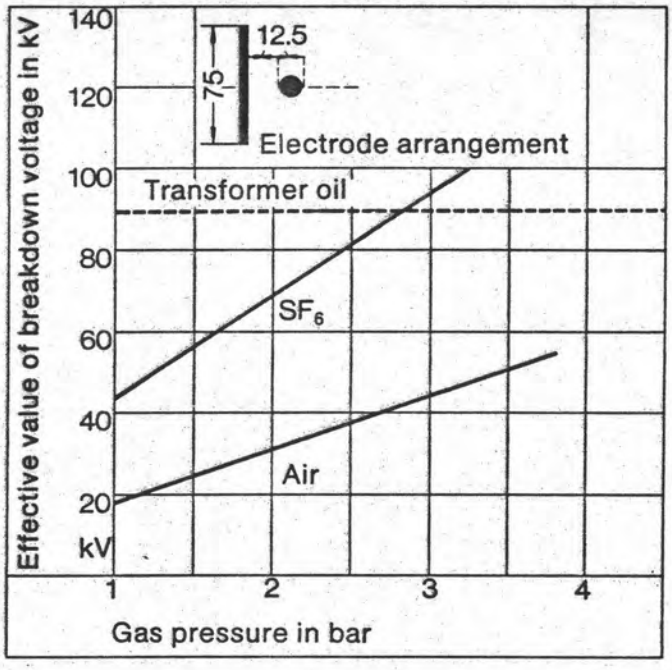
ค) เป็นก๊าซที่เฉื่อยต่อปฏิกริยาเคมี ถ่ายเทความร้อนได้ดี ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และ ไม่ช่วยให้ไฟติด

จากข้อดีและเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงเลือกใช้ก๊าซ SF_6 ที่ความดัน 2.5 บาร์ เป็นไดอิเล็กตริกภายในตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

เนื่องจากความดันก๊าซ SF_6 ที่ใช้มีค่าไม่สูงนัก จึงใช้ท่อพีวีซีที่ผลิตได้ภายในประเทศ ชนิดทนความดันได้ 8.5 บาร์ เป็นภาชนะอัดความดัน และเป็นฉนวนภายนอกให้กับตัวเก็บประจุภาคแรงสูง



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับความดันของก๊าซ SF_6 และ N_2/CO_2



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับความดันของก๊าซ SF_6 อากาศ และ น้ำมันหม้อแปลง

3.2.2 ลักษณะโครงสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

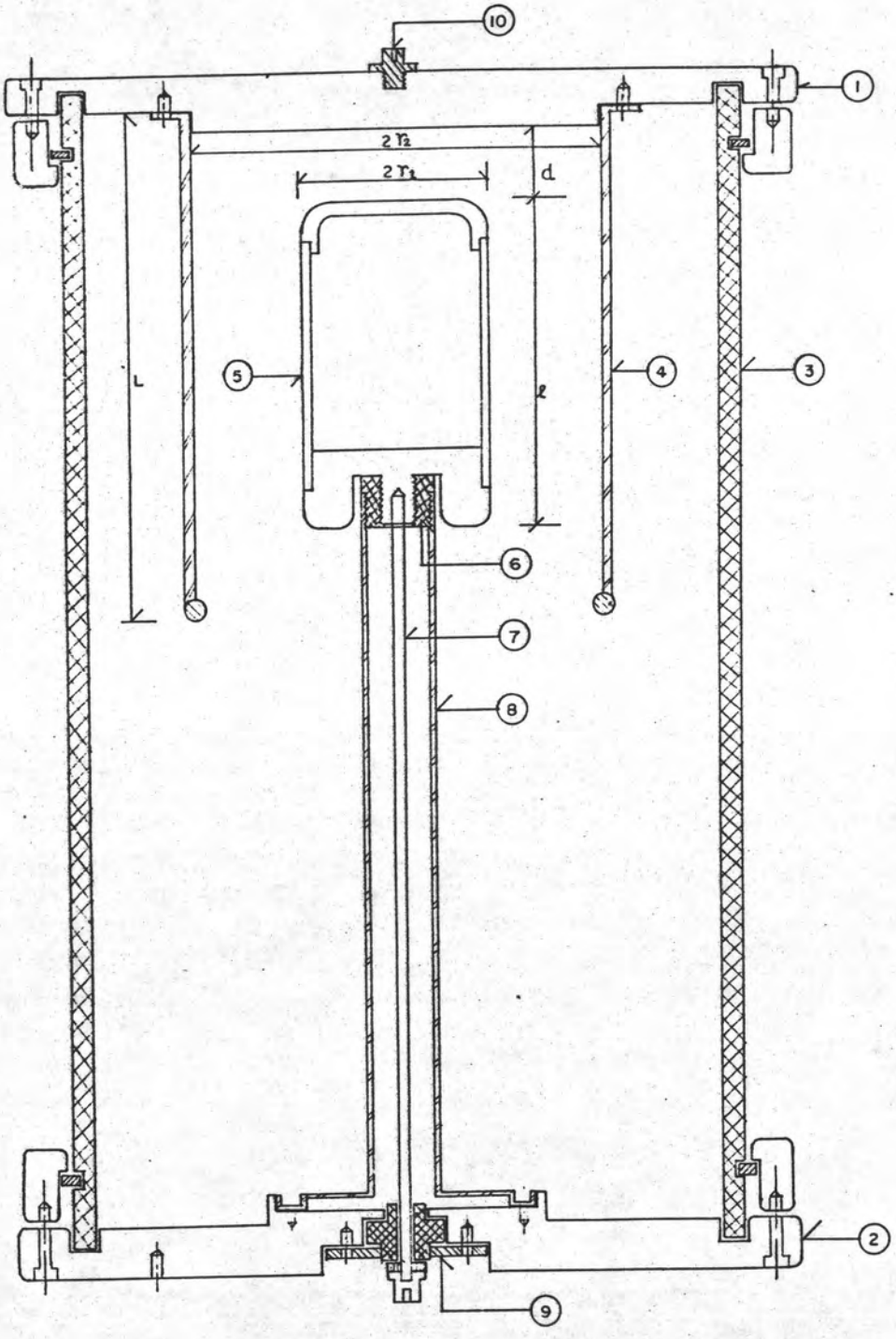
ค่าความจุไฟฟ้าที่พอเหมาะ ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่มีโครงสร้างแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม และใช้ก๊าซอัดความดันเป็นไดอิเล็กตริก จะมีค่าอยู่ในย่าน 30-100 พิโคฟารัด (1) ในที่นี้จะออกแบบให้มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 100 พิโคฟารัด เพื่อลดผลกระทบของความจุไฟฟ้าในเคเบิลวัดที่มีต่ออัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ให้น้อยลง

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่จะสร้างขึ้นมีโครงสร้างและการประกอบตามลักษณะในรูปที่ 3.3 ก) อิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกซึ่งเป็นอิเล็กโทรดแรงสูงจะยึดอยู่กับหน้าแปลนโลหะด้านบนที่ยึดรองรับด้วยท่อพีวีซี ที่ปลายล่างของอิเล็กโทรดแรงสูงเชื่อมด้วยเส้นลวดกลมโดยรอบ เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า ส่วนอิเล็กโทรดทรงกระบอกในซึ่งเป็นอิเล็กโทรดแรงต่ำ ที่ปลายบนและปลายล่าง

จะปิดด้วยระนาบโลหะ ที่ขอบโดยรอบจะทำให้มีส่วนโค้งมนเพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณขอบ อิเล็กโทรดทรงกระบอกในจะยึดอย่างมั่นคงด้วยท่อโลหะในแนวดิ่งให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมกับอิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกและท่อพีวีซี ทำให้ด้านบนของอิเล็กโทรดทรงกระบอกในและหน้าแปลนโลหะด้านบนที่ใช้ยึดอิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกมีลักษณะเป็นระนาบขนาน

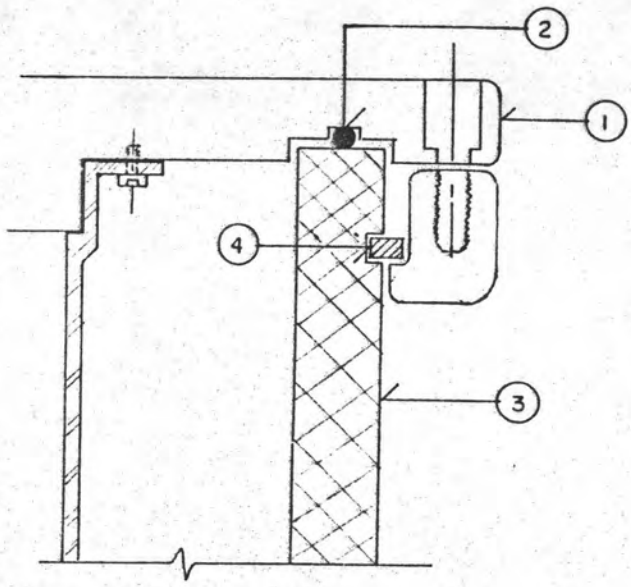
ท่อโลหะที่ใช้ยึดอิเล็กโทรดทรงกระบอกใน จะทำหน้าที่เป็นชีลด์ให้กับสายนำแรงต่ำที่ต่อจากอิเล็กโทรดทรงกระบอกในออกมาภายนอก

เนื่องจากการฉนวนภายในใช้ก๊าซอัดความดัน จึงต้องซีลรอยต่อโดยใช้ O-ring ดังรายละเอียดในรูปที่ 3.3 ข) และ 3.3 ค)



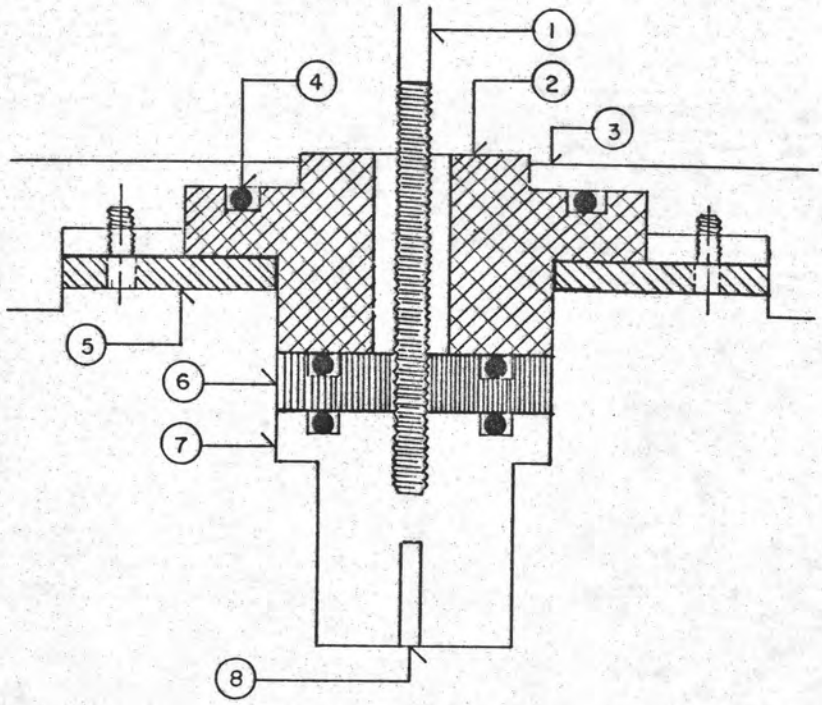
รูปที่ 3.3 ก) โครงสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่สร้างขึ้น

1	หน้าแปลนปิดด้านบน	2	หน้าแปลนปิดด้านล่าง
3	ท่อพีวีซี	4	อิเล็กโทรดทรงกระบอกนอก
5	อิเล็กโทรดทรงกระบอกใน	6	ฉนวนเบคคาไลท์
7	สายนำแรงต่ำ	8	ท่อยึดอิเล็กโทรดใน
9	ซีลสายนำแรงต่ำ	10	ขั้วสำหรับต่อสายแรงสูง



รูปที่ 3.3 ข) การซีลระหว่างท่อพีวีซีและหน้าแปลนด้านบนหรือด้านล่าง

1 หน้าแปลนปิดด้านบนหรือด้านล่าง
2 O-Ring
3 ท่อพีวีซี
4 แหวนสำหรับรั้งหน้าแปลน



รูปที่ 3.3 ค) การซีลสายนำแรงต่ำ

1 สายนำแรงต่ำ
2 ฉนวนเบคคาไลท์
3 หน้าแปลนปิดด้านล่าง
4 O-Ring
5 หน้าแปลนอัดฉนวนเบคคาไลท์
6 Nut พร้อม O-Ring
7 ขั้วสำหรับต่อกับตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ
8 รูสำหรับ Banana Jack

3.2.3 ค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันโคโรน่าเริ่มเกิด

จากลักษณะโครงสร้างตัวเก็บประจุดังที่กล่าวแล้ว จะเห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าอาจแบ่งเป็นส่วนสำคัญได้สองส่วน คือ

- บริเวณส่วนที่เป็นทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม
- บริเวณส่วนที่เป็นระนาบขนานที่ส่วนบนของอิเล็กโทรดทรงกระบอกใน

ก) บริเวณที่เป็นทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทรงกระบอกในกับทรงกระบอกนอกมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความยาวของอิเล็กโทรดทรงกระบอกใน และสนามไฟฟ้าภายในระหว่างทรงกระบอกทั้งสองถูกรบกวนโดยสนามไฟฟ้าจากปลายทั้งสองของทรงกระบอกไม่มาก จึงถือว่าทรงกระบอกดังกล่าวมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมความยาวอนันต์ ค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดจึงหาได้จากสมการ [11]

$$C = 2.\pi.\varepsilon_o.\varepsilon_r.l \;/\; [\ln(r_2/r_1)] \qquad (3.1)$$

$$U_i = (E/p)_c.p.(r_2-r_1).\eta.(1 + b/\sqrt{p.r_1}) \qquad (3.2)$$

เมื่อ C คือ ความจุไฟฟ้า

ε_o คือ เพอร์มิตติวิตีของสูญญากาศ

ε_r คือ เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของก๊าซ SF_6 มีค่า 1.0021 [10]

l คือ ความยาวของอิเล็กโทรดทรงกระบอกใน (ดูรูปที่ 3.3 ก)

r_2 คือ รัศมีภายในของอิเล็กโทรดทรงกระบอกนอก

r_1 คือ รัศมีภายนอกของอิเล็กโทรดทรงกระบอกใน

U_i คือ ค่ายอดแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด เป็นกิโลโวลต์

$(E/p)_c$ คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของก๊าซ SF_6 มีค่า 87.8 กิโลโวลต์ ต่อ เซ็นติเมตร-บาร์

p คือ ความดันของก๊าซ SF_6 ที่ใช้ เป็น บาร์

b คือ ค่าตามสมการ $[\,[1 - (8.1n10)/(27.(E/p)_c.p.r_1)]\,/\,[1 - \ln((E_1/p)/(E/p)_c)] - 1\,]\,.\,\sqrt{p.r_1}$

η คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้าในที่นี้มีค่าตามสมการ

$$\eta = [r_1/(r_2-r_1)]\,.\,\ln(r_2/r_1) \qquad (3.3)$$

ข) บริเวณที่เป็นระนาบขนาน

เมื่อระยะระหว่างระนาบมีค่าไม่มากและความเครียดสนามไฟฟ้าที่ขอบโดบรอบมีค่าต่ำกว่าภายในระนาบขนาน ภายในระนาบขนานจึงถือได้ว่าเป็นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้า และ แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด คำนวณได้จากสมการ {11,12}

$$C = (\varepsilon_o.\varepsilon_r.A) / d \qquad (3.4)$$

$$U_i = (E/p)_c.p.d \qquad (3.5)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดขวางของอิเล็กโทรดทรงกระบอกใน

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ (ดูรูปที่ 3.3 ก)

3.2.4 มิติตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

มิติโครงสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงสูง กำหนดด้วยเงื่อนไขต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- แรงดันที่กำหนด 400 กิโลโวลต์ สำหรับอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า
- ความดันก๊าซ SF_6 2.5 บาร์
- ความจุไฟฟ้าประมาณ 100 พิโคฟารัด
- มิติมาตรฐานของวัสดุโครงสร้างที่หาได้ภายในประเทศ

การออกแบบเบื้องต้นเริ่มด้วยการเลือกขนาดอิเล็กโทรดทรงกระบอกใน ซึ่งเป็นส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ต้องไม่เกิดโคโรนาที่แรงดันกำหนด โดยคำนึงถึงค่าแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในขณะใช้งาน สภาพผิวของอิเล็กโทรด และความคลาดเคลื่อนในการประกอบสร้าง ฉะนั้นรัศมีของอิเล็กโทรดทรงกระบอกในต้องมีขนาดโตพอ นอกจากนั้นแล้วต้องได้ค่าความจุไฟฟ้าตามต้องการโดยที่มิติของตัวเก็บประจุไม่ใหญ่เกินไป เพื่อจะได้ประหยัดและลดผลกระทบจากความจุไฟฟ้าสเตรลงดินของอิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกที่เพิ่มขึ้นตามความสูงของตัวเก็บประจุ

การเลือกความยาวของอิเล็กโทรดทรงกระบอกนอก และขนาดท่อพีวีซี ต้องคำนึงถึงความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศตามผิวความยาวท่อพีวีซี ซึ่งมีค่าประมาณ 4 กิโลโวลต์ต่อเซ็นติเมตร ความยาวของอิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกที่เหมาะสมมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวภาชนะอัดความดัน [1]

ในอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด เกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกระบอกใน ขนาดรัศมีเล็กที่สุดของอิเล็กโทรดทรงกระบอกใน อาจหาได้จากสมการ [11]

$$E_{max} = V_{max} / [r_1 . \ln(r_2/r_1)] \qquad (3.6)$$

เมื่อ E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของก๊าซ SF_6 ที่ความดัน 2.5 บาร์ มีค่า 219.5 กิโลโวลต์ต่อเซ็นติเมตร

V_{max} คือ แรงดันระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองเป็นกิโลโวลต์

r_1 คือ รัศมีภายนอกของอิเล็กโทรดทรงกระบอกในเป็นเซ็นติเมตร

r_2 คือ รัศมีภายในของอิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกเป็นเซ็นติเมตร

ในที่นี้ $V_{max} = V_n \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$

โดยที่ V_n คือ แรงดันที่กำหนด มีค่า 400 กิโลโวลต์

K_1 คือ แฟคเตอร์เนื่องจากแรงดันเกินที่เกิดขึ้นได้ในการใช้งาน มีค่าประมาณ 1.25

K_2 คือ แฟคเตอร์เนื่องจากความเรียบของผิวอิเล็กโทรดมีค่าประมาณ 1.25

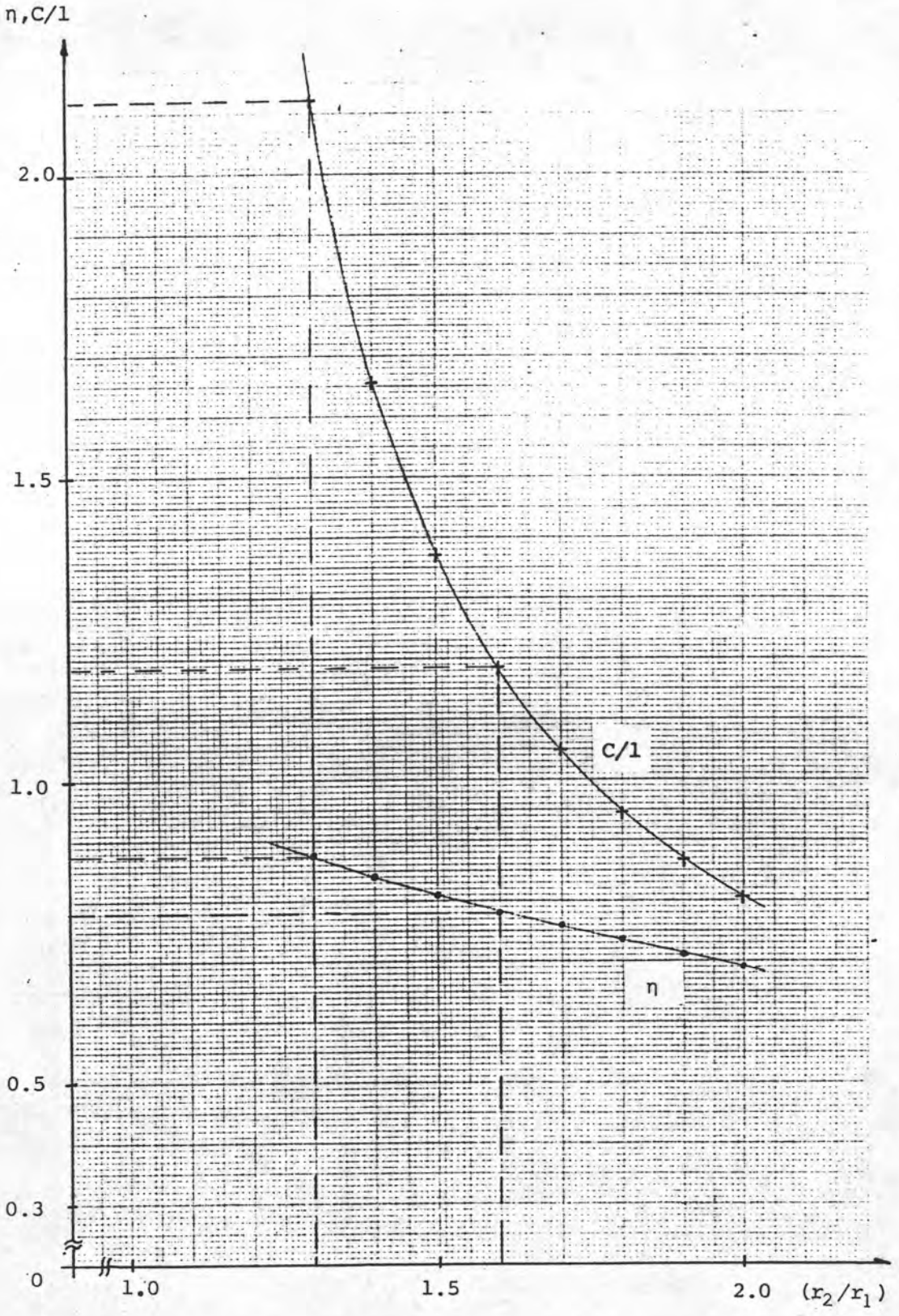
K_3 คือ แฟคเตอร์เนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการประกอบ มีค่าประมาณ 1.1

ฉะนั้น $V_{max} = 687.5$ กิโลโวลต์

ดังนั้นค่าแรงดันต่ำสุดที่จะนำไปใช้ในการคำนวณหามิติต่างๆ จะมีค่า 688 กิโลโวลต์

เพราะว่าความจุไฟฟ้าบริเวณทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม มีค่ามากกว่าบริเวณระนาบขนานมาก จึงพิจารณาหามิติที่เหมาะสมจากบริเวณทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาว (C/1) และค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (η) ในเทอมของอัตราส่วนระหว่างรัศมีของอิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกต่ออิเล็กโทรดทรงกระบอกใน (r_2/r_1)

จากสมการ (3.1) และ (3.3) จะเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังเส้นกราฟในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η และ C/1 ในเทอมของ r_2/r_1

จากกราฟในรูปที่ 3.4 พบว่าย่านที่ให้ C/1 มีค่าสูงจะอยู่ในช่วงอัตราส่วน r_2/r_1 มีค่า 1.3-1.6 และในช่วงนี้ η มีค่ามากกว่า 0.43 (ทำให้การเบรกดาวน์ที่จะเกิดขึ้นเป็นแบบเบรกดาวน์โดยตรง (113) อาศัยสมการ (3.6) จะได้ว่า r_1 ที่จะใช้มีค่าอยู่ในช่วง 6.7-11.95 เซ็นติเมตร

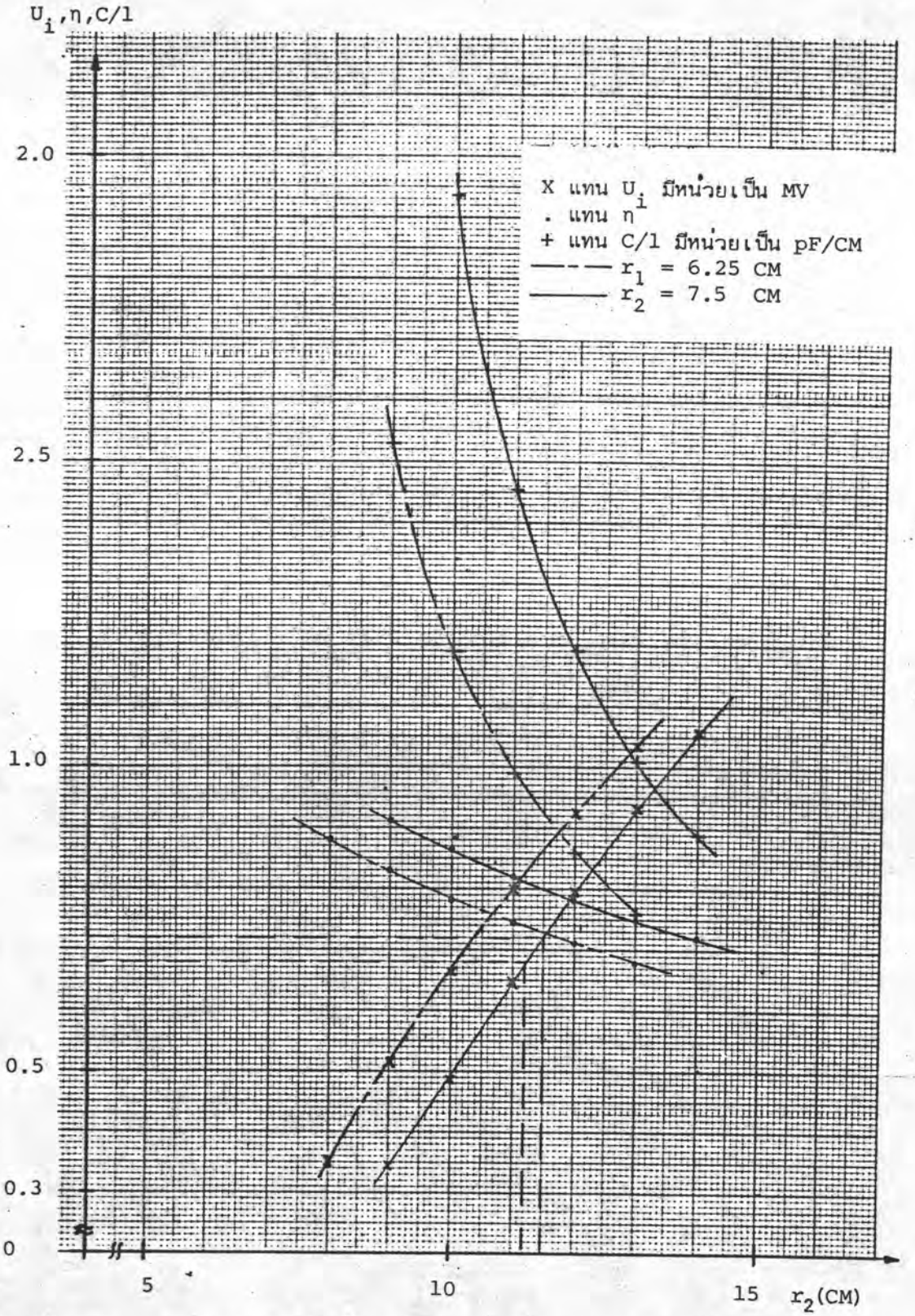
การเลือกขนาดอิเล็กโทรดทรงกระบอกในต้องคำนึงถึงวัสดุ ที่สามารถหาได้ ในที่นี้จะใช้ท่อทองเหลืองเพราะไม่เป็นสนิมและไม่ต้องชุบใดๆ ขนาดท่อทองเหลืองที่จัดหาซื้อได้และมีรัศมีอยู่ในช่วงที่ต้องการมีขนาด 6.25 และ 7.5 เซ็นติเมตร

จากสมการ (3.1)-(3.3) จะเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง U_1 η และ C/1 ในเทอมของ r_2 เมื่อ r_1 มีค่าเป็น 6.25 และ 7.5 เซ็นติเมตร ได้ดังรูปที่ 3.5

จากกราฟในรูปที่ 3.5 พบว่าที่ U_1 เท่ากัน อิเล็กโทรดทรงกระบอกในที่มีรัศมี 7.5 เซ็นติเมตร ให้ค่า C/1 และ η สูงกว่า จึงเลือกใช้อิเล็กโทรดทรงกระบอกในเป็นท่อทองเหลืองขนาดรัศมี 7.5 เซ็นติเมตร และจากกราฟที่ U_1 = 688 กิโลโวลต์ ได้ค่า r_2 = 11.2 เซ็นติเมตร จึงเลือกใช้อิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกทำจากท่อเหล็ก ขนาดรัศมี 11.5 เซ็นติเมตร ชุบโครเมียมอย่างแข็ง (hard chrome) เพื่อกันสนิม

จากสมการ (3.1) เมื่อ C=100 พิโคฟารัด r_1=7.5 เซ็นติเมตร r_2 = 11.5 เซ็นติเมตร จะได้ 1 = 77 เซ็นติเมตร ในที่นี้ออกแบบให้ 1 = 80 เซ็นติเมตร

เพื่อให้อิเล็กโทรดทรงกระบอกนอก ห่อหุ้มอิเล็กโทรดทรงกระบอกในได้หมด จึงออกแบบให้อิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกยาวกว่าอิเล็กโทรดในประมาณ 10 เซ็นติเมตร หลังประกอบเสร็จ อิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกจึงมีความยาว 94 เซ็นติเมตร



รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง U_i η และ C/l ในเทอมของ r_2 เมื่อ r_1 = 6.25 และ 7.5 เซ็นติเมตร

ที่ระนาบขนานเมื่อ U_1 = 688 กิโลโวลต์ จากสมการ (3.5) จะได้ $d > 3.1$ เซ็นติเมตร ในที่นี้ออกแบบให้ $d = 4$ เซ็นติเมตร เพื่อให้เท่ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง และออกแบบให้ความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นในการประกอบไม่ทำให้ $d>4$ เซ็นติเมตร หรือ $d<3.1$ เซ็นติเมตร

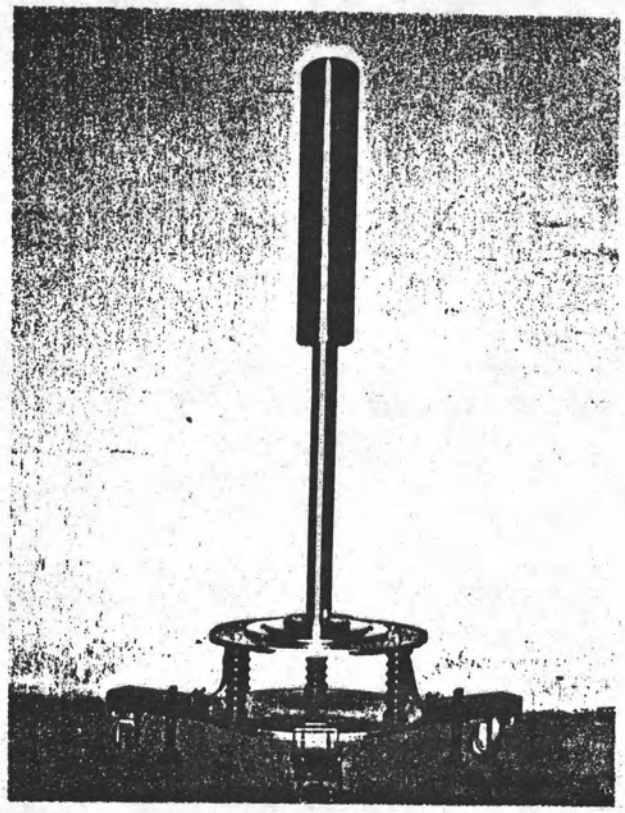
ความยาวท่อฉนวนพีวีซีจะประมาณ 2 เท่าของความยาวอิเล็กโทรดทรงกระบอกนอก ในที่นี้ใช้ยาว 170 เซ็นติเมตร (ความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศตามความยาวผิวท่อจะน้อยกว่า 4 กิโลโวลต์ต่อเซ็นติเมตร)

อิเล็กโทรดทรงกระบอกในเมื่อทำเสร็จแล้ววัดความยาวได้ 79.8 เซ็นติเมตร มีรัศมี 7.575 เซ็นติเมตร ภาพถ่ายอิเล็กโทรดทรงกระบอกในแสดงในรูปที่ 3.6 อิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกเมื่อทำเสร็จแล้ววัดความยาวได้ 95 เซ็นติเมตร มีรัศมี 11.5 เซ็นติเมตร ภาพถ่ายอิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกแสดงในรูปที่ 3.7

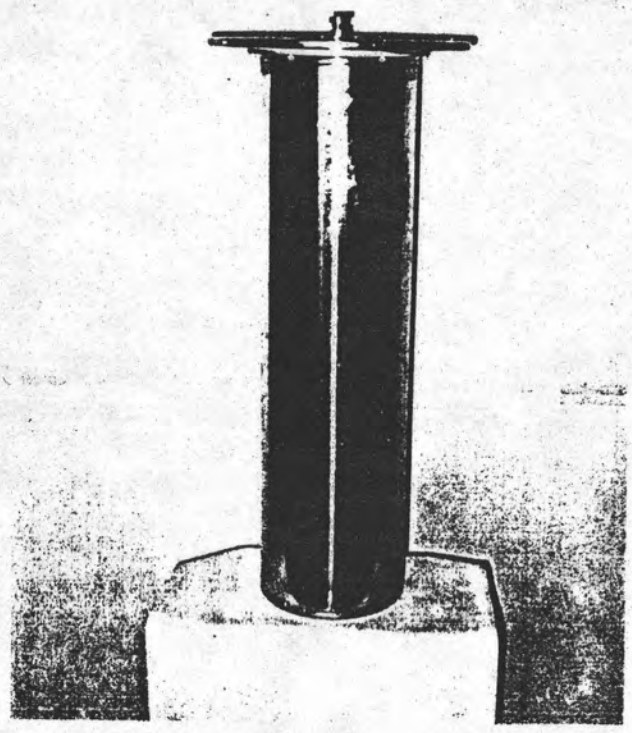
จากมิติที่สร้างเสร็จแล้วจะคำนวณค่า C U_1 และ η ได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า C U_1 และ η ที่คำนวณได้จากมิติของอิเล็กโทรดที่สร้างขึ้น

	C(pF)	U_1(kV)	η
ที่ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	106.4	714	0.806
ที่ระนาบ	4	878	-



รูปที่ 3.6 อิเล็กโทรดทรงกระบอกในของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง



รูปที่ 3.7 อิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

ท่อยิดอิเล็กโทรดทรงกระบอกใน ต้องมีความแข็งแรงทรงกลเพียงพอ ไม่เป็นสนิม และไม่เกิดโคโรนา จึงใช้ท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซ็นติเมตร ยาว 84 เซ็นติเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในและภายนอก วัดได้ 5.62 และ 6.3 เซ็นติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากอิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกกับท่อยิดอิเล็กโทรดทรงกระบอกใน มีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม อาศัยสมการ (3.2) และ (3.3) จะได้

$$U_1 = 935 \text{ กิโลโวลต์} \quad (> V_{max} = 688 \text{ กิโลโวลต์})$$

$$\eta = 0.49 \quad (> 0.43)$$

สายนำแรงต่ำในตัวเก็บประจุภาคแรงสูงต้องการความแข็งแรงทางกล เพราะต้องทำเกลียวที่ปลายทั้งสอง จึงใช้ลวดสเตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.63 เซ็นติเมตร ยาว 86 เซ็นติเมตร สายนำแรงต่ำจะร้อยอยู่ในท่อที่ใช้ยิดอิเล็กโทรดทรงกระบอกใน จึงมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ดังนั้น เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำแรงต่ำหาได้จากสมการ (12)

$$Z_o = 60.\sqrt{\mu_r/\varepsilon_r} \cdot \ln(r_2/r_1) \qquad (3.7)$$

เมื่อ Z_o คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำแรงต่ำ

μ_r คือ เพอร์มีอบิลิตีของก๊าซ $SF_6 = 1$

ε_r คือ เพอร์มิตติวิตีของก๊าซ $SF_6 = 1.0021$

r_2 คือ รัศมีภายในของท่อทองเหลือง

r_1 คือ รัศมีของสายนำแรงต่ำ

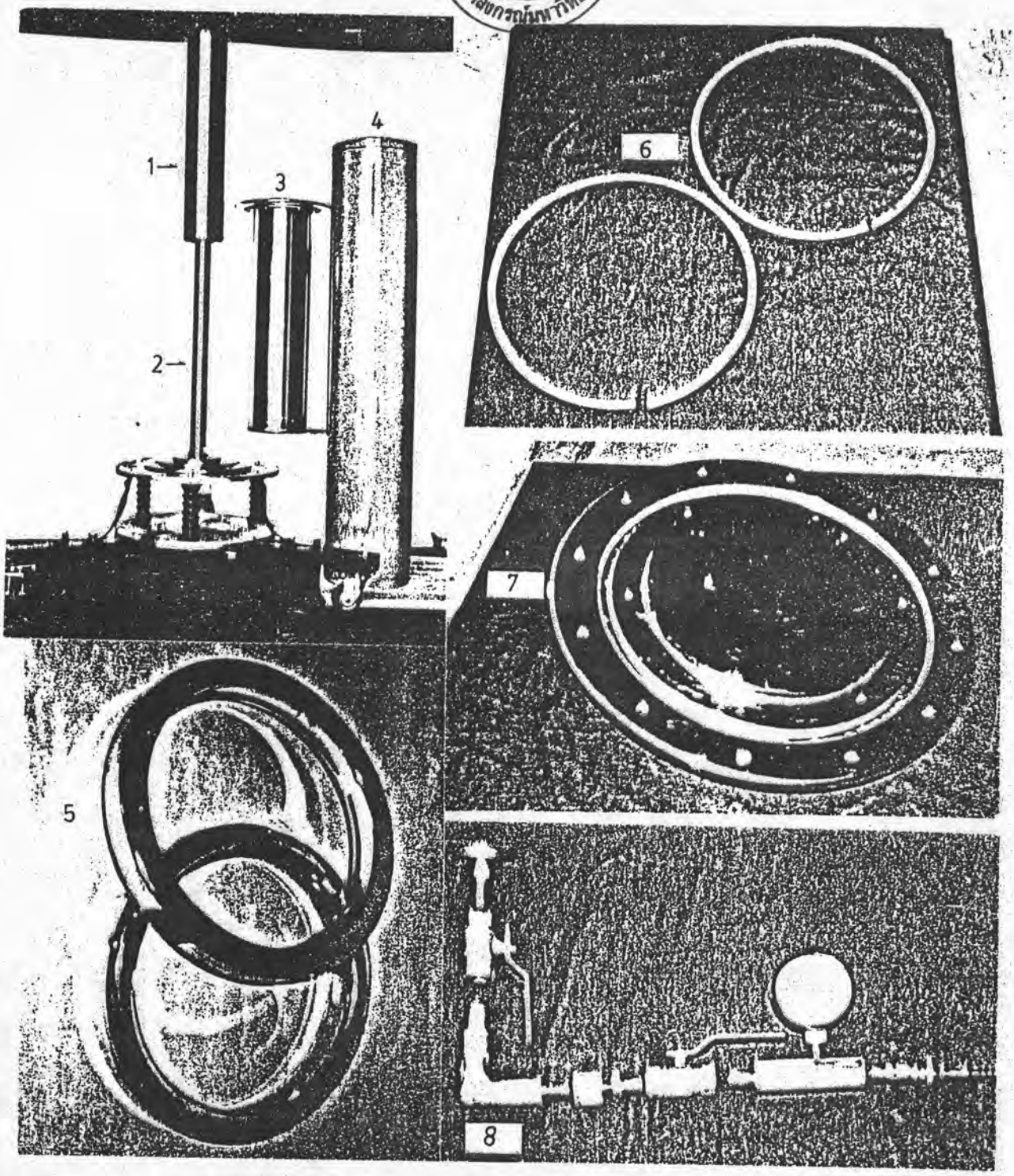
จากมิติของท่อยิดอิเล็กโทรดทรงกระบอกในและสายนำแรงต่ำ จะได้ $Z_o = 131\ \Omega$

ดังนั้นตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ออกแบบสร้างขึ้นจะมี

- ความจุไฟฟ้า 110.4 พิโคฟารัด
- แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด 714 กิโลโวลต์
- เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำแรงต่ำ 131
- ความดันก๊าซ SF_6 2.5 บาร์ ที่ 20 องศาเซลเซียส
- ท่อพีวีซีชนิดทนความดันได้ 8.5 บาร์ ยาว 170 เซ็นติเมตร เป็นภาชนะอัดความดัน

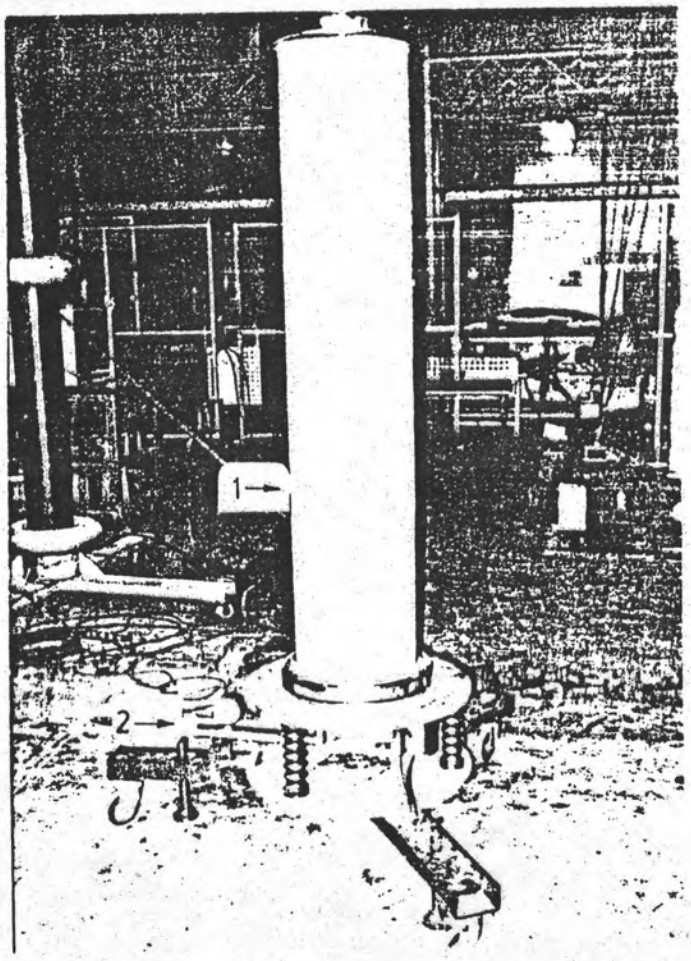
ส่วนประกอบสำคัญของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง และตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ประกอบเสร็จแล้ว แสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 ส่วนประกอบสำคัญของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

1 อิเล็กโทรดทรงกระบอกใน
2 ท่อซีลด์ทองเหลืองใช้ยึดทรงกระบอกใน
3 อิเล็กโทรดทรงกระบอกนอก
4 ท่อพีวีซี
5 วงแหวนเหล็กสำหรับยึดหน้าแปลน
6 แหวนทองเหลืองสำหรับรั้งวงแหวน 5
7 หน้าแปลนปิดหัวท้ายท่อพีวีซี
8 วาล์วเปิด-ปิด และเกจวัดความดัน



รูปที่ 3.9 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงเมื่อประกอบเสร็จแล้ว

1 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง 2 วาล์วเปิด-ปิด และเกจวัดความดัน

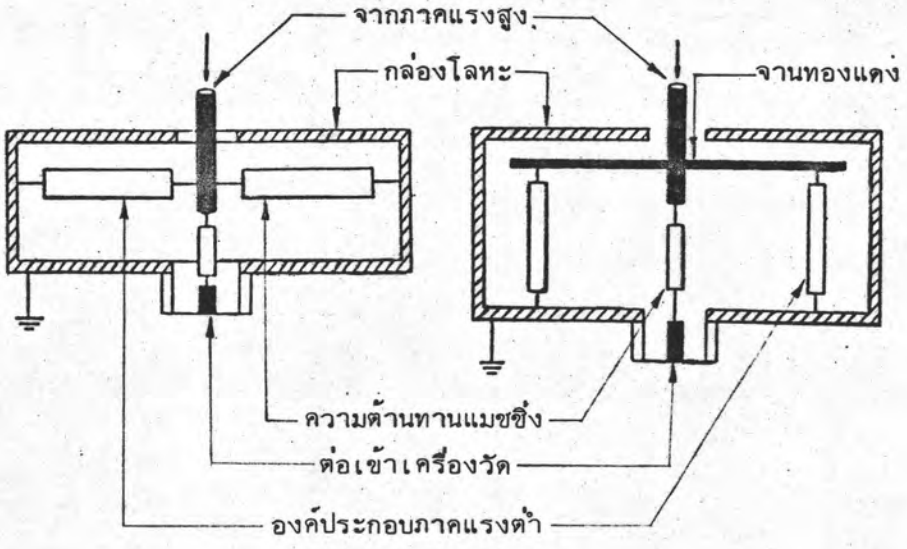
3.3 การออกแบบและสร้างองค์ประกอบภาคแรงต่ำ

3.3.1 คุณลักษณะที่ต้องการ

ภาคแรงต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญยิ่งส่วนหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของโวลเจดิไวเดอร์ หลักเกณฑ์ทั่วไปที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบภาคแรงต่ำมีดังนี้

ก) แรงดันขาออกไม่ควรต่ำเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น สัญญาณรบกวนจากกระแสที่ไหลในเปลือกนอกของเคเบิลวัด ถ้าขนาดของแรงดันขาออกต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนมีผลเด่นชัดขึ้น

ข) การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำ และความต้านทานแมชชิ่งของเคเบิลวัด ต้องพิจารณาเป็นพิเศษเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงต่ำจะมีต่อลูปขาเข้า(input loop)ของเคเบิลวัด จึงควรจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำกับความต้านทานแมชชิ่งให้อยู่ในลักษณะทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม แบบเรเดียล (radial) หรือ ให้เกิดลูปเล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ ตัวอย่างการจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำ แสดงในรูปที่ 3.10



ก) แบบเรเดียล ข) แบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการจัดวางองค์ประกอบในวงจรภาคแรงต่ำ

ค) องค์ประกอบภาคแรงต่ำต้องมีสเตรอินดัคแตนซ์ต่ำ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ที่ภาวะทรานเซี้ยนมีค่าต่ำ ทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับจากภาคแรงต่ำเข้าไปในวงจรภาคแรงสูงมีค่าลดลง

ง) องค์ประกอบภาคแรงต่ำควรจะอยู่ในกล่องโลหะ และอยู่ใกล้ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงให้มากที่สุด เช่น ที่ฐานของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ทั้งนี้เพื่อลดผลรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก

จ) เลือกใช้ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำที่ใช้วัสดุฉนวนที่มีค่าเพอร์มิตติวิตีคงที่ในช่วงความถี่กว้าง เพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าคงที่ที่สภาวะทรานเซี้ยน ชนิดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมได้แก่ โพลีสไตรีน ไมก้า อากาศ หรือสูญญากาศ นอกจากนี้ควรเลือกใช้วัสดุฉนวนที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับฉนวนภายในตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

ฉ) โครงสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำควรจะออกแบบให้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เพื่อความสะดวกในการเปลี่ยนอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์

3.3.2 การเลือกแรงดันขาออก

แรงดันขาออกสูงสุดของโวลเตจดิไวเดอร์กำหนดด้วยแรงดันป้อนเข้าสูงสุดของเครื่องวัดแรงดันต่ำซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคปหรือโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอด เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะทำให้ทราบอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ และสามารถคำนวณหาค่าตัวประกอบวงจรของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวประจุได้โดยอาศัยสมการ

$$a = (C_1+C_2) / C_1 \qquad (3.10)$$

เมื่อ a คือ อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์

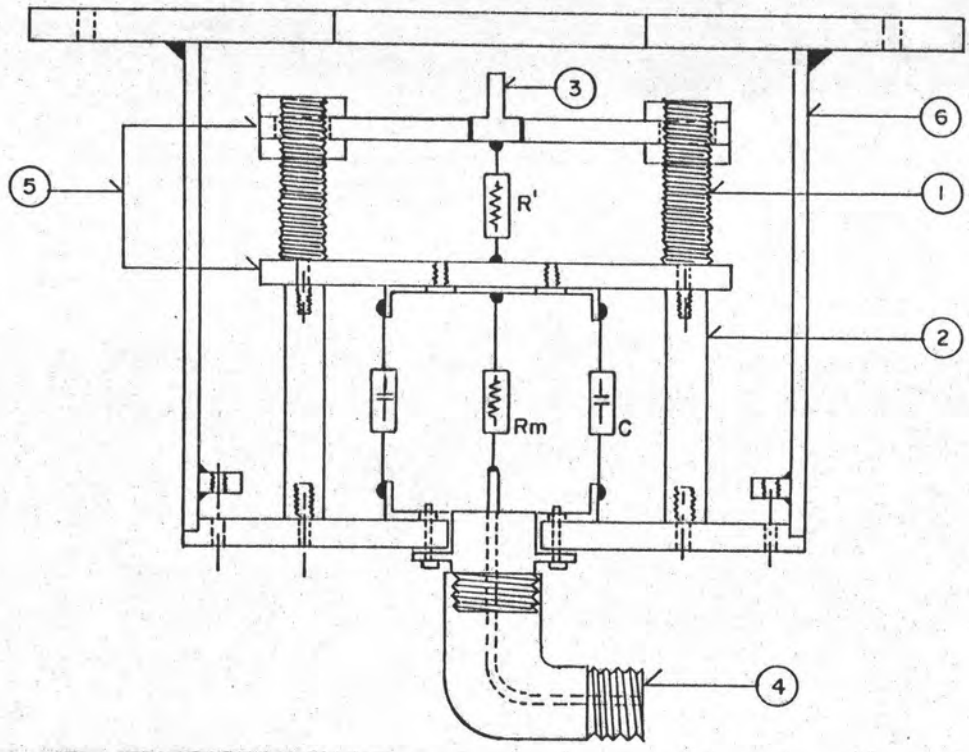
C_1 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

C_2 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

แรงดันป้อนเข้าที่กำหนดของอิมพัลส์ออสซิลโลสโคปและโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดที่มีอยู่ มีค่าในย่าน 200 400 800 และ 1,600 โวลต์ ฉะนั้นจึงเลือกแรงดันขาออกประมาณ 400-500 โวลต์ เมื่อพิจารณาแรงดันขาเข้าซึ่งมีขนาด 400 กิโลโวลต์ จึงเลือกอัตราส่วนแรงดันมีค่า 1000 ต่อ 1

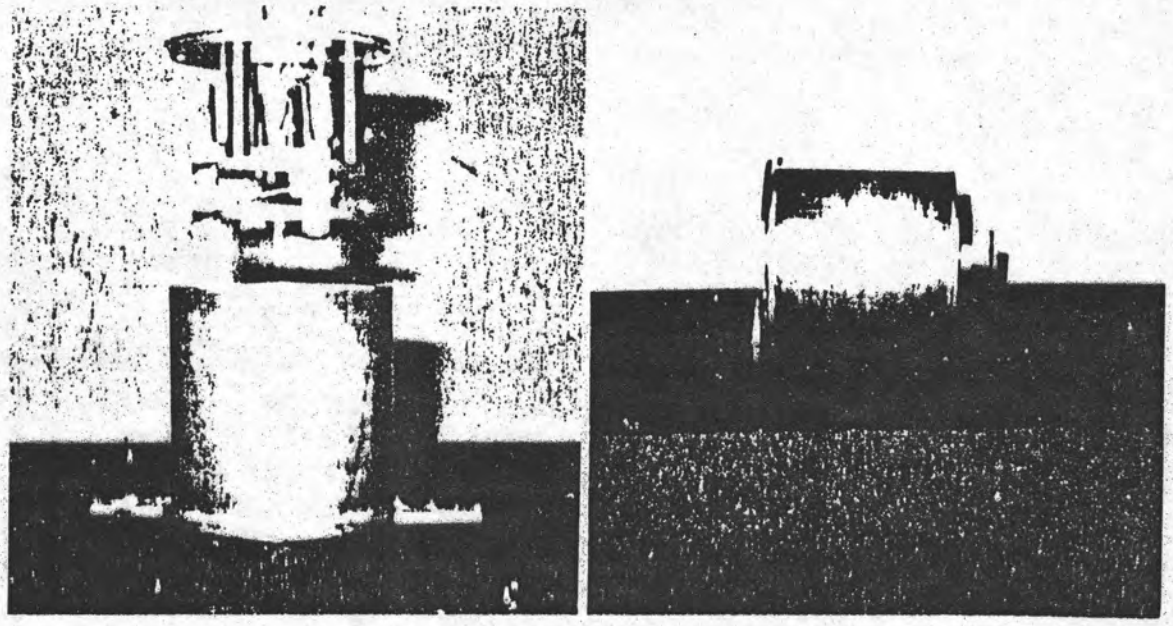
3.3.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำกำหนดด้วยค่าแรงดันขาออก และอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 400 โวลต์ และ 1000 ต่อ 1 ตามลำดับ จากสมการ (3.10) และค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง C_1 = 110.4 พิโคฟารัด จะคำนวณค่า C_2 ได้ 110.29 นาโนฟารัด เลือกใช้ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำชนิดไมก้า ขนาดตัวละ 12 นาโนฟารัด 630 โวลต์ จำนวน 9 ตัว ต่อขนานกัน ได้ค่าความจุไฟฟ้ารวม 108 นาโนฟารัด บรรจุในกระป๋องทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซ็นติเมตร ยาว 13 เซ็นติเมตร ยึดติดที่ฐานตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ดังรูปที่ 3.11 ก) และ ข) และรูปที่ 3.12



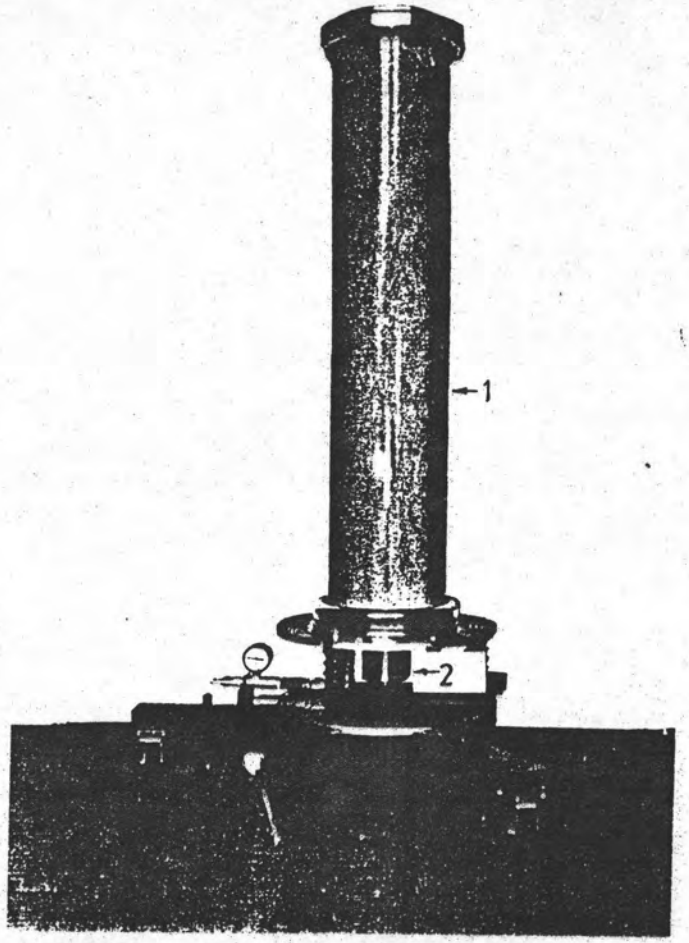
1 แท่งฉนวนพลาสติกมีเกลียว
2 แท่งฉนวนเบคคาไลท์
3 Banana Jack
4 ขั้วสำหรับต่อเคเบิลวัด
5 หน้าจานทองเหลือง
6 กระบ๋องทองเหลือง

ก)



ข)

รูปที่ 3.11 โครงสร้างภาคแรงต่ำ



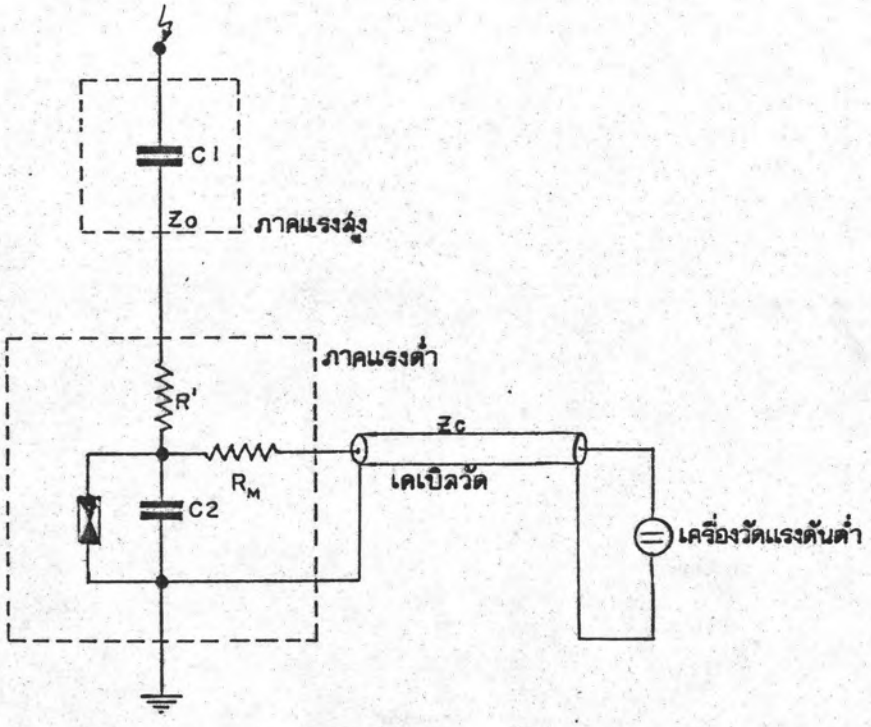
รูปที่ 3.12 การประกอบเป็นโวลเตจดิไวเดอร์
1 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง
2 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

3.3.4 ความต้านทานแมชชิ่งและเคเบิลวัด

เพื่อป้องกันการแกว่งและการสะท้อนของสัญญาณที่วัด จำเป็นต้องใช้ความต้านทานแมชชิ่ง R' ระหว่างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงกับแรงต่ำและความต้านทานแมชชิ่งของเคเบิลวัด R_M อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ ความต้านทานแมชชิ่งระหว่างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงกับแรงต่ำอยู่ที่ส่วนบน (ดูรูปที่ 3.11 ก)

ความต้านทานแมชชิ่ง R' และ R_M ใช้ความต้านทานแบบฟิล์มโลหะอ๊อกไซด์ เพราะมีสเตรอินดัคแตนซ์ต่ำ มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี การเลือกค่าความต้านทานแมชชิ่ง R' เลือกให้สอดคล้องกับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำแรงต่ำในตัวเก็บประจุภาคแรงสูงซึ่งมีค่า 131Ω ความต้านทานแมชชิ่ง R_M เลือกเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัดมีค่าเท่ากับ 75 Ω

เพื่อป้องกันความเสียหายแก่อุปกรณ์ภาคแรงต่ำที่ต่อกับโวลเตจดิไวเดอร์ จึงต่อตัวป้องกันแรงดันเกินขนาด 550 โวลต์ ขนานไว้กับตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรภาคแรงต่ำและอุปกรณ์วัดของโวลเตจดิไวเดอร์