หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างโวลเตจดิไวเดอร์

3.1 คุณลักษณะที่กำหนด

โวลเตจดิไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง เป็นแบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง สามารถใช้วัดแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า โดยมีคุณสมบัติได้ตามมาตรฐาน IEC [9] กำหนด

ค่าแรงดันที่กำหนดของโวลเตจดิไวเดอร์ กำหนดด้วยค่าแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้น ต้องการใช้วัดแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กับระบบ 72.5 กิโลโวลต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 325 กิโลโวลต์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า ดังนั้นจึงเลือกแรงดันที่กำหนดเท่ากับ 400 กิโลโวลต์

ภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ ประกอบด้วยตัวเก็บประจุย่อยจำนวนมากต่ออนุกรมอยู่กับความต้านทานหน่วง ซึ่งกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวของภาคแรงสูง โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดนี้มีความเหมาะสม เนื่องจากว่า

ก) สามารถใช้วัดรูปคลื่นแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

ข) สามารถออกแบบให้มีผลตอบสนองดีตามต้องการได้ง่าย โดยเพียงแต่เลือกใช้ค่าความต้านทานที่เหมาะสม

ค) สามารถออกแบบให้ใช้วัดแรงดันสูงมากๆได้โดยไม่มีข้อจำกัด ซึ่งโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดอื่นไม่สามารถทำได้

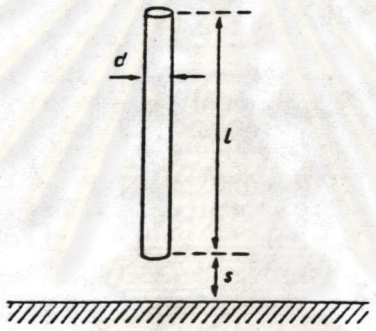
ง) ใช้อากาศเป็นฉนวนในภาคแรงสูง ซึ่งจะไม่เกิดปัญหาเกี่ยวกับการรั่วซึมของฉนวน

จ) สามารถสร้างจากวัสดุที่หาได้ภายในประเทศ ด้วยราคาที่ไม่แพงมากนัก

3.2 การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง

3.2.1 ความจุสเตรลงดิน

ความจุสเตรลงดินเป็นลักษณะสมบัติที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ ค่าความจุสเตรลงดินมีค่าขึ้นอยู่กับมิติและโครงสร้างของโวลเตจดิไวเดอร์ สำหรับตัวเก็บประจุภาคแรงสูงซึ่งเป็นแบบตัวเก็บประจุย่อยเมื่อบรรจุในท่อพีวีซีแล้ว จะสามารถถือได้เป็นแบบตัวเก็บประจุเดี่ยวรูปทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวเก็บประจุเดี่ยวรูปทรงกระบอก

ค่าความจุสเตรลงดิน สามารถหาได้จากสมการ คือ [2]

$$C_E = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left[(2l/d)\sqrt{(4s+l)/(4s+3l)}\right]} \qquad (3.3)$$

เมื่อ C_E คือ ความจุสเตรลงดิน (ฟารัด)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อพีวีซี (เมตร)

l คือ ความยาวท่อพีวีซี (เมตร)

S คือ ระยะจากอิเล็กโทรดล่างเหนือพื้นดิน (เมตร)

ϵ คือ เพอร์มิตติวิตีของตัวกลาง (ฟารัด/เมตร)

ความยาวของท่อพีวีซีกำหนดด้วยระยะวาบไฟตามผิวฉนวนในอากาศ สำหรับแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า มีค่าอย่างน้อยเท่ากับ 2.5 m / MV [2] โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างมีค่าแรงดันอิมพัลส์พิกัดเท่ากับ 400 kV ดังนั้น ระยะวาบไฟตามผิวฉนวนต้องมีค่าอย่างน้อย 1 เมตร สำหรับท่อพีวีซีที่ใช้นี้ยาว 1.82 เมตร เพราะต้องเว้นระยะห่างของการยึดตัวเก็บประจุย่อยเพื่อมิให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าจนเกิดการเบรกดาวน์

จากรูปที่ 3.1 โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นมีค่า l = 1.88 เมตร d = 0.2 เมตร s = 0.2 เมตร เมื่อแทนค่าในสมการ (3.1) จะได้ค่าความจุสเตรลงดินเท่ากับ 47 พิโคฟารัด

ความจุสเตรลงดินมีผลต่อโวลเตจดิไวเดอร์ ดังนี้คือ

1) ทำให้การกระจายแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ไม่เป็นเชิงเส้น

2) ทำให้ค่าอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ขึ้นอยู่กับความถี่

3) ค่าความจุไฟฟ้าของภาคแรงสูง จะคลาดเคลื่อนจากการคำนวณทางทฤษฎี

3.2.2 ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นนี้ เป็นแบบตัวเก็บประจุย่อย โดยนำตัวเก็บประจุย่อยนั้นมาต่ออนุกรมกัน ให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันตามต้องการ ค่าความจุไฟฟ้าของภาคแรงสูงสามารถเลือกได้ตามเงื่อนไขต่อไปนี้ คือ

1) ขีดจำกัดล่าง ค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูงต้องมากพอที่ทำให้ค่าความจุสเตรลงดิน มีผลต่อการกระจายแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ไม่มากนัก การกระจายแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ควรเป็นแบบเชิงเส้น เพื่อให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงสูงมีค่าเท่า ๆ กัน มิฉะนั้นอาจทำให้เกิดการเบรกดาวน์ หรือวาบไฟตามผิวที่ตัวเก็บประจุย่อยได้

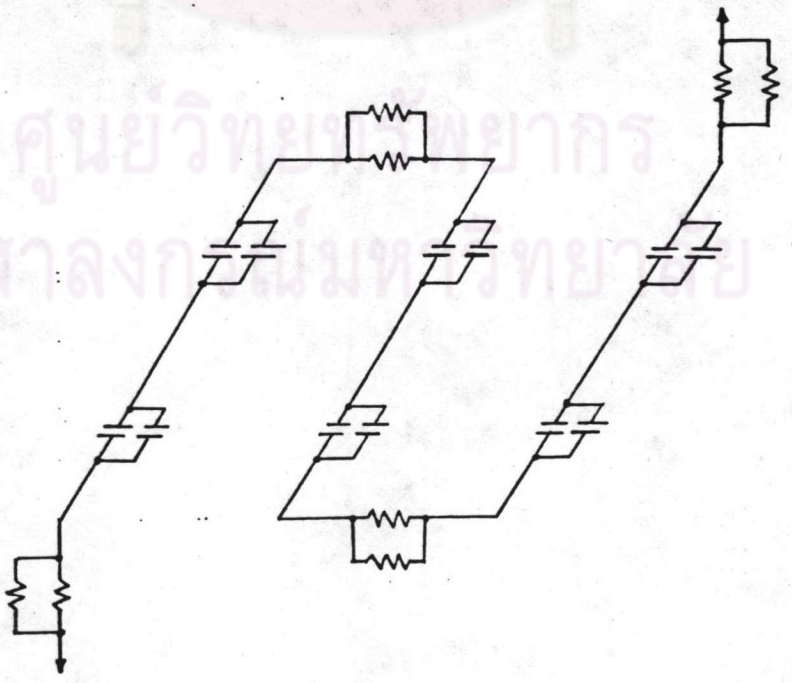
2) ขีดจำกัดบน ค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูงต้องไม่มากจนทำให้โวลเตจดิไวเดอร์ กลายเป็นโหลดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพราะว่าถ้าค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูงมีค่ามากแล้ว อิมพิแดนซ์ของโวลเตจดิไวเดอร์จะมีค่าต่ำลง จะทำให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จ่ายกระแสให้โวลเตจดิไวเดอร์มากขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ไม่ต้องการของระบบวัด

ค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูงที่ใช้ในทางปฏิบัติ มีค่ามากกว่า 40 พิโคฟารัดต่อความสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ 1 เมตร [6]

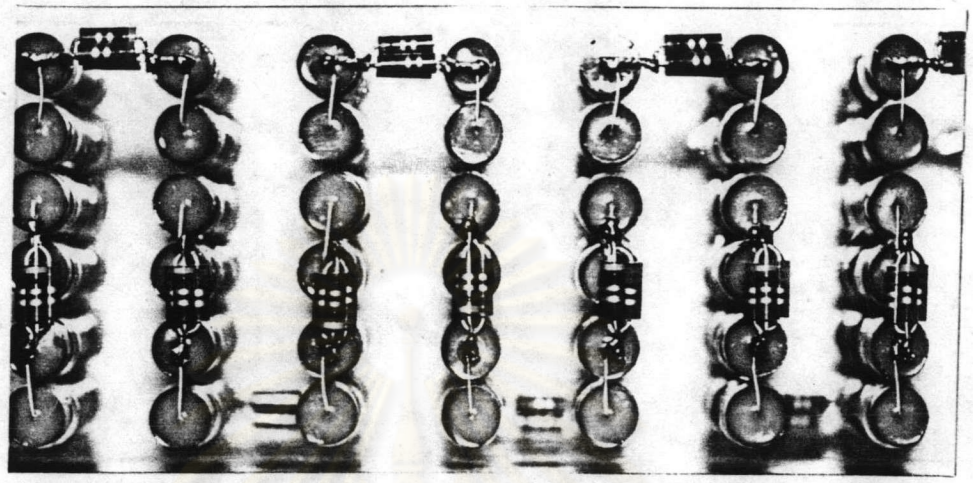
โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นนี้มีค่าความจุสเตรลงดิน 47 pF ค่าความจุไฟฟ้าของภาคแรงสูงต้องมากกว่าค่าความจุสเตรลงดินพอสมควร ดังนั้น ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงนี้ ได้จากการนำตัวเก็บประจุย่อยแบบโพลีเอสเตอร์ฟิลม์ขนาด 0.068 μF 1.5 kVdc มาต่ออนุกรมกันจำนวน 270 ชั้น แต่ละชั้นมีตัวเก็บประจุย่อย 2 ตัวต่อขนานกัน รวมใช้ตัวเก็บประจุย่อย 540 ตัว ได้ค่าความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ 504 pF และสามารถทนแรงดันได้ 405 kVdc

3.2.3 โครงสร้างและการฉนวนของภาคแรงสูง

การจัดต่อตัวเก็บประจุย่อย 540 นี้ ทำโดยใช้แผ่นพลาสติกใสหนา 1/2" จำนวน 2 แผ่น มาเจาะรูให้มีขนาดใหญ่กว่าตัวเก็บประจุย่อยเล็กน้อย ทำการเจาะรูเป็นจำนวนแผ่นละ 45 แถว ๆ ละ 6 รู ซึ่ง 6 รูนี้จะแบ่งออกเป็น 3 คู่ แต่ละคู่นี้จะนำตัวเก็บประจุย่อยสอดเข้าไป แล้วทำการยึดหัวท้ายแผ่นพลาสติกใสทั้ง 2 แผ่น ด้วยแผ่นพลาสติกเช่นเดียวกัน ต่อจากนั้นจึงนำเอาตัวความต้านทานย่อยจำนวน 135 ชุด มาต่ออนุกรมกับตัวประจุย่อยสลับกันไป การเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุย่อย แสดงดังรูปที่ 3.2



ก)

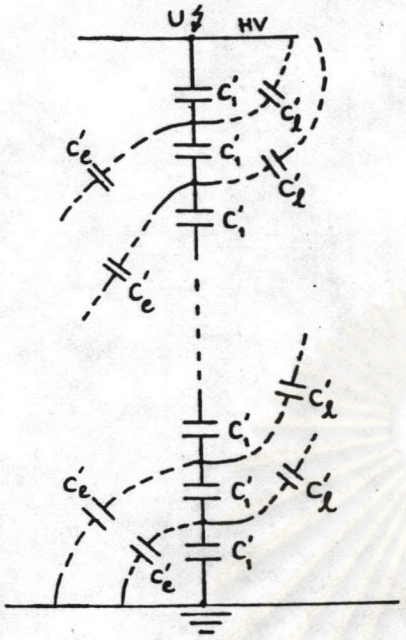


ข)

รูปที่ 3.2 การเชื่อมต่อกันระหว่างตัวเก็บประจุย่อยและตัวความต้านทานย่อยแต่ละชั้น

เมื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ก็นำตัวเก็บประจุภาคแรงสูงนี้ไปใส่ในท่อพีวีซี ขนาด 6" ซึ่งมีหน้าแปลนเหล็กปิดหัวท้ายท่อพีวีซี ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดของตัวเก็บประจุด้วย ภายในท่อมีอากาศที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเป็นฉนวน เพราะอากาศไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติการใช้งานของโวลเตจดิไวเดอร์เนื่องจากพลังงานสูญเปล่าแม้ว่าจะเกิดเบรกดาวน์ก็สามารถกลับสู่สภาพการเป็นฉนวนอย่างเดิมได้อย่างรวดเร็ว (Self restoring) จึงมีความสะดวกในการประกอบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ คือ ไม่ต้องซีลที่รอยต่อต่างๆ ไม่มีปัญหาการรั่วซึมของฉนวน และเป็นฉนวนซึ่งไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายใดๆ

เนื่องจากแรงดันกระจายของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น เพราะว่าผลของความจุสเตรลงดิน โดยตัวเก็บประจุย่อยที่ปลายด้านแรงสูงจะมีแรงดันคร่อมมากสุด ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุย่อยนี้ว่า สามารถทนต่อแรงดันเมื่อโวลเตจดิไวเดอร์นี้ใช้งานที่แรงดันพิกัดได้หรือไม่ โดยการพิจารณากรณีซึ่งเกิดแรงดันคร่อมมากสุด (R_1 =0) วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง แสดงดังรูปที่ 3.3



C'_1 คือ ตัวเก็บประจุย่อย

C'_e คือ คะแปซิแตนซ์ระหว่างตัวเก็บประจุกับดิน

C'_l คือ คะแปซิแตนซ์ระหว่างตัวเก็บประจุกับสายแรงสูง

U คือ แรงดันสูง

n คือ จำนวนตัวเก็บประจุย่อย

k คือ ตัวเก็บประจุย่อยตัวที่ k จากดิน

รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

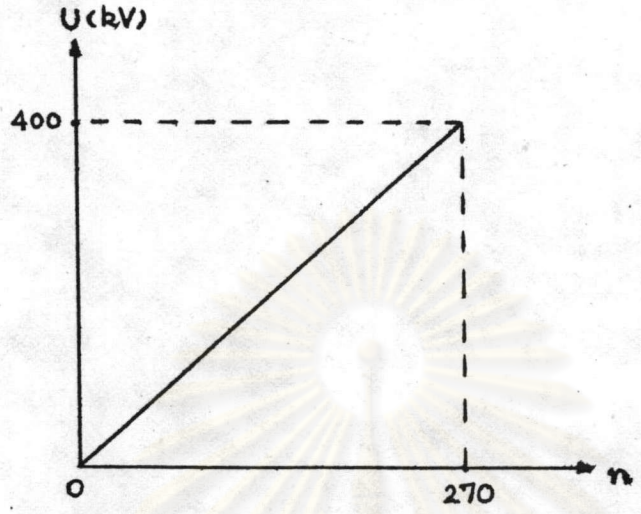
เมื่อ U_k คือ แรงดันที่ตัวเก็บประจุย่อย k เทียบกับดิน [12]

$$U_k = \frac{U}{C'_e + C'_1}\left[\frac{C'_e \sinh(\alpha k/n)}{\sinh\alpha} + C'_1\left\{1-\frac{\sinh\alpha(n-k/n)}{\sinh\alpha}\right\}\right] \quad (3.2)$$

$$\alpha = \sqrt{(C'_e + C'_1)/C'_1} \quad (3.3)$$

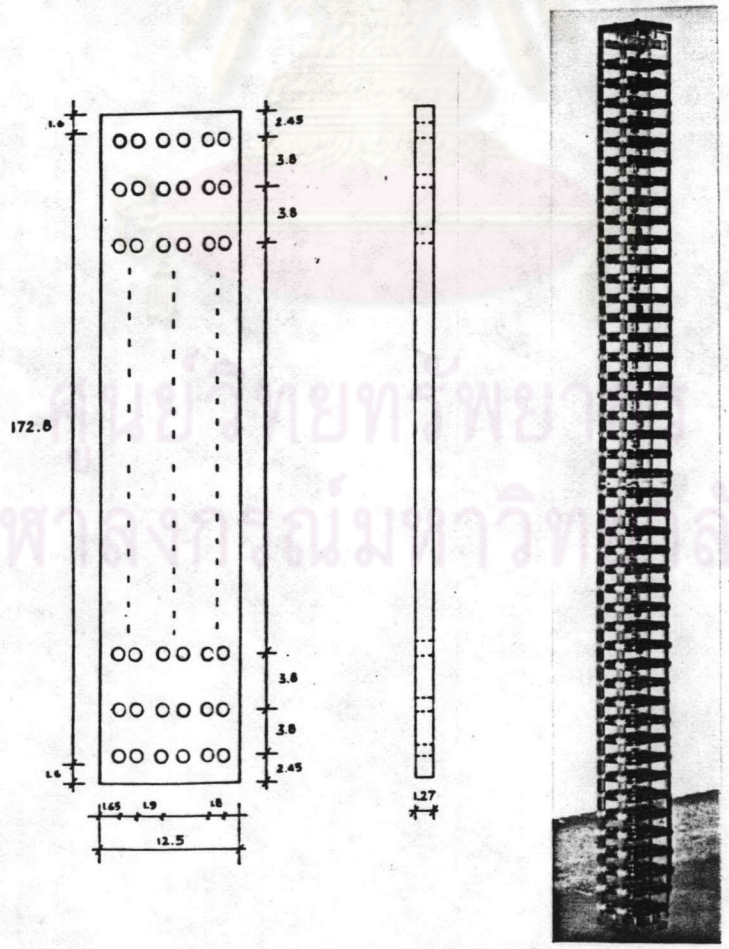
เมื่อ U = 400 kV , C'_1 = 0.136 μF , C'_e = 0.148 pF , C'_l = 0, n = 270 จะได้ค่าแรงดันอิมพัลส์ตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยปลายด้านแรงสูงเท่ากับ 1.48 kV ซึ่งตัวเก็บประจุย่อยมีค่าแรงดันพิกัดเท่ากับ 1.5 kVdc ดังนั้น ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ออกแบบนี้สามารถใช้งานที่แรงดันอิมพัลส์พิกัด 400 kV ได้ตามต้องการ เพราะว่าแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุย่อย 1.5 kVdc นี้สามารถทนแรงดันอิมพัลส์ได้มากกว่า 1.5 kV แน่นอน เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆเท่านั้น

แรงดันกระจายของโวลเตจดิไวเดอร์ที่คำนวณได้ แสดงดังรูปที่ 3.4

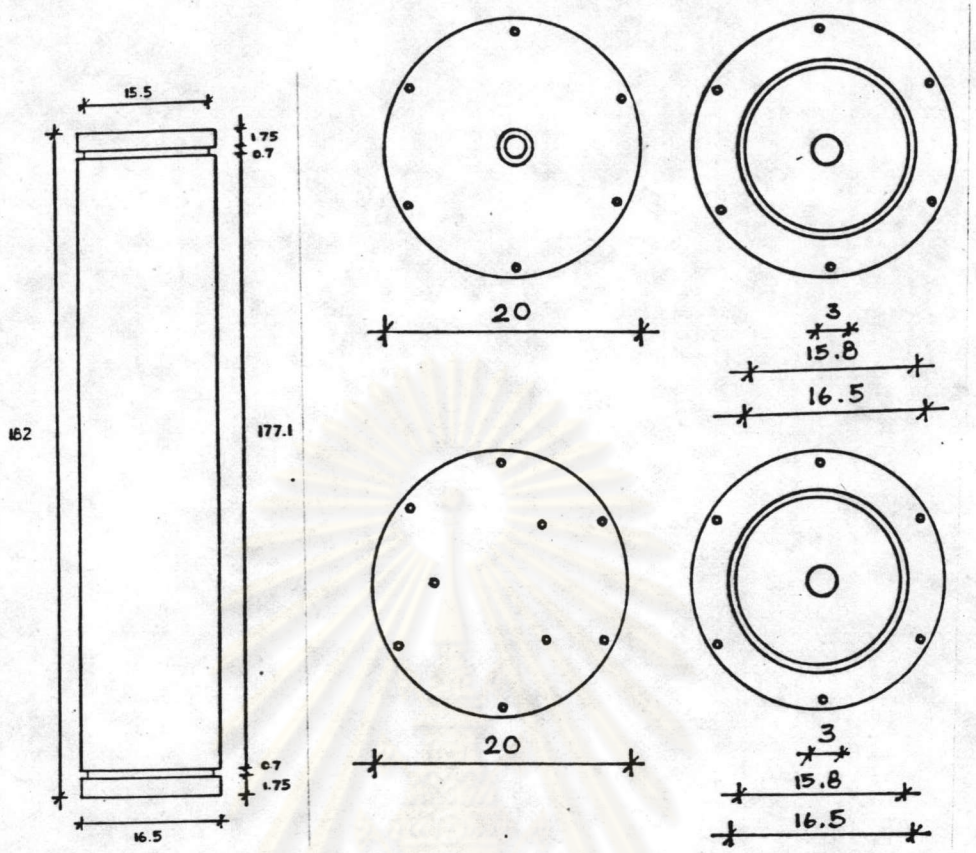


รูปที่ 3.4 แรงดันกระจายของโวลเตจดิไวเดอร์

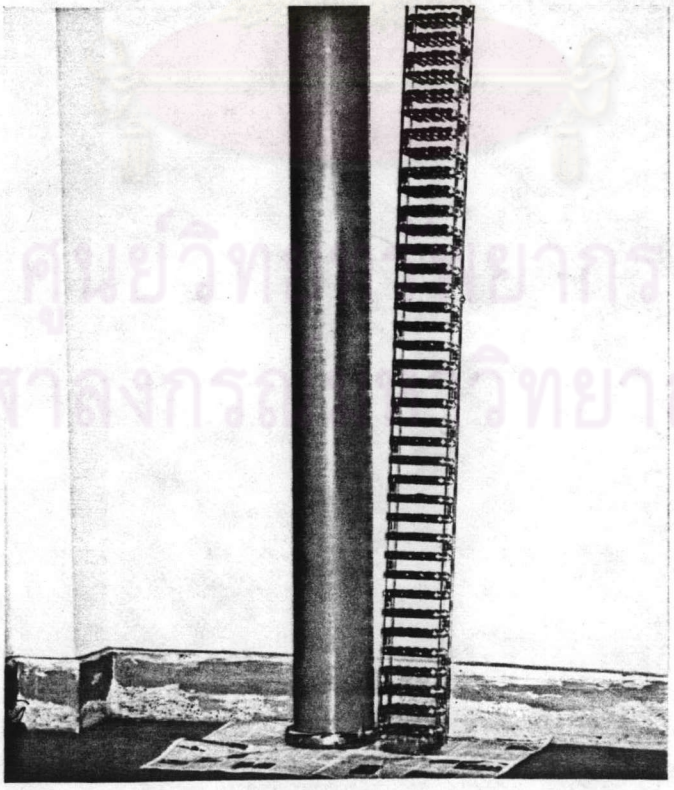
มิติและโครงสร้างของภาคแรงสูง แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ก) แผ่นพลาสติกใสสำหรับบรรจุตัวเก็บประจุย่อย (ต่อ)

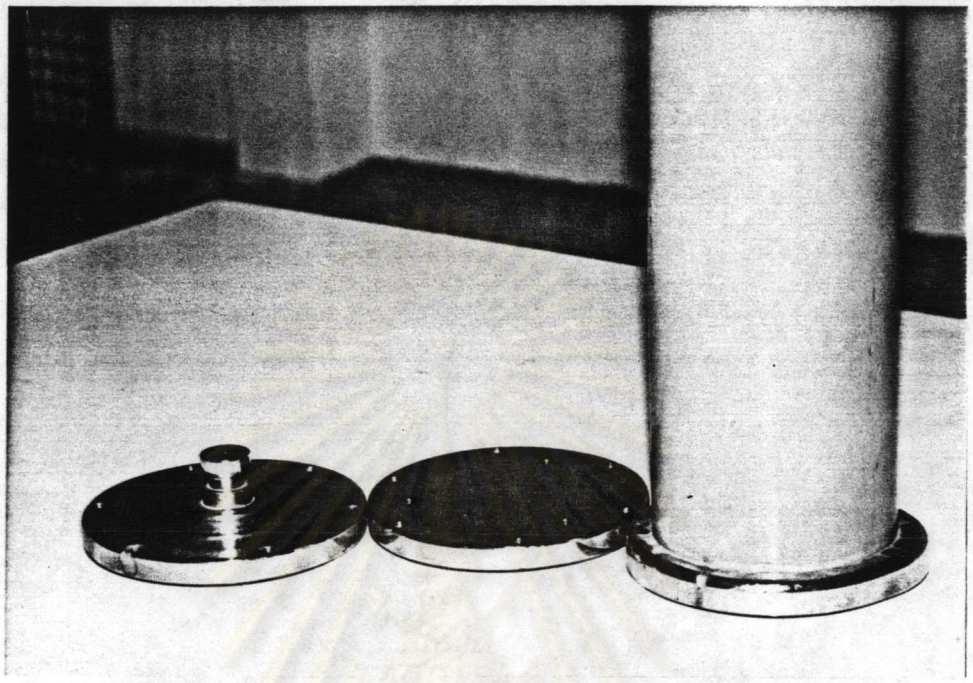


รูปที่ 3.5 ข) มิติของท่อ พีวีซี และฝาปิด (ต่อ)

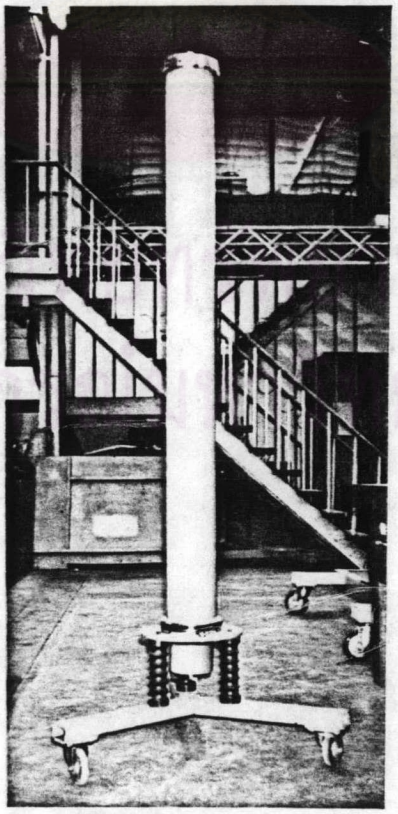


รูปที่ 3.5 ค) ท่อ พีวีซี และตัวเก็บประจุภาคแรงสูง (ต่อ)

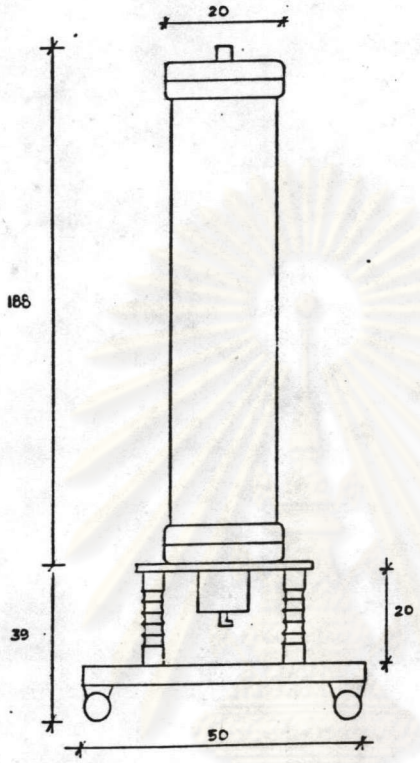
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 ง) ท่อ พีวีซี และฝาปิด (ต่อ)



รูปที่ 3.5 จ) ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงซึ่งประกอบบนฐานล้อเลื่อน (ต่อ)



ฉ) มิติของโวลเตจดิไวเดอร์

รูปที่ 3.5 มิติและโครงสร้างของภาคแรงสูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.4 ความต้านทานภาคแรงสูง

ความต้านทานภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์นี้ต่ออยู่กับตัวเก็บประจุย่อยภาคแรงสูง โดยต่อกระจายตลอดความยาวของภาคแรงสูง ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันที่ต้องการวัด ซึ่งการแกว่งของแรงดันนี้ เกิดจากการเรโซแนซ์ระหว่างความเหนี่ยวนำในสายนำแรงสูงและตัวเก็บประจุภาคแรงสูง การต่อความต้านทานกระจายนี้ยังสามารถช่วยหน่วงการแกว่ง ซึ่งเกิดขึ้นภายในโวลเตจดิไวเดอร์เองได้ดีกว่าการต่อความต้านหน่วงภายนอกโวลเตจดิไวเดอร์ [13]

ค่าความต้านทานภาคแรงสูงที่พอเหมาะสามารถหาได้จากสมการ [10]

$$R_1 = 0.25 \ldots 1.5 \sqrt{L/C_1} \qquad (3.4)$$

เมื่อ R_1 คือ ความต้านทานภาคแรงสูง (โอห์ม)

L คือ ความเหนี่ยวนำทั้งหมดของระบบ (เฮนรี)

C_1 คือ ความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง (ฟารัด)

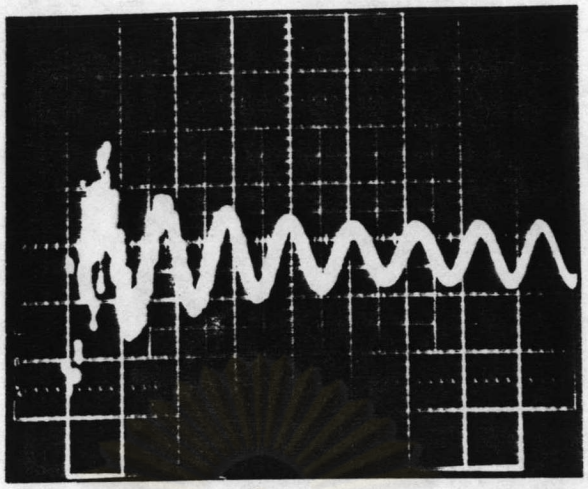
ปกติค่าความต้านทานภาคแรงสูงจะอยู่ในช่วง 50 - 1,000 โอห์ม [10] แต่ต้องไม่มากเกินไป เพราะจะทำให้ค่าเวลาตอบสนองสูง และต้องไม่น้อยเกินไปเพราะจะหน่วงการแกว่งของรูปคลื่นไม่เพียงพอ ค่าขีดจำกัดบนของ R_1 หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้ ค่าคงตัวเวลาของภาคแรงสูง $R_1 * C_1 \leq 120$ ns [10] เพื่อให้โวลเตจดิไวเดอร์สามารถบันทึกรูปคลื่นได้ถูกต้อง โดยไม่ขึ้นกับค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ

จากหัวข้อ 3.2.2 ได้ค่า C_1 เท่ากับ 504 พิโคฟารัด ซึ่งถ้าจะหาค่า R_1 จากสมการ (3.4) แล้ว ต้องรู้ค่าความเหนี่ยวนำทั้งหมดของระบบก่อน ดังนั้น จึงได้ทำการทดลองหาค่า L โดยการ

- เชื่อมต่อตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงสูงทั้งหมดให้เป็นแบบตัวเก็บประจุล้วน ($R_1 = 0$) ได้ค่า $C_1 = 504$ pF
- ทำการทดลองหาผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์

จากการทดลองจะได้ออสซิลโลแกรมของผลตอบสนองรูปขั้นดังแสดงในรูปที่ 3.6

I10311497X



รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองรูปชั้นของโวลเตจดิไวเดอร์ เมื่อ $R_1 = 0$
สเกลเวลา 0.5 μs/div , สเกลแรงดัน 50 mV/div

จากรูปที่ 3.6 สามารถหาความถี่การแกว่งของรูปคลื่นแรงดันได้เท่ากับ 1.82 MHz จากความสัมพันธ์ $f = 1 / (2\pi \sqrt{LC})$.

เมื่อ f คือ ความถี่การแกว่งของรูปคลื่น (Hz)

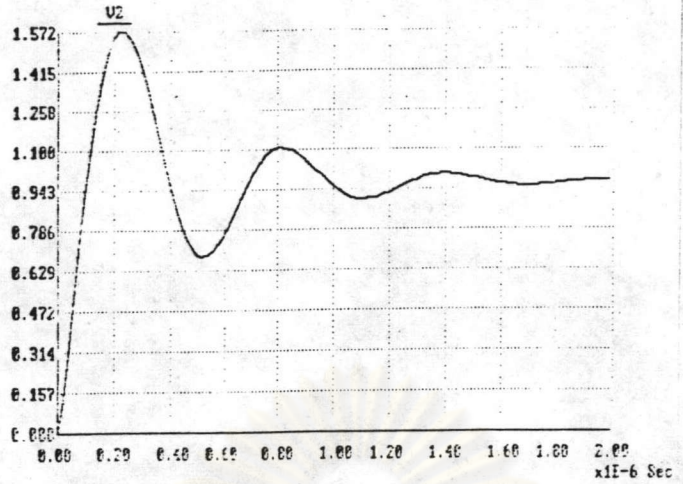
L คือ ความเหนี่ยวนำ (H)

C คือ ความจุไฟฟ้า (F)

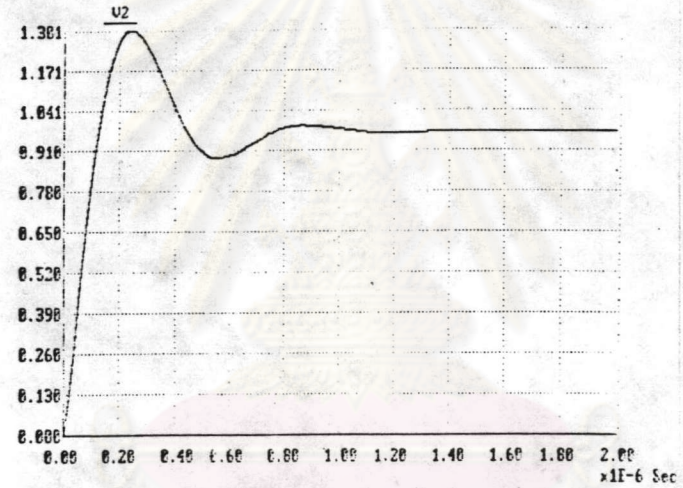
ดังนั้น จะหาค่าความเหนี่ยวนำทั้งหมดของระบบได้เท่ากับ 15.32 μH

จากสมการ (3.4) และค่า $C_1 = 504$ pF , $L = 15.32$ μH จะหาค่า R_1 ได้อยู่ในช่วง 43 - 260 โอห์ม เพื่อที่จะหาค่า R_1 ให้ได้ค่าที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น จึงทำการหาค่า R_1 โดยการวิเคราะห์วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์ทางคอมพิวเตอร์ด้วยการใช้ "ซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้นแบบท่อน" [11] หาผลตอบสนองรูปชั้นที่ดีด้วยการเปลี่ยนค่า R_1

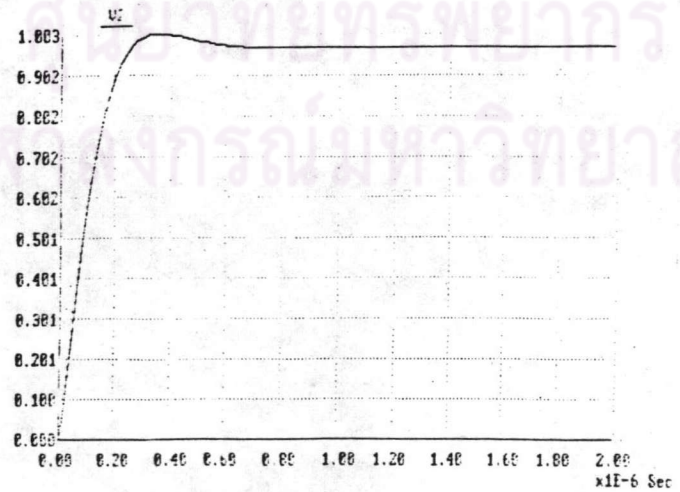
ผลตอบสนองรูปชั้นที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.7



ก) R_1 = 43 โอห์ม



ข) R_1 = 111 โอห์ม



ค) R_1 = 260 โอห์ม

รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองรูปขั้นที่ได้จากการวิเคราะห์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 3.7 สามารถหาเวลาตอบสนองบางส่วน (T_a) ได้โดยนำกระดาษกราฟไปทาบบนผลตอบสนองรูปขั้น แล้วนับจำนวนช่องในพื้นที่ที่ต้องการออกมาคำนวณ สมมติว่าหาค่า T_a = x ช่อง สเกลเวลาที่ใช้เท่ากับ y μs / div ซึ่งแบ่งออกเป็น 10 ช่อง อัมปลิจูดของผลตอบสนองรูปขั้นเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่ากับ z ช่อง จะสามารถหาเวลาตอบสนองบางส่วน (T_a) ได้คือ

$$T_a = xy / 10z \qquad (3.5)$$

การหา Overshoot ของผลตอบสนองรูปขั้นก็ทำเช่นเดียวกันโดยนำกระดาษกราฟไปทาบบนผลตอบสนองรูปขั้น แล้วนับจำนวนช่องของ a และ b ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2 ค่า T_a และ Overshoot (Δu) ที่หาได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ลักษณะของผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์

R_1 (โอห์ม)	T_a (ns)	Δu (%)	T (ns)
43	45.0	55.0	4.9
111	56.0	35.0	3.4
260	87.6	3.85	80.1

จากตารางที่ 3.1 เมื่อนำ T_a และ Δu ไป plot ลงในรูปที่ 2.3 ผลปรากฏว่า ค่าที่ได้ทั้งหมดนี้อยู่ในพื้นที่ซึ่งทำให้การวัดหน้าคลื่น (T_1) ของแรงดันอิมพัลส์มีความคลาดเคลื่อน < 10 % แต่จะเห็นว่าค่าเวลาตอบสนอง (T) ของ R_1 = 111 โอห์ม มีค่าน้อยสุดเท่ากับ 3.4 ns ดังนั้น จึงได้สร้างความต้านทานภาคแรงสูง R_1

ซึ่งมีค่าประมาณ 111 โอห์มชั้น 2 ชุด เพื่อศึกษาผลของความต้านทานชนิดต่างๆกันว่ามีผลต่อผลตอบสนองรูปชั้นอย่างไร ความต้านทานที่ใช้ทำความต้านทานภาคแรงสูงนี้ คือ

1) แบบฟิล์มคาร์บอน ใช้ตัวความต้านทาน 1 โอห์ม 2 วัตต์ ต่อขนานกับตัวความต้านทาน 4.7 โอห์ม 2 วัตต์ จำนวน 135 ชุด ได้ค่า R_1 เท่ากับ 111 โอห์ม

2) แบบคาร์บอน ใช้ตัวความต้านทาน 2.2 โอห์ม 1 วัตต์ 2 ตัว มาต่อขนานกับตัวความต้านทาน 3 โอห์ม 1 วัตต์ 1 ตัว จำนวน 135 ชุด ได้ค่า R_1 เท่ากับ 108 โอห์ม

นำความต้านทานทั้งสองชุดนี้มาต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุย่อยกระจายตลอดความยาวของภาคแรงสูง ซึ่งได้ค่าคงตัวเวลาของภาคแรงสูง $R_1 * C_1$ ประมาณ 56 ns

3.3 การออกแบบและสร้างภาคแรงต่ำ

3.3.1 คุณลักษณะที่ต้องการ

ภาคแรงต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากส่วนหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของโวลเตจดิไวเดอร์ การออกแบบสร้างภาคแรงต่ำต้องคำนึงถึงปัญหาต่างๆ ดังนี้

ก) แรงดันขาออกต้องไม่ต่ำเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น จากกระแสที่ไหลในเปลือกนอกของสายเคเบิลวัด หรือจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นตามส่วนต่างๆของระบบ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้น เป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด

ข) การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำ และความต้านทานแมชชิ่งของเคเบิลวัด ต้องพิจารณาเป็นพิเศษเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงต่ำจะมีต่อลูปขาเข้าของเคเบิลวัด จึงควรจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำกับความต้านทานแมชชิ่งให้อยู่ในลักษณะทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

ค) องค์ประกอบภาคแรงต่ำต้องมีสเตรอินดัคแตนซ์ต่ำ เพื่อให้อิมพิแดนซ์ที่ภาวะทรานเซียนต์มีค่าต่ำ ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงต่ำเข้าไปในวงจรภาคแรงสูงมีค่าลดลง

ง) วัสดุที่ใช้ทำตัวเก็บประจุและตัวความต้านทานภาคแรงต่ำควรเป็นชนิดเดียวกับที่ใช้ในภาคแรงสูง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิขององค์ประกอบภาคแรงสูงและแรงต่ำ

จ) โครงสร้างภาคแรงต่ำควรออกแบบให้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เพื่อความสะดวกในการเปลี่ยนอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์

3.3.2 การเลือกแรงดันขาออก

แรงดันขาออกสงสุดของโวลเตจดิไวเดอร์กำหนดด้วยแรงดันป้อนเข้าสูงสุดของเครื่องวัดแรงดันต่ำ ซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคปหรือโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอด เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะทำให้ทราบอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ และสามารถคำนวณหาค่าตัวประกอบวงจรของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงได้โดยอาศัยสมการ

$$a = (C_1 + C_2) / C_1 \qquad (3.6)$$

เมื่อ a คือ อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์

C_1 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

C_2 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

แรงดันป้อนเข้าที่กำหนดของอิมพัลส์ออสซิลโลสโคปและโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดที่มีอยู่ มีค่าในย่าน 200 - 1,600 โวลต์ ดังนั้นจึงเลือกแรงดันขาออก 3 ค่า คือ 200 400 และ 800 โวลต์ อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์มีค่าประมาณ 2,000 : 1 , 1,000 : 1 และ 500 : 1 ตามลำดับ

3.3.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำกำหนดด้วยค่าแรงดันขาออกและอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ จากค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง C_1 = 504 pF และสมการ

(3.6) ค่า C_2 ที่คำนวณได้มีค่าดังนี้ คือ

ก) C_2 = 251.5 nF

เลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีเอสเตอร์ฟิล์มขนาด 1.5 kVdc 22 nF จำนวน 12 ตัวมาต่อขนานกันได้ค่าความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ 264 nF และได้ค่าอัตราส่วนแรงดันเท่ากับ 524.8

ข) C_2 = 503.5 nF

เลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดเดียวกับข้อ ก) จำนวน 23 ตัว มาต่อขนานกันได้ค่าความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ 506 nF และได้ค่าอัตราส่วนแรงดันเท่ากับ 1,004

ค) C_2 = 1.007 μF

เลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดเดียวกับข้อ ก) จำนวน 46 ตัว มาต่อขนานกันได้ค่าความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ 1.012 μF และได้ค่าอัตราส่วนแรงดันเท่ากับ 2,008

3.3.4 ความต้านทานภาคแรงต่ำ

เพื่อให้การวัดแรงดันอิมพัลส์ได้โดยไม่มีการบิดเบือนของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และผลตอบสนองรูปชั้นไม่เกิดการแกว่งความถี่ต่ำ จึงต้องต่อความต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ โดยค่าความต้านทานนี้สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้ คือ[10]

1) ค่าคงตัวเวลาภาคแรงสูง = ค่าคงตัวเวลาภาคแรงต่ำ

$$R_1 * C_1 = R_2 * C_2$$

2) $$C_2 / C_1 = L_1 / L_2$$

เมื่อ L_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของภาคแรงสูง

L_2 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของภาคแรงต่ำ

จากค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง C_1 = 504 pF ความต้านทานภาคแรงสูง R_1 = 111 โอห์ม และจาก $R_1 * C_1 = R_2 * C_2$ จะสามารถหาค่า R_2 ได้ ซึ่งตัวความต้านทานที่ใช้ทำ R_2 นี้จะใช้ตัวความต้านทาน 2 แบบ คือ แบบคาร์บอนขนาด 1 วัตต์ และฟิล์มคาร์บอนขนาด 2 วัตต์ รายละเอียดแสดงอยู่ในตารางที่ 3.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

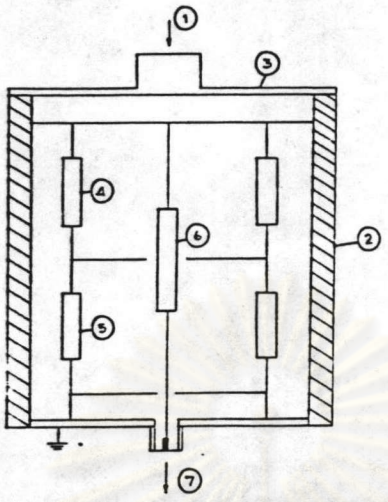
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของความต้านทานภาคแรงต่ำ

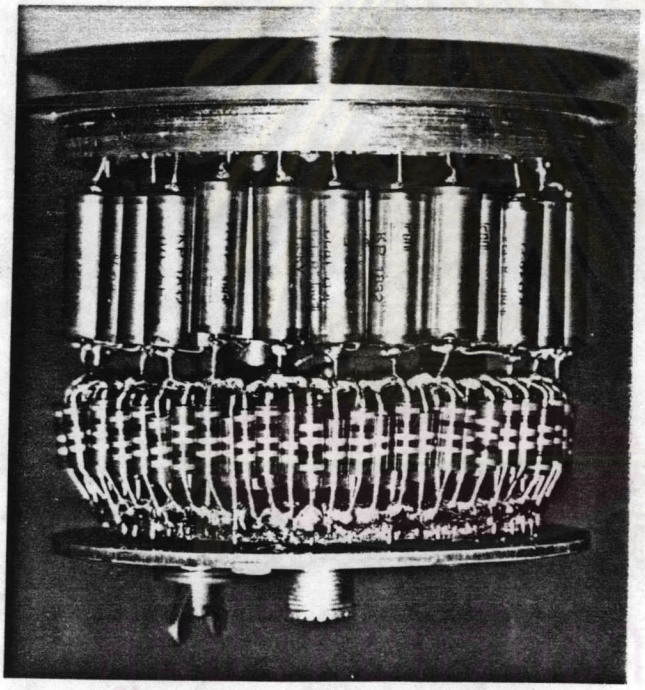
	C_2 (nF)	264.0	506.0	1012.0
ฟิล์มคาร์บอน	คตท.ย่อย(โอห์ม)	10	4.7	4.7
	จำนวน (ตัว)	60	109	136
	R_2 (โอห์ม)	0.17	0.04	0.03
คาร์บอน	คตท.ย่อย(โอห์ม)	2.2	2.2	2.2
	จำนวน(ตัว)	22	44	109
	R_2 (โอห์ม)	0.10	0.05	0.02

3.3.5 ความต้านทานแมชชิงและเคเบิลวัด

เพื่อป้องกันการแกว่งและการสะท้อนของสัญญาณที่จะวัด จำเป็นต้องใช้ความต้านทานแมชชิ่งของเคเบิลวัด (R_m) ต่ออยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยตัวเก็บประจุและความต้านทานภาคแรงต่ำ ความต้านทานแมชชิ่งนี้เลือกใช้ชนิดฟิล์มคาร์บอนเพราะมีค่าสเตรอินดัคแตนซ์ต่ำขนาด 2 วัตต์ 150 โอห์ม จำนวน 2 ตัวต่อขนานกันได้ค่าความต้านทาน R_m = 75 โอห์ม ซึ่งมีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพิแดนซ์ของเคเบิลวัด

3.3.6 โครงสร้างของภาคแรงต่ำ





รูปที่ 3.8 โครงสร้างของภาคแรงต่ำ

1 ต่อกับภาคแรงสูง

2 ท่อ พีวีซี

3 จานทองเหลือง

4 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

5 ความต้านทานภาคแรงต่ำ

6 ความต้านทานแมชชิ่ง

7 ต่อกับภาคแรงต่ำ