บทที่ 3

การออกแบบและสร้างโวลเตจดิไวเดอร์

3.1 คุณลักษณะที่กำหนด

โวลเตจดิไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง เป็นแบบความต้านทานและแบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง สามารถใช้วัดแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า โดยมีคุณสมบัติได้ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [7] กำหนด

ค่าแรงดันที่กำหนดของโวลเตจดิไวเดอร์กำหนดด้วยค่าแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้น ต้องการใช้วัดแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กับระบบ 230 kV ซึ่งมีค่าเท่ากับ 950 kV สำหรับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ดังนั้น จึงเลือกแรงดันที่กำหนดเท่ากับ 1000 kV

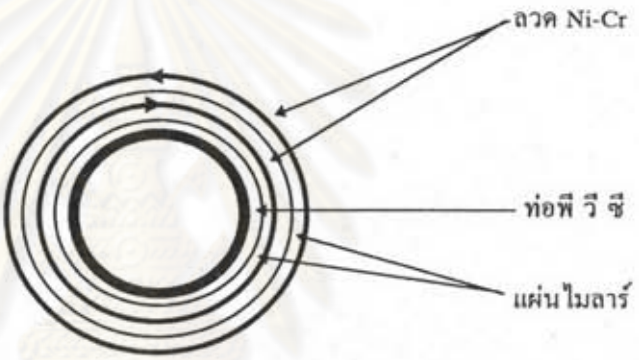
3.2 การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง

3.2.1 โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน

ในกรณีของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน พลังงานสูญเสียในตัวความต้านทานจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ใช้ คือ ถ้าค่าความต้านทานต่ำ พลังงานสูญเสียจะมาก ซึ่งจะไปโหลดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ การเลือกค่าความต้านทานเพื่อออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์จึงควรเลือกให้มีค่าสูงขึ้น แต่ควรระวังไม่ให้ค่าความต้านทานสูงเกินไป เพราะจะทำให้เวลาตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์ช้าเกินไป ทั้งนี้เนื่องจากเวลาตอบสนองแปรผันตรงกับค่าความต้านทาน ดังสมการ (2.25) ทำให้โวลเตจดิไวเดอร์ไม่ไวพอที่จะวัดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ ค่าความต้านทานที่พอเหมาะจึงมีทั้งขีดจำกัดล่างและขีดจำกัดบน ในทางปฏิบัติ ค่าความต้านทานที่ใช้จะมีค่าอยู่ในช่วง 5-20 kΩ [5]

เนื่องจากภาคแรงสูงต้องรับแรงดันแทบทั้งหมดที่ป้อนให้กับโวลเตจดิไวเดอร์ ฉะนั้นในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า คือ จะต้องไม่เกิดเบรกดาวน์หรือเกิดการวาบไฟตามผิว นอกจากนี้ ตัวความต้านทานภาคแรงสูงต้องมีลักษณะสมบัติทางความร้อนดีเพียงพอ คือ สามารถทนต่อพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์โดยไม่ชำรุดเสียหาย และอุณหภูมิเพิ่มของตัวความต้านทานอยู่ในขอบเขตที่ไม่ทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในภาวะทรานเซียนต์สูงเกินไป เพื่อรักษาค่าสเกลแฟกเตอร์ให้คงที่

ในงานวิจัยนี้เลือกค่าความต้านทานภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ประมาณ 10 kΩ โดยทำด้วยลวดความต้านทานพันแบบไร้ความเหนี่ยวนำ ดังภาพสเก็ตช์ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพสเกตช์ภาคตัดขวางการพันลวดความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำ

โดยลวดความต้านทานที่ใช้เป็นลวด Ni-Cr 60/16 ชนิดไม่มีฉนวนหุ้ม ซึ่งมีข้อกำหนดทางเทคนิคดังนี้

ค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาว	18.8	Ω/m
ค่าความต้านทานจำเพาะ	ρ = 0.715	$\Omega mm^2/m$
เส้นผ่าศูนย์กลาง	d = 0.22	mm
ความหนาแน่น	ϑ = 7.15	g/cm^3
ความร้อนจำเพาะ	σ = 0.46	J/gK
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ	κ = 11	ppm/K

จากข้อกำหนดของลวดความต้านทานข้างต้น สามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิเพิ่มในขณะใช้งานได้จาก [7]

$$\Delta T = \frac{W}{m\sigma} \qquad (3.1)$$

เมื่อ ΔT คือ อุณหภูมิเพิ่ม หน่วยเป็น K

W คือ พลังงานที่ป้อนให้กับตัวความต้านทาน หน่วยเป็น J

m คือ มวลของลวดความต้านทาน หน่วยเป็น g

σ คือ ความร้อนจำเพาะของลวดความต้านทาน หน่วยเป็น J/gK

ซึ่งมาตรฐานกำหนดไว้ว่าไม่ควรมีค่าเกิน 200 K [7]

พลังงานที่ป้อนให้กับตัวความต้านทานสามารถหาได้จาก

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

ถ้าต้องการวัดแรงดันอิมพัลส์รูปฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล ซึ่งมีสมการดังนี้

$$v(t) = Ve^{-t/\tau}$$

เมื่อ V คือ ค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน หน่วยเป็น V

τ คือ ค่าคงตัวทางเวลาของฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล หน่วยเป็น s

จะสามารถหาค่าพลังงานที่ป้อนได้เป็น

$$W = \frac{1}{R}\int_0^\infty (Ve^{-t/\tau})^2 dt$$

$$W = \frac{V^2}{R}\int_0^\infty e^{-2t/\tau} dt$$

$$W = \frac{V^2}{R}\cdot\frac{\tau}{2} \qquad (3.2)$$

ในกรณีเป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า อาจประมาณได้ว่าแรงดันเอกซ์โปเนนเชียลมีค่าคงตัวเวลา 68 μs ดังนั้น ถ้าต้องการวัดแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่ายอด 1000 kV ด้วยโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานที่มีค่าความต้านทานภาคแรงสูง 10 kΩ จะสามารถคำนวณพลังงานที่ป้อนได้เท่ากับ 3.4 kJ และมวลของลวดความต้านทานสามารถคำนวณได้จาก

$$m = \frac{1}{4}\pi d^2 l\vartheta \qquad (3.3)$$

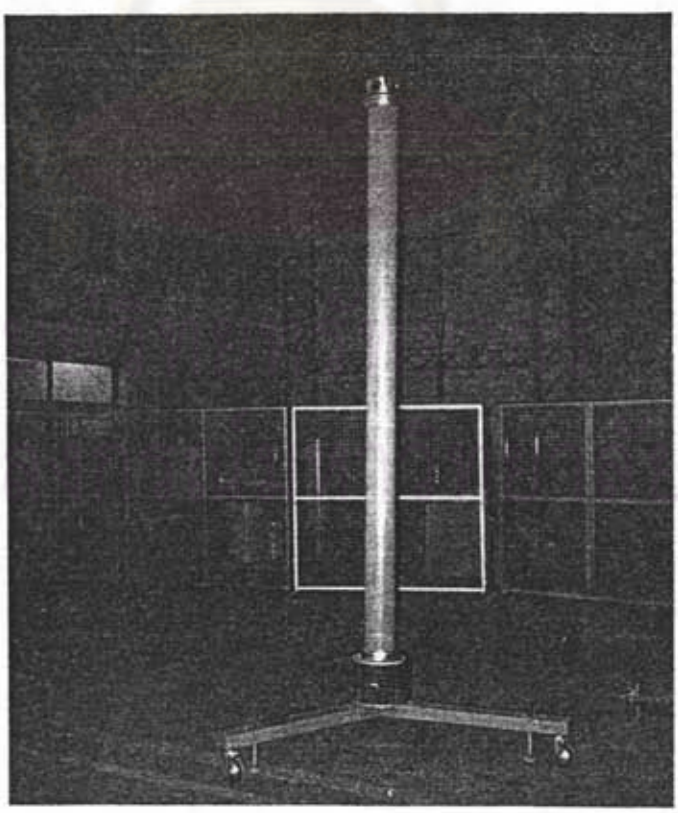
โดยในกรณีที่ค่าความต้านทานภาคแรงสูง 10 kΩ จะต้องใช้ลวดยาว (l) 2127.7 m เมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.3) จะได้ค่ามวลเป็น 578 g ดังนั้น จึงสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิเพิ่มได้ 12.8 K ซึ่งต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ และค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\Delta R}{R} = \kappa\cdot\Delta T \qquad (3.4)$$

มีค่าเท่ากับ 0.014 %

ในการพันลวดความต้านทานจะใช้เส้นเอ็นพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 mm เป็นฉนวนคั่นระหว่างเส้นลวดและใช้แผ่นไมลาร์หนา 75 μm เป็นฉนวนคั่นระหว่างชั้น พันบนท่อ พี วี ซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ” ยาว 1.5 m จำนวน 2 ท่อน โดยมีเหตุผลที่ว่า ในกรณีที่ตัวความต้านทานเกิดเสียหายขึ้น การเปลี่ยนและประกอบสร้างตัวความต้านทานตัวใหม่จะสะดวกกว่าในกรณีใช้เพียงท่อนเดียว หลังจากพันตัวความต้านทานภาคแรงสูงเสร็จแล้ว วัดค่าความต้านทานรวมได้ค่าประมาณ 9.77 kΩ และได้ทำการคำนวณค่าอุณหภูมิเพิ่มอีกครั้ง โดยพลังงานที่ป้อนที่คำนวณได้มีค่า 3.48 kJ และใช้ลวดความต้านทานยาว 2078.7 m ได้ค่ามวลเป็น 565 g ดังนั้น ค่าอุณหภูมิเพิ่มที่คำนวณได้เท่ากับ 13.4 K และค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไป 0.015 %

จากนั้นจึงนำไปบรรจุในท่อพี วี ซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 ” ยาว 3.02 m และปิดด้วยหน้าแปลนอะลูมิเนียมซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดด้วย ภายในท่อใช้อากาศที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้องเป็นฉนวน เพราะอากาศไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของโวลเตจดิไวเดอร์ มีความสะดวกในการประกอบสร้าง คือ ไม่มีปัญหาการรั่วซึมของฉนวน และเป็นฉนวนที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายใดๆ ซึ่งตัวความต้านทานภาคแรงสูงที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตัวความต้านทานภาคแรงสูงที่ประกอบเสร็จแล้ว

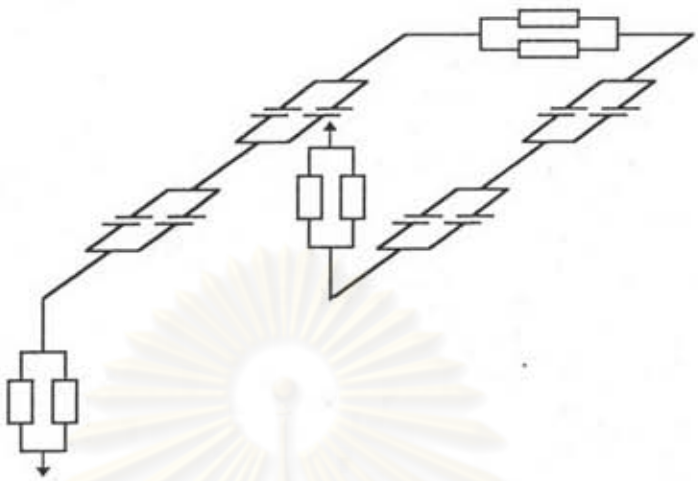
3.2.2 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นเป็นแบบตัวเก็บประจุย่อยต่ออนุกรมกันให้ได้ค่าเก็บประจุและแรงดันตามต้องการ โดยค่าเก็บประจุของภาคแรงสูงต้องมากพอที่ทำให้ค่าเก็บประจุสเตรย์มีผลต่อการกระจายแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ไม่มากนัก การกระจายแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ควรเป็นแบบเชิงเส้น เพื่อให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงสูงมีค่าเท่าๆ กัน มิฉะนั้น อาจทำให้เกิดการเบรกดาวน์หรือวาบไฟตามผิวที่ตัวเก็บประจุย่อยได้ ขณะเดียวกัน ค่าเก็บประจุภาคแรงสูงต้องไม่มากจนทำให้โวลเตจดิไวเดอร์กลายเป็นโหลดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพราะว่า ถ้าค่าเก็บประจุภาคแรงสูงมีค่ามากแล้ว ค่าอิมพิแดนซ์ของโวลเตจดิไวเดอร์จะมีค่าต่ำลง จะทำให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จ่ายกระแสให้โวลเตจดิไวเดอร์มากขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ไม่ต้องการของระบบวัด โดยทั่วไป ค่าเก็บประจุภาคแรงสูงที่ใช้ในทางปฏิบัติมีค่ามากกว่า 30 pF ต่อความสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ 1 m [5,6]

โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (d) 21 cm สูง (l) 398 cm และวางสูงจากพื้น (h) 50 cm สามารถคำนวณค่าเก็บประจุสเตรย์ตามสมการ (2.17) ได้ประมาณ 69 pF ค่าเก็บประจุของภาคแรงสูงต้องมากกว่าค่าเก็บประจุสเตรย์พอสมควร ดังนั้น ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงนี้ ได้จากการนำตัวเก็บประจุย่อยแบบโพลีเอสเตอร์ฟิลม์ขนาด 0.1 μF 2 kVdc มาต่ออนุกรมกันจำนวน 126 ชั้น แต่ละชั้นมีตัวเก็บประจุย่อยจำนวน 4 ชุดๆ ละ 2 ตัวต่อขนานกัน รวมใช้ตัวเก็บประจุย่อย 1008 ตัว สามารถทนแรงดันได้ 1008 kVdc และได้ค่าเก็บประจุรวมประมาณ 397 pF ซึ่งผลกระทบจากค่าเก็บประจุสเตรย์ต่อค่าเก็บประจุภาคแรงสูงมีค่าน้อยกว่า 3 %

การต่อตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงสูงแบ่งออกเป็น 2 ท่อน ยาวท่อนละ 196 cm แต่ละท่อนใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 504 ตัว การประกอบทำโดยใช้แผ่นพลาสติกใสหนา 1/2 " ยาว 194 cm จำนวน 2 แผ่นมาเจาะรูให้มีขนาดใหญ่กว่าตัวเก็บประจุย่อยเล็กน้อย ทำการเจาะรูเป็นจำนวนแผ่นละ 63 แถวๆ ละ 4 รู ซึ่ง 4 รูนี้จะแบ่งออกเป็น 2 คู่ แต่ละคู่จะนำตัวเก็บประจุย่อยสอดเข้าไป แล้วทำการยึดหัวท้ายแผ่นพลาสติกใสทั้ง 2 แผ่นด้วยแผ่นอะลูมิเนียม ส่วนด้านข้างใช้แผ่นพลาสติกใสขนาด 5x8 cm^2 ยึดข้างละ 3 แผ่น ต่อจากนั้นจึงนำเอาตัวความต้านทานย่อยจำนวน 125 ชุดมาต่ออนุกรมกับตัวประจุย่อยสลับกันไป ภาพสเกตช์การเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุย่อยแสดงดังรูปที่ 3.3

เมื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เรียบร้อยแล้ว จึงนำตัวเก็บประจุภาคแรงสูงนี้ไปบรรจุในท่อ พี วี ซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 " ซึ่งมีหน้าแปลนอะลูมิเนียมปิดหัวท้าย ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดของตัวเก็บประจุด้วย ภายในท่อใช้อากาศเป็นฉนวนเช่นเดียวกับแบบความต้านทาน



รูปที่ 3.3 ภาพสเกตช์การเชื่อมต่อตัวเก็บประจุย่อยและตัวความต้านทานย่อยแต่ละชั้น

เนื่องจากแรงดันกระจายของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น เพราะว่าผลของค่าเก็บประจุสเตรย์ โดยตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดจะมีแรงดันคร่อมมากที่สุด ดังนั้น จึงต้องคำนวณหาค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยนี้ว่าสามารถทนต่อแรงดันเมื่อโวลเตจดิไวเดอร์นี้ใช้งานที่แรงดันพิกัดได้หรือไม่ โดยการพิจารณากรณีซึ่งเกิดแรงดันคร่อมมากสุด ($R_1 = 0$) ซึ่งจากวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงในรูปที่ 2.9 เมื่อ U_k คือ แรงดันที่ตัวเก็บประจุย่อย k เทียบกับดิน [10]

$$U_k = \frac{U}{C_e' + C_h'}\left[\frac{C_e' \sinh\frac{\alpha k}{n}}{\sinh\alpha} + C_h'\left\{1 - \frac{\sinh\alpha\left(n - \frac{k}{n}\right)}{\sinh\alpha}\right\}\right] \qquad (3.5)$$

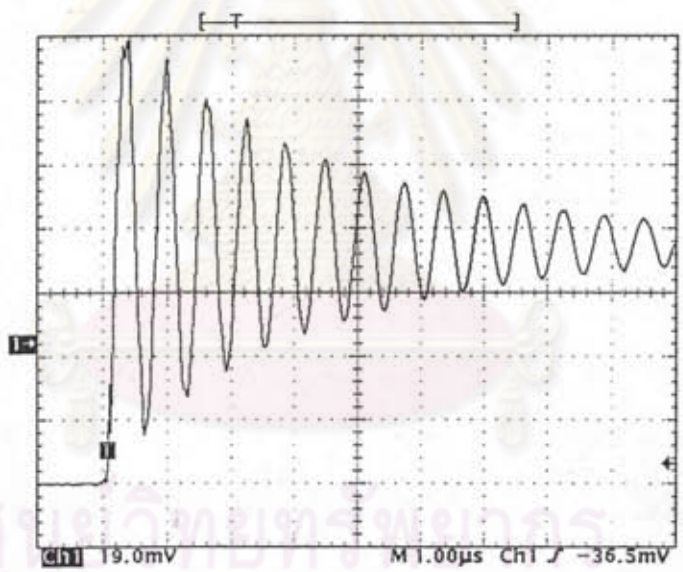
โดยที่ $\alpha = \sqrt{(C_e' + C_h')/C'}$

เมื่อ U = 1000 kV, C' = 0.2 μF, C_e' = 0.137 pF, C_h' = 0, n = 504 จะได้ค่าแรงดันอิมพัลส์ตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดเท่ากับ 1.97 kV ซึ่งต่ำกว่าแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุย่อย 2 kVdc และตัวเก็บประจุย่อยนี้สามารถทนแรงดันอิมพัลส์ได้มากกว่า 2 kV เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น ดังนั้น ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ออกแบบนี้สามารถใช้งานที่แรงดันอิมพัลส์พิกัด 1000 kV ได้ตามต้องการ

ตัวความต้านทานภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นจะต่ออยู่กับตัวเก็บประจุย่อยภาคแรงสูง โดยต่อกระจายตลอดความยาวของภาคแรงสูง ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งของรูป

คลื่นแรงดันที่ต้องการวัด ซึ่งการแกว่งของแรงดันนี้เกิดจากการเรโซแนนซ์ระหว่างความเหนี่ยวนำในภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์กับค่าเก็บประจุสเตรย์ อย่างไรก็ตาม การต่อตัวความต้านทานนี้ช่วยหน่วงการแกว่งซึ่งเกิดขึ้นภายในโวลเตจดิไวเดอร์เท่านั้น ส่วนการแกว่งของระบบวัดเนื่องจากความเหนี่ยวนำของสายนำกับค่าเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ยังต้องใช้ตัวความต้านหน่วงภายนอก ซึ่งควรมีค่าประมาณเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายนำ [11]

ปกติค่าความต้านทานหน่วงภาคแรงสูงจะอยู่ในช่วง 500-1,000 Ω [11] ซึ่งถ้าต้องการหาค่า R_1 จากสมการ (2.28) จะต้องรู้ค่าความเหนี่ยวนำของโวลเตจดิไวเดอร์ก่อน ดังนั้น จึงได้ทำการทดลองหาค่าความเหนี่ยวนำ โดยการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงสูงทั้งหมดให้เป็นแบบตัวเก็บประจุล้วน ($R_1 = 0$) และทำการทดลองหาผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์ จากการทดลองจะได้ออสซิลโลแกรมของผลตอบสนองรูปขั้นดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ เมื่อ $R_1 = 0$

จากออสซิลโลกราฟปรากฏว่า เห็นเฉพาะความถี่ที่เกิดจากการระบบวัดเท่านั้น โดยไม่ปรากฏความถี่ที่เกิดจากการสะท้อนภายในตัวโวลเตจดิไวเดอร์ ดังนั้น ค่าความต้านทานหน่วงในภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์จึงใช้วิธีการคำนวณ โดยประมาณว่าคลื่นเดินทางในตัวโวลเตจดิไวเดอร์ด้วยความเร็วแสง ซึ่งมีค่า 3.33 ns/m [6] จึงสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$Z_t C_e = \tau_t \qquad (3.7)$$

โดยที่ $Z_t = \sqrt{L/C_e}$ คือ ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของโวลเตจดิไวเดอร์

C_e คือ ค่าเก็บประจุสเตรย์ของโวลเตจดิไวเดอร์

$\tau_t = \sqrt{L \cdot C_e}$ คือ เวลาคลื่นเดินทางในตัวโวลเตจดิไวเดอร์

โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นมีความสูง 398 cm ซึ่งสามารถคำนวณค่าเก็บประจุสเตรย์ตามสมการ (2.17) ได้ 69 pF และเวลาคลื่นเดินทางในตัวโวลเตจดิไวเดอร์มีค่า 13.3 ns เมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.7) จะได้ค่า Z_t = 193 Ω และจากสมการ (2.28) จะได้ค่าความต้านทานหน่วงภาคแรงสูงที่เหมาะสมเป็น 773 Ω จึงได้ประกอบความต้านทานภาคแรงสูงขึ้น ซึ่งต้องการใช้ทั้งหมด 250 ชุดๆ ละ 2 ตัวต่อขนานกัน จะได้ค่าความต้านทานแต่ละชุดเป็น 3.2 Ω หรือแต่ละตัวมีค่า 6.4 Ω แต่เนื่องจากในท้องตลาดไม่มีค่าที่ต้องการจึงเลือกค่าที่ใกล้เคียงคือ 6.8 Ω ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความต้านทานรวมเป็น 850 Ω โดยตัวความต้านทานที่ใช้เป็นแบบฟิล์มโลหะ ขนาด 2 W ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ประกอบเสร็จแล้ว

3.3 การออกแบบและสร้างภาคแรงต่ำ

3.3.1 คุณลักษณะที่ต้องการ

ภาคแรงต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากส่วนหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของโวลเตจดิไวเดอร์ การออกแบบสร้างภาคแรงต่ำต้องคำนึงถึงปัญหาต่างๆ ดังนี้

1) แรงดันขาออกต้องไม่ต่ำเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น จากกระแสที่ไหลในชีลด์ของสายเคเบิลวัด หรือจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ของระบบ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้นเป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด

2) การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำและความต้านทานแมทชิงของเคเบิลวัด ต้องระวังไม่ให้เกิดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงต่ำ ที่มีต่อลูปขาเข้าของเคเบิลวัด และต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้อิมพิแดนซ์ที่ภาวะทรานเซียนต์มีค่าต่ำ ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงต่ำเข้าไปในภาคแรงสูงมีค่าลดลง ดังนั้นจึงควรจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำกับความต้านทานแมทชิงให้อยู่ในลักษณะแกนร่วม

3.3.2 การเลือกแรงดันขาออก

แรงดันขาออกสูงสุดของโวลเตจดิไวเดอร์กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของเครื่องวัดแรงดันต่ำ ซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคปหรือโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอด เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะทำให้ทราบสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์ได้โดยอาศัยสมการ

$$F = \frac{Z_1}{Z_2} + 1 \qquad (3.8)$$

เมื่อ F คือ สเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์

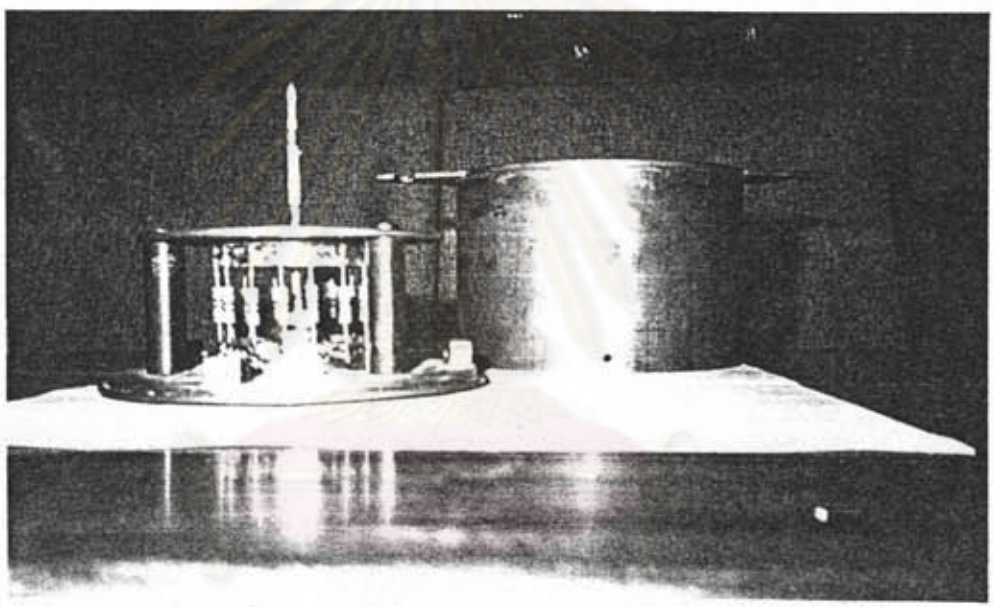
Z_1 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์

Z_2 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์

แรงดันขาเข้าที่กำหนดของอิมพัลส์ออสซิลโลสโคปและโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดที่มีอยู่ มีค่าในช่วง 200-1600 V ในที่นี้ เลือกแรงดันขาออก 1000 V ซึ่งจะได้สเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์มีค่าประมาณ 1000

3.3.3 ตัวความต้านทานภาคแรงต่ำ

จากค่าสเกลแฟกเตอร์ในสมการ (3.8) และค่าความต้านทานภาคแรงสูง 9.77 kΩ ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำเมื่อคิดผลของค่าความต้านทานแมทชิงด้วย จะได้ค่าเป็น 11.25 Ω ในที่นี้ เลือกใช้ตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะ ขนาด 2 W 180 Ω จำนวน 16 ตัวต่อขนานกัน ได้ค่าความต้านทานเป็น 11.25 Ω จะได้สเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์เป็น 869.4 และเมื่อคิดผลของค่าความต้านทานแมทชิงด้วยจะได้ค่าเป็น 998.7 ตัวความต้านทานภาคแรงต่ำที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตัวความต้านทานภาคแรงต่ำที่ประกอบเสร็จแล้ว

3.3.4 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

จากค่าสเกลแฟกเตอร์ตามสมการ (3.8) และค่าเก็บประจุภาคแรงสูง 397 pF ค่าเก็บประจุภาคแรงต่ำที่คำนวณได้มีค่าเป็น 397 nF จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีเอสเตอร์ฟิล์มขนาด 1.5 kVdc 22 nF จำนวน 18 ตัว มาต่อขนานกันได้ค่าเก็บประจุรวมเท่ากับ 396 nF และได้ค่าสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์เป็น 997.5

เพื่อให้คุณสมบัติการถ่ายโอนของโวลเตจดิไวเดอร์สมบูรณ์และได้ผลตอบสนองรูปขั้นที่ดี จึงต้องต่อความต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ โดยค่าความต้านทานนี้สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้คือ [11]

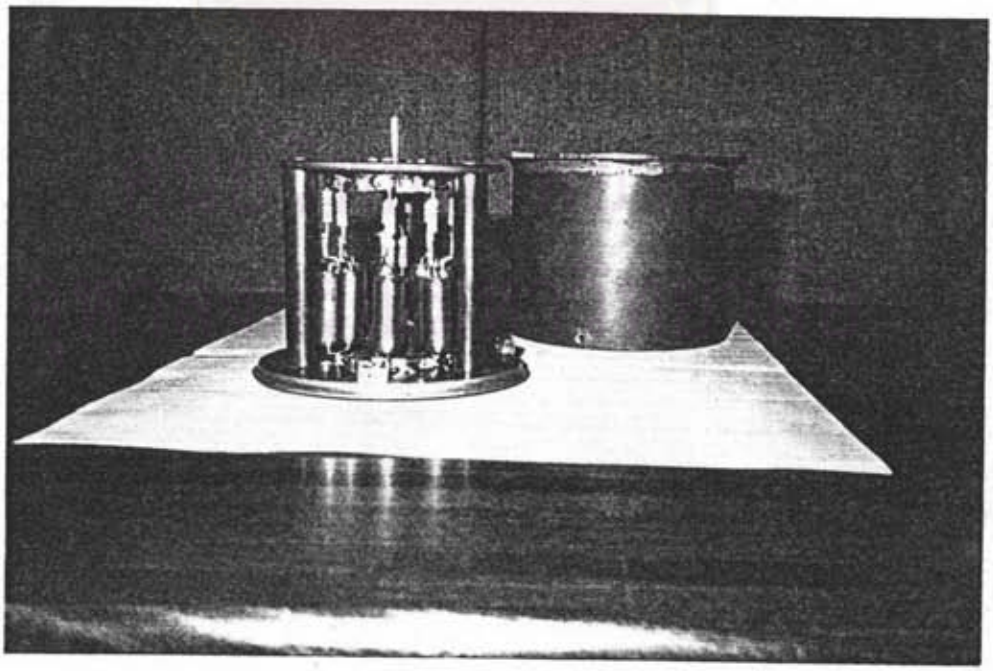
$$R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2 \qquad (3.9)$$

และในกรณีที่ใช้ตัวความต้านทานหน่วงภายนอก (R_d) ด้วย สมการ (3.9) จะเปลี่ยนไปเป็น

$$(R_d + R_1) \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2 \qquad (3.10)$$

จากค่าเก็บประจุภาคแรงสูง C_1 = 397 pF และภาคแรงต่ำ C_2 = 396 nF ค่าความต้านทานภาคแรงสูง R_1 = 850 Ω และเลือกใช้ค่าความต้านทานหน่วงภายนอก 270 Ω จากสมการ (3.10) จะสามารถหาค่า R_2 ได้เป็น 1.12 Ω ดังนั้น จึงเลือกใช้ตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะ ขนาด 2 W 10 Ω จำนวน 9 ตัวต่อขนานกัน ได้ค่าความต้านทานเป็น 1.11 Ω

เพื่อป้องกันการแกว่งและการสะท้อนของสัญญาณที่ต้องการวัด จำเป็นต้องใช้ตัวความต้านทานแมทชิง (R_m) ต่ออนุกรมกับเคเบิลวัด ความต้านทานแมทชิงนี้เลือกใช้แบบฟิล์มโลหะ ขนาด 2 W 150 Ω จำนวน 2 ตัว ต่อขนานกันได้ค่าความต้านทาน R_m = 75 Ω ซึ่งมีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพิแดนซของเคเบิลวัด ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำที่ประกอบเสร็จแล้ว

3.4 การออกแบบและสร้างตัวลดทอน

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปในการบันทึกและประเมินค่าพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งดิจิตอลออสซิลโลสโคปเองมีค่าแรงดันขาเข้าที่ค่อนข้างต่ำ โดยที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถแสดงผลได้สูงสุด 80 V ดังนั้น จึงจำเป็นต้องออกแบบสร้างตัวลดทอนขึ้น เพื่อลดระดับแรงดันที่ออกจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์ลงมาให้อยู่ในย่านที่ดิจิตอลออสซิลโลสโคปสามารถแสดงผลได้

3.4.1 การเลือกแรงดันขาออก

การเลือกแรงดันขาออกของตัวลดทอนอาศัยหลักการเดียวกับโวลเตจดิไวเดอร์กล่าวคือ แรงดันขาออกสูงสุดของตัวลดทอน กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของดิจิตอลออสซิลโลสโคป เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะทำให้ทราบสเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอนได้จาก

$$F = \frac{Z_3}{Z_4} + 1 \qquad (3.11)$$

เมื่อ F คือ สเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอน

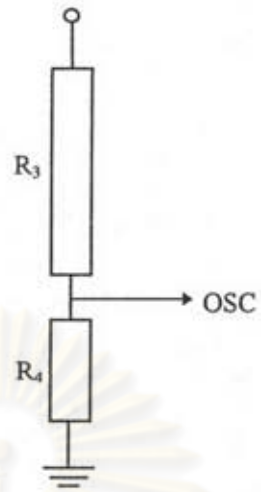
Z_3, Z_4 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวลดทอน

ในที่นี้ เลือกแรงดันขาออกของตัวลดทอนเท่ากับ 25 V ซึ่งจะได้สเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอนมีค่าประมาณ 40

3.4.2 ตัวลดทอนแบบความต้านทาน

เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบตัวลดทอนแบบความต้านทาน คือ ต้องกำหนดให้ค่าความต้านทานขาเข้าของตัวลดทอนเท่ากับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด กล่าวคือ ตัวลดทอนจะต้องทำหน้าที่เป็นตัวความต้านทานแมทชิงด้วย ในที่นี้ เลือกใช้วิธีการต่อตัวความต้านทาน 2 ชุด แบบอนุกรมกัน ดังวงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ 3.8 ดังนั้น จะได้เงื่อนไขการออกแบบเป็น

$$Z_C = R_3 + R_4 \qquad (3.12)$$



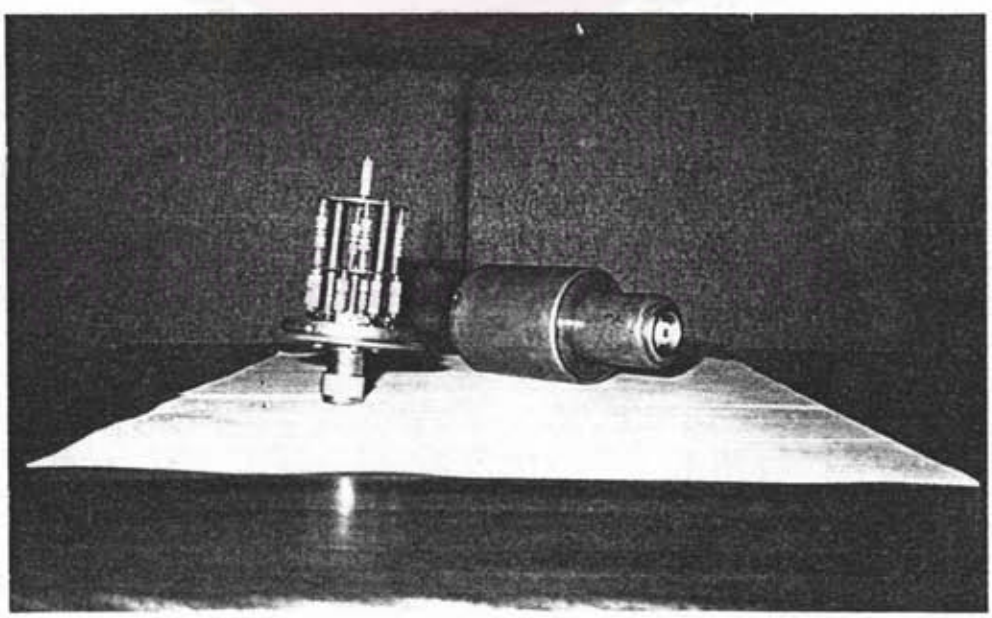
รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลของตัวลดทอนแบบความต้านทาน

โดยค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัดที่ใช้มีค่า 75 Ω และจากค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดในสมการ (3.11) จึงเลือกค่าความต้านทาน R_3 และ R_4 ดังนี้

1) R_3 ใช้ค่า 270 Ω 3 ตัวและ 390 Ω 1 ตัวต่อขนานกัน ได้ค่าความต้านทาน 73.1 Ω

2) R_4ใช้ค่า 10 Ω 4 ตัวและ 39 Ω 4 ตัวต่อขนานกัน ได้ค่าความต้านทาน 1.99 Ω

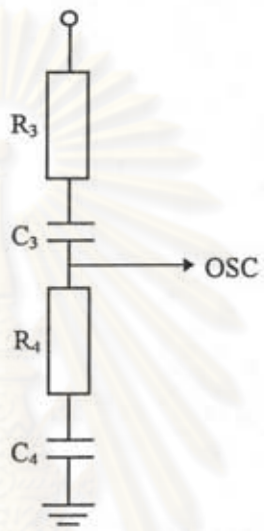
ซึ่งจะได้ค่าสเกลแฟกเตอร์เป็น 37.7 โดยตัวความต้านทานที่ใช้เป็นแบบฟิล์มโลหะ ขนาด 2W ตัวลดทอนแบบความต้านทานที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตัวลดทอนแบบความต้านทานที่ประกอบเสร็จแล้ว

3.4.3 ตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุ

จากเงื่อนไขการต่อแมทชิงชดเชยของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่เสนอโดย Burch สามารถนำมาปรับให้เป็นตัวลดทอนได้โดยใช้หลักการเดียวกับแบบความต้านทาน ดังวงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุ

โดยเงื่อนไขการต่อแมทชิงคือ

$$Z_C(C_1 + C_2) = R_B(C_B + C_C) \qquad (3.13)$$

โดยที่ $R_B = R_3 + R_4$

$C_B = C_3C_4 / (C_3 + C_4)$

และเงื่อนไขในการออกแบบตัวลดทอนคือ

$$R_3C_3 = R_4C_4 \qquad (3.14)$$

ซึ่งจะต้องพยายามกำหนดให้ค่าเก็บประจุแมทชิง (C_B) มีค่าต่ำๆ เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์มากนัก จึงเลือกค่าเก็บประจุ C_3 และ C_4 ดังนี้

1) C_3 ใช้ตัวเก็บประจุแบบโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม ขนาด 1.5 kVdc 15 nF 2 ตัวต่ออนุกรมกัน ได้ค่าเก็บประจุ 7.5 nF

2) C_4 ใช้ตัวเก็บประจุแบบโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม ขนาด 1.5 kVdc 68 nF 4 ตัวต่อขนานกัน ได้ค่าเก็บประจุ 272 nF

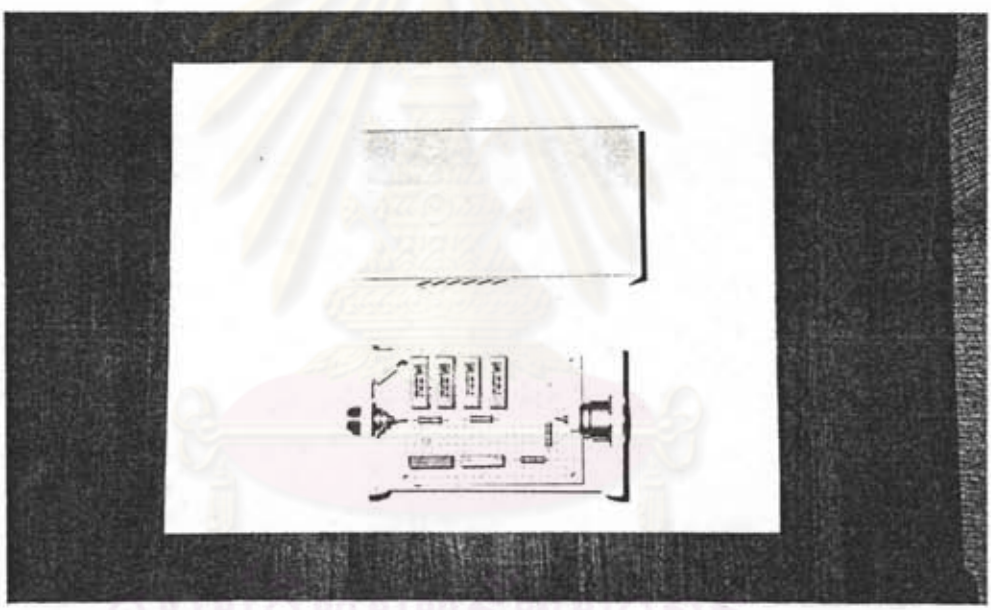
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งจะได้ค่าสเกลแฟกเตอร์เป็น 37.3 และค่าเก็บประจุแมทชิง 7.3 nF เคเบิลวัดที่ใช้ยาว 20 m มีค่าเก็บประจุ 67 pF/m ซึ่งเมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.13) จะสามารถหาค่าความต้านทานแมทชิง (R_B) ได้ 3441 Ω และจากค่าสเกลแฟกเตอร์ของภาคตัวเก็บประจุ 37.3 จึงเลือกค่าความต้านทาน ดังนี้

1) R_3 ใช้ค่า 3300 Ω 1 ตัวและ 50 Ω 1 ตัวต่ออนุกรมกัน ได้ค่าความต้านทาน 3350 Ω

2) R_4 ใช้ค่า 47 Ω 2 ตัวต่ออนุกรมกัน ได้ค่าความต้านทาน 94 Ω

ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานแมทชิง 3444 Ω โดยตัวความต้านทานที่ใช้เป็นแบบฟิล์มโลหะ ขนาด 2W ตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุที่ประกอบเสร็จแล้ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย