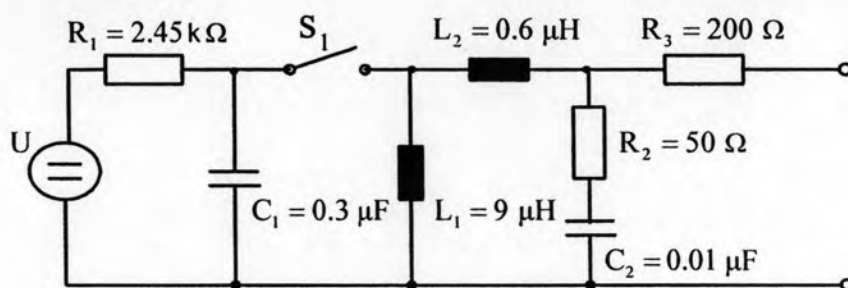


### บทที่ 3

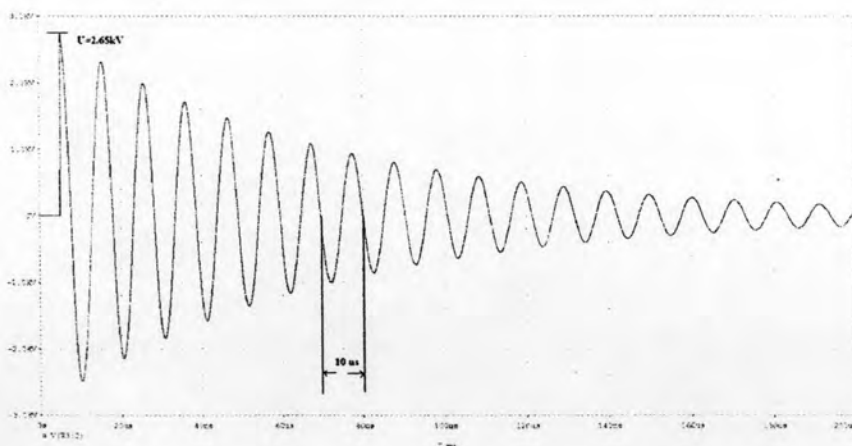
#### การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดคลื่นแฉ่งแบบหน่งข้

ในการออกแบบวงจรเบื้องต้น จะทำการจำลองและวิเคราะห์วงจรกำเนิดคลื่นแฉ่งแบบหน่งข้ โดยใช้โปรแกรม PSpice และโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าองค์ประกอบต่างๆ ของวงจรสร้างคลื่นแฉ่งแบบหน่งข้ได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองวงจรกำเนิดคลื่นแฉ่งแบบหน่งข้

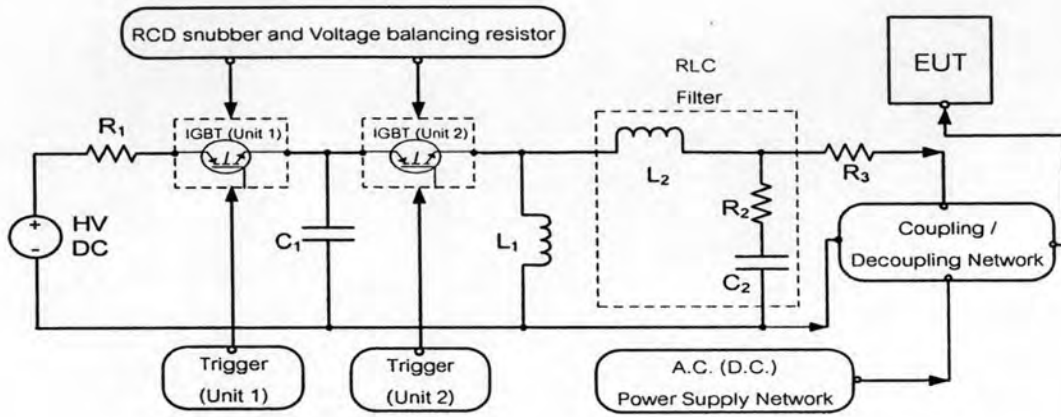
จากวงจรรูปที่ 3.1 โดยสถานะเริ่มต้นเมื่อตัวเก็บประจุ  $C_1$  มีค่าแรงดันอัดประจุ (Charging Voltage) คือ 2.7 kV และทำการสับสวิตช์  $S_1$  จะได้แรงดันคลื่นแฉ่งแบบหน่งข้ขนาดพิคกัแรงดันสูงสุด 2.65 kV ความถี่การแฉ่ง 100 kHz ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 คลื่นแฉ่งแบบหน่งข้ที่ได้จากแบบจำลอง

3.1 การออกแบบและประกอบสร้าง

ในการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดคลื่นแอมป์แบบวงจรรวม สามารถแบ่งภาคการทำงานหลัก ๆ ได้ดังรูปที่ 3.3

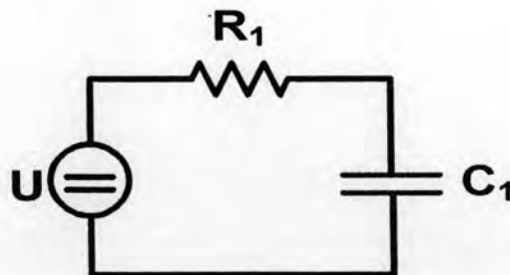


รูปที่ 3.3 วงจรโดยรวมของเครื่องกำเนิดแรงดันคลื่นแอมป์แบบวงจรรวม

3.1.1 การออกแบบวงจรอัดประจุ

จากรูปที่ 3.1 ในขณะสวิตช์  $S_1$  เปิดวงจรตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน  $C_1$  จะได้รับแรงดันอัดประจุจากเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เกิดการสะสมประจุ  $Q$  ขึ้นภายในตัวเก็บประจุ  $C_1$  ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ  $Q$  กับแรงดันที่ใช้อัดประจุ  $U$  ของตัวเก็บประจุ  $C_1$  เป็นไปดังสมการที่ 3.1

$$Q = UC_1 \tag{3.1}$$



รูปที่ 3.4 วงจรอัดประจุของตัวเก็บประจุ  $C_1$

จากวงจรรูปที่ 3.4 อาศัยกฎ KVL ของ Kirchoff จะได้สมการดังนี้

$$V_{R_1} + V_{C_1} = U \quad (3.2)$$

$$IR_1 + \frac{q}{C_1} = U \quad (3.3)$$

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{R_1 C_1} q = \frac{U}{R_1} \quad (3.4)$$

หาคำตอบสมการดิฟเฟอเรนเชียล โดยใช้ Integrating factor  $e^{\frac{t}{R_1 C_1}}$  คูณเข้าไปทั้งสองข้างของสมการ แล้วใช้เงื่อนไขเริ่มต้น เมื่อ  $t = 0$  และ  $Q = 0$  จะได้คำตอบของสมการดังนี้

$$q(t) = UC_1(1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}) \quad (3.5)$$

ซึ่งในช่วงเวลาที่มีการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะเกิดการสะสมพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้าขึ้น โดยจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_{C_1}(t) = U(1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}) \quad (3.6)$$

$$V_{C_1} = (2.7 \times 10^3)(1 - e^{-\frac{t}{(2.45 \times 10^3 \times 0.3 \times 10^{-6})}})$$

กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุในวงจร หาได้โดย  $\frac{dq}{dt}$  จากสมการที่ 3.5

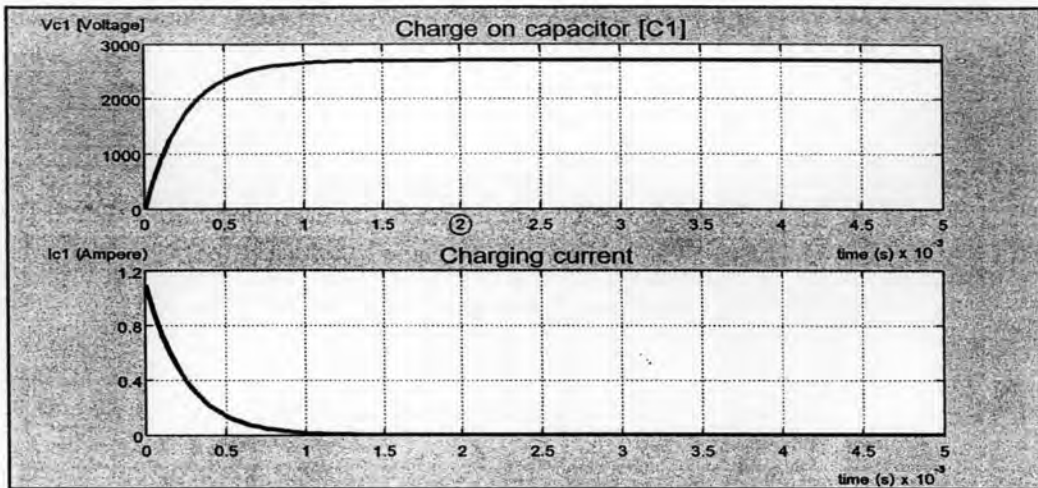
$$I_{C_1}(t) = \frac{U}{R_1} e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} \quad (3.7)$$

$$I_{C_1} = 1.1 e^{-\frac{t}{(2.45 \times 10^3 \times 0.3 \times 10^{-6})}}$$

โดยที่  $q(t)$  คือ ประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ ณ เวลา  $t$  ไตๆ

$V_{C_1}(t)$  คือ แรงดันอัดประจุในตัวเก็บประจุ ณ เวลา  $t$  ไตๆ

$I_{C_1}(t)$  คือ กระแสอัดประจุในตัวเก็บประจุ ณ เวลา  $t$  ไตๆ



รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของตัวเก็บประจุ  $C_1$  กับเวลา (Time)

จากกราฟรูปที่ 3.5 จะเห็นว่ากระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะค่อยๆ มีค่าลดลง ใกล้เคียงศูนย์ และแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่ง  $V_{c1} \approx U$  เมื่อเวลา  $t \geq 2$  ms

### 3.1.2 การออกแบบความถี่การแกว่งของคลื่นแคว่งแบบหน่วงช้า

จากรูปที่ 3.1 ในขณะสวิตช์  $S_1$  ปิดวงจรตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะต่อเข้ากับขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_1$  จะมีการถ่ายเทพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ  $C_1$  ไปยังขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_1$  โดยขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_1$  จะเก็บพลังงานอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็ก เมื่อสะสมพลังงานเต็มที่แล้ว ก็จะถ่ายพลังงานกลับไปยังตัวเก็บประจุ  $C_1$  ใหม่ การถ่ายเทพลังงานกลับไปกลับมาจะระหว่างตัวเก็บประจุ  $C_1$  และขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_1$  ทำให้เกิดการแกว่งของรูปคลื่นแรงดัน โดยในขณะที่เกิดการแกว่งของรูปคลื่นแรงดัน ตัวต้านทานด้านออก  $R_3$  ภายในวงจรจะทำการหน่วงรูปคลื่นแรงดันแคว่งที่เกิดขึ้น ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ  $Q$  กับแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุ  $V_{c1}$  เป็นไปตามสมการที่ 3.8

$$V_{c1} = \frac{Q}{C_1} \quad (3.8)$$

กระบวนการย้ายประจุจากแผ่นตัวนำข้างหนึ่งไปยังอีกข้างหนึ่งของตัวเก็บประจุ  $C_1$  โดยให้ประจุที่ถูกย้ายมีขนาด  $dq$  พลังงานในการย้ายประจุตัวนี้คือ

$$dW = V_{c1} dq = \frac{q}{C_1} dq \quad (3.9)$$

เริ่มต้นจากตัวเก็บประจุ  $C_1$  ไม่มีประจุจนกระทั่งมีประจุเต็ม  $Q$  พลังงานทั้งหมดที่ต้องใช้สามารถหาได้โดยการอินทิเกรตสมการข้างบนจาก  $q = 0$  จนถึง  $q = Q$

$$W = \int dW = \int_0^Q V_{C_1} dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C_1} \tag{3.10}$$

ใช้สมการ  $C_1 = Q/V_{C_1}$  สามารถหาความสัมพันธ์ของพลังงานในตัวเก็บประจุ  $C_1$  ได้เป็น

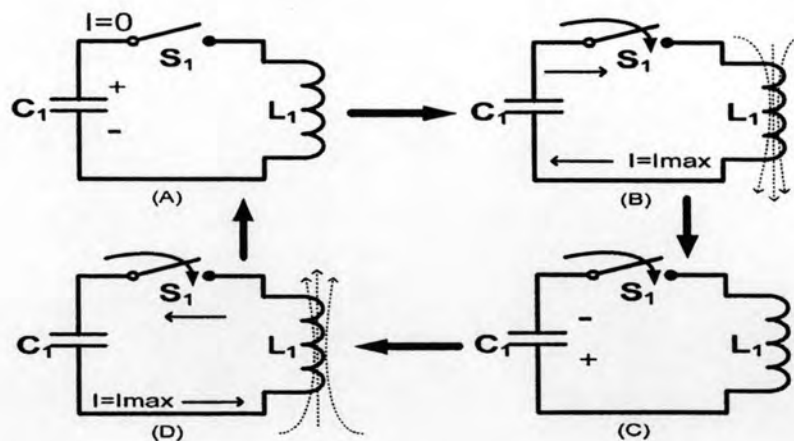
$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C_1} = \frac{1}{2} QV_{C_1} = \frac{1}{2} C_1 V_{C_1}^2 \tag{3.11}$$

เมื่อพิจารณาขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_1$  สามารถหาพลังงาน  $U$  ที่สะสมในขดลวดเหนี่ยวนำได้จาก

$$\text{Power} = \frac{dU}{dt} = L_1 I \frac{dI}{dt} \tag{3.12}$$

เริ่มต้นจากขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_1$  ไม่มีกระแสไหลจนกระทั่งกระแสมีค่าสูงสุด  $I$  พลังงานที่สะสมในขดลวดเหนี่ยวนำทั้งหมด สามารถหาได้โดยการอินทิเกรตสมการข้างบนจาก  $I = 0$  จนถึง  $I$

$$U = \int_0^I dU = \int_0^I L_1 I dI = \frac{1}{2} L_1 I^2 \tag{3.13}$$



รูปที่ 3.6 การเปลี่ยนแปลงในวงจร  $L_1 C_1$

จากรูปที่ 3.6 เมื่อทำการต่อตัวเก็บประจุ  $C_1$  ซึ่งทำการอัดประจุจนเต็มแล้วต่อเข้ากับขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_1$  จะมีการถ่ายเทพลังงานที่สะสมระหว่างตัวเก็บประจุ  $C_1$  กับขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_1$  ไปมาดังนี้

$$\frac{1}{2} \frac{Q^2}{C_1} \leftrightarrow \frac{1}{2} L_1 \left( \frac{dQ}{dt} \right)^2 \quad (3.14)$$

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 3.6 ในวงจร (A) ไป (B) ที่เวลาเริ่มต้นตัวเก็บประจุ  $C_1$  มีประจุอัดอยู่เต็มในจังหวะที่สวิตช์ลงทันที กระแสจะมีค่าสูงสุดทันทีทันทีไม่ได้เนื่องจากคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ แต่จะค่อยๆ เพิ่มจากศูนย์จนเป็นค่าสูงสุด ( $I = I_{\max}$ ) ดังนั้นจากวงจร (A) พลังงานรวมทั้งหมดของวงจร  $L_1 C_1$  คือเทอมของพลังงานตัวเก็บประจุ  $C_1$  ที่มีประจุอัดอยู่เต็มจะมีค่าดังนี้

$$U = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C_1} \quad (3.15)$$

และจากวงจร (B) กระแสไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุด  $I_{\max}$  ที่เวลาขณะที่ประจุไหลออกจากตัวเก็บประจุ  $C_1$  จนหมด ดังนั้นพลังงานรวมทั้งหมดของวงจร  $L_1 C_1$  คือเทอมของพลังงานในขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_1$  ซึ่งสะสมไว้อยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กชั่วขณะ (Transient Magnetic Field) จะมีค่าดังนี้

$$U = \frac{1}{2} L I^2 \quad (3.16)$$

จากวงจร (C) ไป (D) พลังงานสนามแม่เหล็กจะถูกเก็บภายในขดลวดเหนี่ยวนำ กระแสจะกลายเป็นศูนย์ทันทีไม่ได้ เนื่องจากคุณสมบัติของขดลวดเหนี่ยวนำ แต่จะค่อยๆ ลดลง โดยตัวเก็บประจุจะกลับขึ้นที่นั่นกระแสจะไหลเข้าอัดตัวเก็บประจุ  $C_1$  อีกครั้งจนตัวเก็บประจุ  $C_1$  มีประจุอยู่เต็ม และจะเกิดการถ่ายเทพลังงานวนเวียนกันจนเป็นวัฏจักรครบรอบ

โดยสามารถวิเคราะห์การแกว่งในวงจร  $L_1 C_1$  จากหลักการถ่ายเทพลังงานระหว่างพลังงานของตัวเก็บประจุ  $C_1$  กับพลังงานในขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_1$  จะได้พลังงานรวมคือ

$$U = U_{C_1} + U_{L_1} = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C_1} + \frac{1}{2} L_1 I^2 \quad (3.17)$$

สมมติว่าความต้านทานในวงจรเป็นศูนย์ ดังนั้นพลังงานรวมจะต้องมีค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงตามเวลา นั่นคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานเทียบกับเวลาต้องเป็นศูนย์ ซึ่งเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{dU}{dt} = 0 = \frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C_1} + \frac{1}{2} L_1 I^2 \right] = \frac{Q}{C_1} \frac{dQ}{dt} + L_1 I \frac{dI}{dt} \quad (3.18)$$

จากการลดลงของประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร  $L_1, C_1$  นั่นคือ

$$I = -\frac{dQ}{dt} \quad (3.19)$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{d^2Q}{dt^2} \quad (3.20)$$

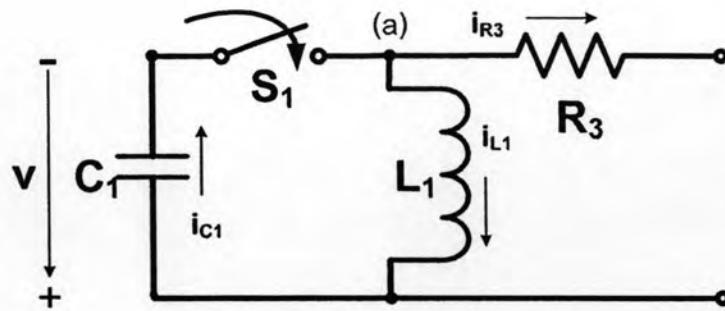
ดังนั้นเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{Q}{C_1} (-I) + L_1 I \left( -\frac{d^2Q}{dt^2} \right) = 0 \quad (3.21)$$

จะได้สมการการแกว่งทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง มีค่าคือ

$$\frac{d^2Q}{dt^2} + \frac{1}{L_1 C_1} Q = 0 \quad (3.22)$$

เมื่อพิจารณาวงจรขนาน  $R, L, C_1$  จะสมมุติให้ขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_1$  มีพลังงานอยู่ นั่นคือขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_1$  มีกระแสไหลผ่านที่เวลาเริ่มต้นเท่ากับ  $i_L(0)$  ส่วนตัวเก็บประจุมีแรงดันตกคร่อมที่เวลาเริ่มต้นเท่ากับ  $v(0)$



รูปที่ 3.7 การแกว่งในวงจร  $L_1C_1$  เมื่อมีความต้านทาน  $R_3$

จากวงจรรูปที่ 3.7 อาศัยกฎ KCL ของ Kirchhoff ที่ปม (a) ด้านบนของวงจรจะ  
ได้สมการที่ 3.23

$$i_{R3} + i_{L1} - i_{C1} = 0 \quad (3.23)$$

แทนค่า  $i_{R3} = -v/R_3$ ,  $i_{C1} = C_1 dv/dt$  และ  $i_{L1} = -[1/L_1 \int v dt + i_{L1}(0)]$  ในสมการ  
ที่ 3.23 จะได้

$$\frac{v}{R_3} + [1/L_1 \int v dt + i_{L1}(0)] + C_1 \frac{dv}{dt} = 0 \quad (3.24)$$

ทำการอนุพันธ์สมการข้างบนเทียบกับเวลา แล้วหารทั้งหมดด้วย  $C_1$  จะได้

$$\frac{d^2v}{dt^2} + \frac{1}{R_3C_1} \frac{dv}{dt} + \frac{1}{L_1C_1} v = 0 \quad (3.25)$$

การหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง ของสมการที่ 3.25 จะต้องสมมุติ  
คำตอบอยู่ในรูปของฟังก์ชัน Exponential สมมุติคำตอบได้ว่า

$$v = Ae^{st} \quad (3.26)$$

นำสมการที่ 3.26 แทนลงในสมการที่ 3.25 โดยแทนอนุพันธ์อันดับที่ 1 ด้วย  $s$  และ  
แทนค่าอนุพันธ์อันดับที่ 2 ด้วย  $s^2$  จะได้



$$\frac{d^2}{dt^2} Ae^{st} + \frac{1}{R_3 C_1} \frac{d}{dt} Ae^{st} + \frac{1}{L_1 C_1} Ae^{st} = 0 \quad (3.27)$$

$$As^2 e^{st} + \frac{1}{R_3 C_1} Ase^{st} + \frac{1}{L_1 C_1} Ae^{st} = 0 \quad (3.28)$$

$$Ae^{st} \left[ s^2 + \frac{1}{R_3 C_1} s + \frac{1}{L_1 C_1} \right] = 0 \quad (3.29)$$

การพิจารณาวงจรมุมติให้ขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_1$  มีพลังงานสะสมอยู่ ดังนั้นเทอมของสมการช่วย (Auxiliary Equation) จะต้องเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$s^2 + \frac{1}{R_3 C_1} s + \frac{1}{L_1 C_1} = 0 \quad (3.30)$$

จากสมการช่วยเป็นสมการกำลังสอง (Quadratic Equation) ที่ไม่สามารถแยกตัวประกอบได้ การหาคำรากของสมการช่วยนี้จะต้องใช้สูตร สำหรับรูปทั่วไปทางเลขคณิตของสมการนี้คือ

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad (3.31)$$

ซึ่งมีคำตอบหรือรากของสมการคือ

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.32)$$

เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ตัวคงที่ของสมการที่ 3.31 กับสมการที่ 3.30 จะได้ว่า

$$a = 1, \quad b = \frac{1}{R_3 C_1}, \quad c = \frac{1}{L_1 C_1}$$

จากสมการที่ 3.30 จะเห็นได้ว่ารากของสมการมีสองค่าคือ

$$s_1 = -\frac{1}{2R_3 C_1} + \sqrt{\left(\frac{1}{2R_3 C_1}\right)^2 - \frac{1}{L_1 C_1}} \quad (3.33)$$

$$s_2 = -\frac{1}{2R_3 C_1} - \sqrt{\left(\frac{1}{2R_3 C_1}\right)^2 - \frac{1}{L_1 C_1}} \quad (3.34)$$

จากสมการที่ 3.33 และสมการที่ 3.34 สามารถเขียนรูปแบบใหม่ได้ดังนี้

$$s_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (3.35)$$

$$s_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (3.36)$$

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (3.37)$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{2R_3C_1} \quad (3.38)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1C_1}} \quad (3.39)$$

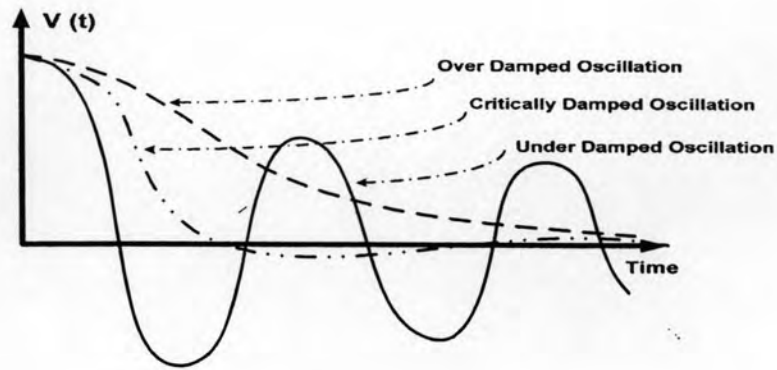
สำหรับเทอมรากที่สอง  $\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} = j\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = j\omega_d$  ดังนั้นค่ารากของสมการสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$s_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_d \quad (3.40)$$

- เมื่อ  $s_1, s_2$  ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) มีหน่วยเป็นเนเปอร์ต่อวินาที  
 $\omega_0$  ความถี่เรโซแนนซ์ (resonant frequency) มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที  
 $\omega_d$  ความถี่เรเดียนหน่วง (damped radian frequency) มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที  
 $\alpha$  แฟคเตอร์หน่วง (damping factor) มีหน่วยเป็นเนเปอร์ต่อวินาที

โดยสามารถแบ่งการแกว่งออกได้เป็นสามประเภท นั่นคือ

- การแกว่งแบบหน่วงขาด (under damped oscillation) เมื่อ  $\omega_d$  มีค่าเป็นบวก
- การแกว่งแบบหน่วงวิกฤติ (critically damped oscillation) เมื่อ  $\omega_d$  มีค่าเป็นศูนย์
- การแกว่งแบบหน่วงเกิน (over damped oscillation) เมื่อ  $\omega_d$  มีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อน



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองของการแกว่งแบบหน่วงทั้ง 3 กรณี

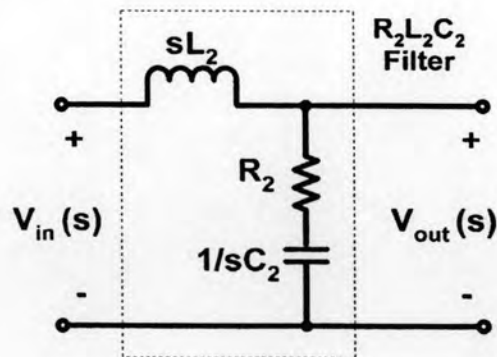
ดังนั้น ความถี่ของการแกว่งคือ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} \tag{3.41}$$

เมื่อกำหนดให้  $f = 100 \text{ kHz}$ ,  $C_1 = 0.3 \text{ }\mu\text{F}$  จะได้  $L_1 = 9 \text{ }\mu\text{H}$

### 3.1.3 การออกแบบวงจรกรอง

วงจรกรองซึ่งมีองค์ประกอบ  $R_2L_2C_2$  ที่มีแรงดันทางด้านเข้าคือ  $V_{in}(s)$  และแรงดันทางด้านออกคือ  $V_{out}(s)$  จะสามารถวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของวงจรกรองได้ด้วยค่าฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) โดยทำการวิเคราะห์ห้วงจรกรองในรูปความถี่เชิงซ้อน  $s$  โดเมน



รูปที่ 3.9 วงจรกรอง  $R_2L_2C_2$

พิจารณาวงจรกรองจากรูปที่ 3.9 จะสามารถเขียนสมการอนุพันธ์ของวงจรได้ดังนี้

$$L_2 \frac{di}{dt} + R_2 i + \frac{1}{C_2} \int i dt = V_{in}(t) \quad (3.42)$$

$$R_2 i + \frac{1}{C_2} \int i dt = V_{out}(t) \quad (3.43)$$

จากสมการที่ 3.42 และสมการที่ 3.43 ทำการแปลงลาปลาซ โดยกำหนดให้สถานะเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ทั้งหมด ดังนั้นจะได้

$$(sL_2 + R_2 + \frac{1}{sC_2})I(s) = V_{in}(s) \quad (3.44)$$

$$(R_2 + \frac{1}{sC_2})I(s) = V_{out}(s) \quad (3.45)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองคือ

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} \quad (3.46)$$

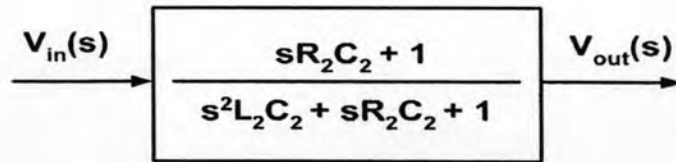
$$= \frac{R_2 + \frac{1}{sC_2}}{sL_2 + R_2 + \frac{1}{sC_2}} \quad (3.47)$$

$$= \frac{sR_2C_2 + 1}{s^2L_2C_2 + sR_2C_2 + 1} \quad (3.48)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถหาความถี่เรโซแนนต์ของวงจรกรองคือ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (3.49)$$

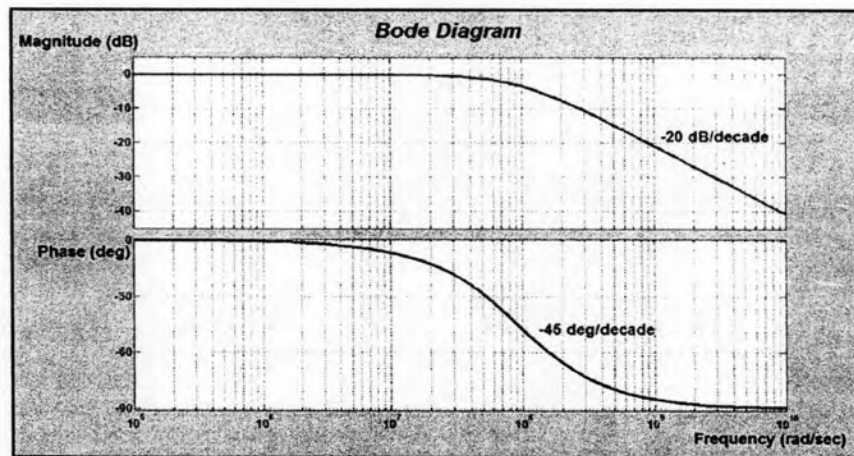
จากสมการที่ 3.48 นำไปเขียนเป็นภาพบล็อกจะได้อิงรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.10 ภาพบล็อกของวงจรกรอง  $R_2L_2C_2$ 

เมื่อกำหนดให้  $L_2 = 0.6 \mu\text{H}$ ,  $R_2 = 50 \Omega$ ,  $C_2 = 0.01 \mu\text{F}$  ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองจะมีค่าเท่ากับ

$$H(s) = \frac{(50\Omega)(0.01\mu\text{F})s + 1}{(0.6\mu\text{H})(0.01\mu\text{F})s^2 + (50\Omega)(0.01\mu\text{F})s + 1}$$

ซึ่งผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองจากฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 3.11 แผนภาพโบเดของวงจรกรอง

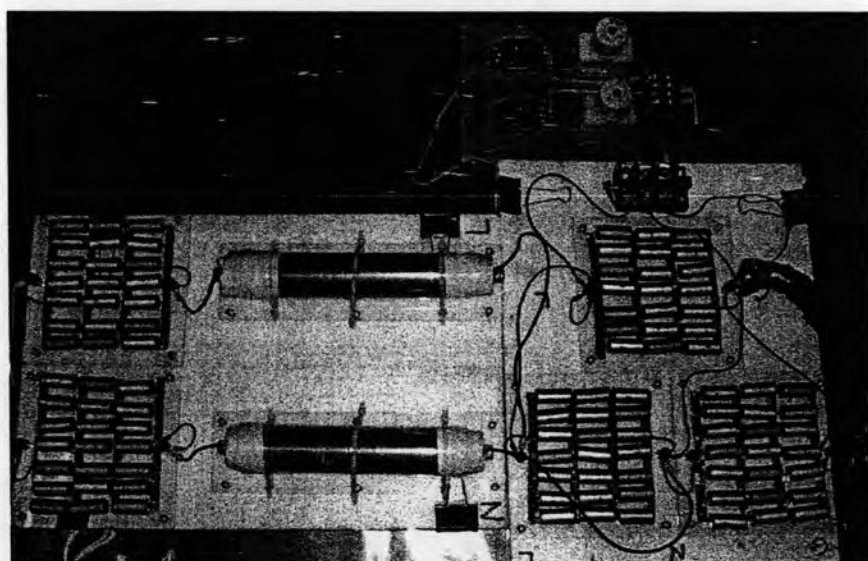
เมื่อกำหนดให้  $L_2 = 0.6 \mu\text{H}$ ,  $C_2 = 0.01 \mu\text{F}$  ดังนั้น ความถี่เรโซแนนต์ของวงจรกรองมีค่าเท่ากับ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.6\mu\text{H})(0.01\mu\text{F})}} = 2.05 \text{ MHz}$$

จากแผนภาพโบเดผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรอง ความถี่ของคลื่นแฉ่งแบบหนึ่งขั้วของระบบ คือ 100 kHz จะสามารถผ่านไปได้ ซึ่งความถี่ดังกล่าวจะอยู่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนต์ คือ 2.05 MHz ดังนั้นจึงไม่ได้รับการกระตุ้นจากภาวะเรโซแนนต์ของวงจรรอง โดยวงจรรองจะลดผลแรงดันเกินชั่วขณะ ( $dv/dt$ ) ของค้ายอดคลื่นแฉ่งแบบหนึ่งขั้ว

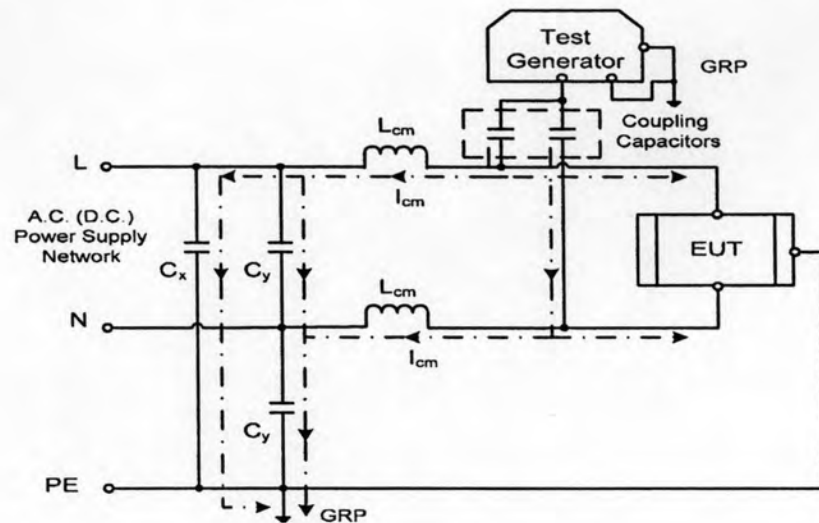
### 3.1.4 การออกแบบอุปกรณ์ Coupling/Decoupling Network แบบ 1 เฟส

อุปกรณ์ Coupling/Decoupling Network นั้นเป็นวงจรรองต่ออยู่ระหว่างแหล่งจ่ายไฟกับอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สัญญาณจากเครื่องกำเนิดคลื่นแฉ่งแบบหนึ่งขั้วผ่านเข้าแหล่งจ่ายไฟ และจากแหล่งจ่ายไฟผ่านเข้าเครื่องกำเนิดคลื่นแฉ่งแบบหนึ่งขั้ว ซึ่งในมาตรฐานได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีโหมดร่วม (Common Mode) และกรณีโหมดผลต่าง (Differential Mode) ซึ่งอุปกรณ์ Coupling/Decoupling Network จะมีองค์ประกอบคือ ขดลวดเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุส่งผ่าน โดยขนาดขดลวดเหนี่ยวนำตามมาตรฐานกำหนดให้มามีค่าไม่เกิน 1.5 mH ส่วนขนาดตัวเก็บประจุส่งผ่าน คือ 0.5  $\mu\text{F}$  โดยมีความต้านทานด้านออกที่ขั้วขาออกของเครื่องกำเนิดมีค่าเท่ากับ 200  $\Omega$



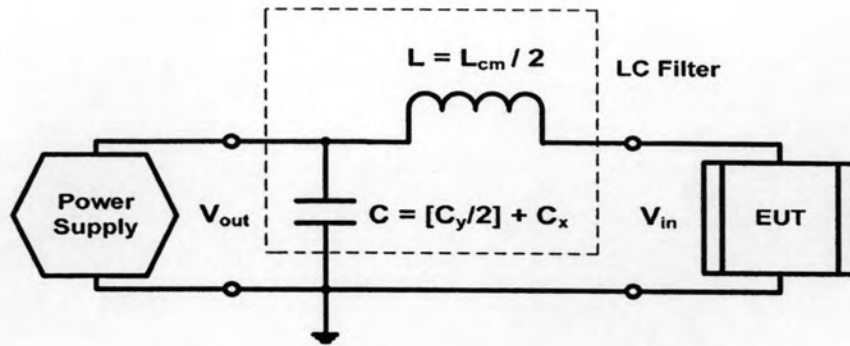
รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ Coupling/Decoupling Network

การทดสอบในกรณีโหมดร่วม กระแสโหมดร่วม  $I_{cm}$  ที่ไหลในอุปกรณ์ Coupling/  
Decoupling Network มีทิศทางไหลดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การไหลของกระแสกรณีทดสอบแบบโหมดร่วม

จากรูปที่ 3.13. กระแส  $I_{cm}$  จากตัวเก็บประจุส่งผ่าน (Coupling Capacitors) จะแยกไหลไปยังอุปกรณ์ทดสอบ (Equipment Under Test: EUT) และวงจรกรอง โดยวงจรกรองจะมีกระแส  $I_{cm}$  ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_{cm}$  ทั้งสองทำให้เกิดการสูญเสียเป็นพลังงานความร้อนขึ้น โดยกระแส  $I_{cm}$  จะไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_y$  และตัวเก็บประจุ  $C_x$  ลงกราวนด์ เมื่อพิจารณาขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_{cm}$  จะเสมือนต่อขนานกันอยู่ ดังนั้นจะได้ขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ  $L = \frac{L_{cm}}{2}$  โดยตัวเก็บประจุ  $C_y$  และตัวเก็บประจุ  $C_x$  จะเสมือนต่อขนานกันอยู่ ดังนั้นจะได้ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ  $C = \frac{C_y}{2} + C_x$  ดังนั้นสามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังนี้



รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลของวงจรกรองกรณีสอดแบบโหมดร่วม

พิจารณาวงจรสมมูลของวงจรกรองดังรูปที่ 3.14 จะสามารถเขียนสมการอนุพันธ์ของวงจรได้ดังนี้

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = V_{in}(t) \quad (3.50)$$

$$\frac{1}{C} \int i dt = V_{out}(t) \quad (3.51)$$

จากสมการที่ 3.50 และสมการที่ 3.51 ทำการแปลงลาปลาซ โดยกำหนดให้สภาวะเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ทั้งหมด ดังนั้นจะได้

$$(sL + \frac{1}{sC})I(s) = V_{in}(s) \quad (3.52)$$

$$(\frac{1}{sC})I(s) = V_{out}(s) \quad (3.53)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองคือ

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{s^2LC + 1} \quad (3.54)$$



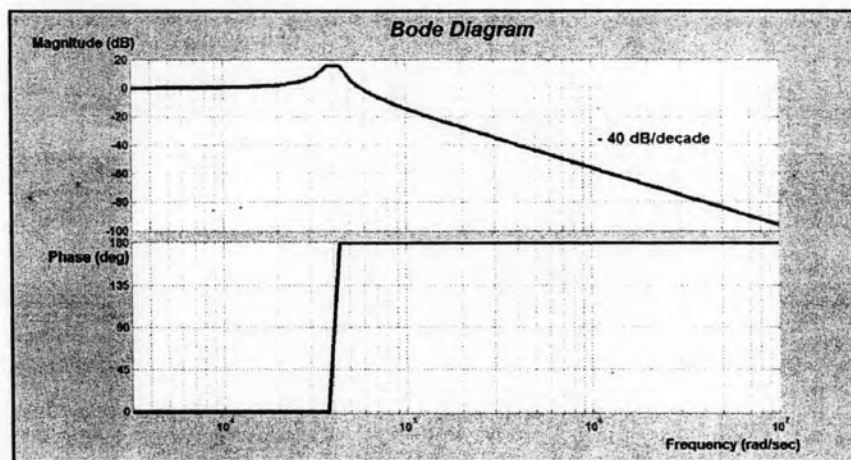
จากฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถหาความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรคือ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.55)$$

พิจารณาวจรสมมูลของวงจรกรองดังรูปที่ 3.14 และแทนค่าองค์ประกอบของวงจรกรองได้ดังนี้  $C = \frac{C_y}{2} + C_x = \frac{0.5\mu\text{F}}{2} + 0.5\mu\text{F} = 0.75\mu\text{F}$ ,  $L = \frac{L_{cm}}{2} = \frac{1.2\text{mH}}{2} = 0.6\text{ mH}$  ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองจะมีค่าเท่ากับ

$$H(s) = \frac{1}{(0.6\text{mH})(0.75\mu\text{F})s^2 + 1}$$

ซึ่งผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองจากฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้ผลดังนี้



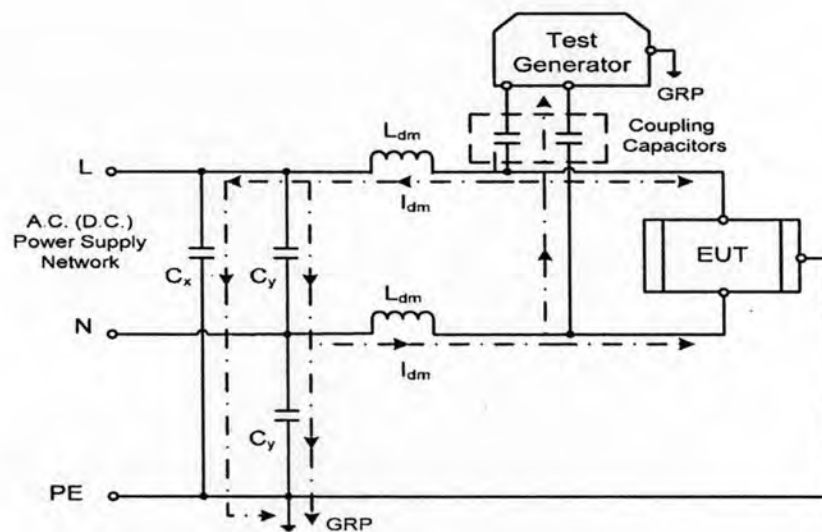
รูปที่ 3.15 แผนภาพโบเดของวงจรสมมูลของวงจรกรองกรณีทดสอบแบบโหมดร่วม

เมื่อกำหนดให้  $C = 0.75\mu\text{F}$ ,  $L = 0.6\text{ mH}$  ดังนั้น ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองจะมีค่าเท่ากับ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.6\text{mH})(0.75\mu\text{F})}} = 7.5\text{ kHz}$$

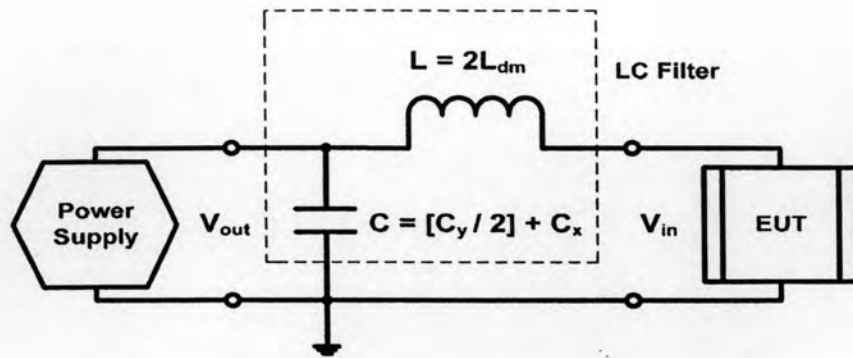
จากแผนภาพโบเดของวงจรมุมของวงจรกรองที่ทดสอบแบบโหมดร่วม ความถี่ของแรงดันคลื่นแอมป์แบบหน่วงช้า คือ 100 kHz จะถูกลดทอนสัญญาณก่อนเข้า แหล่งจ่ายไฟ โดยมีอัตราการลดทอนของผลตอบสนองเชิงขนาดเท่ากับ -40 dB/decade ซึ่งความถี่ดังกล่าวจะอยู่สูงกว่าความถี่เรโซแนนต์ คือ 7.5 kHz ดังนั้นจึงไม่ได้รับการกระตุ้นจากภาวะเรโซแนนต์ของวงจรกรอง

สำหรับการทดสอบในกรณีโหมดผลต่าง กระแสโหมดผลต่าง  $I_{dm}$  ที่ไหลในอุปกรณ์ Coupling/Decoupling Network มีทิศทางไหลดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การไหลของกระแสกรณีทดสอบแบบโหมดผลต่าง

จากรูปที่ 3.16 กระแส  $I_{dm}$  จากตัวเก็บประจุส่งผ่าน (Coupling Capacitors) จะแยกไหลไปยังอุปกรณ์ทดสอบ (Equipment Under Test: EUT) และวงจรกรอง โดยวงจรกรองจะมีกระแส  $I_{dm}$  ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_{dm}$  ทั้งสองทำให้เกิดการสูญเสียเป็นพลังงานความร้อนขึ้น ซึ่งกระแส  $I_{dm}$  จะไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_y$  และตัวเก็บประจุ  $C_x$  ลงกราวด์ โดยมีกระแส  $I_{dm}$  บางส่วนในสายนิวทรัลไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_{dm}$  ไหลเข้าอุปกรณ์ทดสอบและไหลย้อนกลับเข้าเครื่องกำเนิดคลื่นแอมป์แบบหน่วงช้า เมื่อพิจารณาขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_{dm}$  จะเสมือนต่ออนุกรมกันอยู่ ดังนั้นจะได้ขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ  $L = 2L_{dm}$  โดยตัวเก็บประจุ  $C_y$  และตัวเก็บประจุ  $C_x$  จะเสมือนต่อขนานกันอยู่ ดังนั้นจะได้ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ  $C = \frac{C_y}{2} + C_x$  โดยสามารถนำมาเขียนเป็นวงจรมุมได้ดังนี้

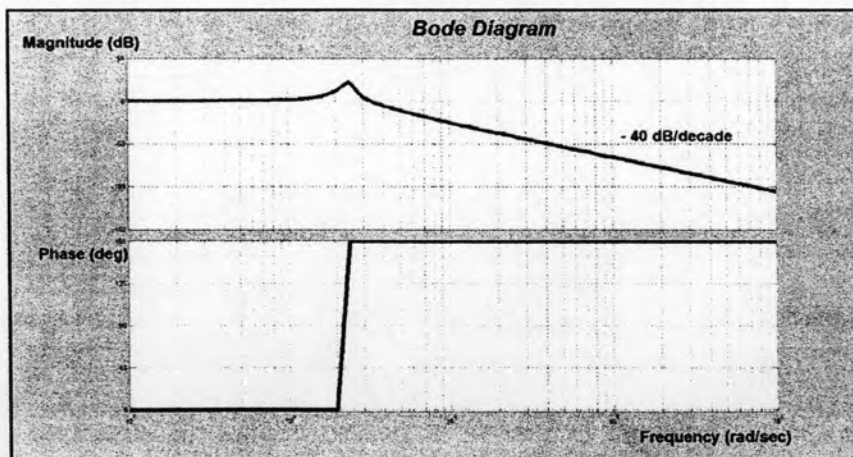


รูปที่ 3.17 วงจรสมมูลของวงจรกรองกรณีสอบแบบโหมดผลต่าง

พิจารณาวงจรสมมูลของวงจรกรองดังรูปที่ 3.17 และแทนค่าองค์ประกอบของวงจรกรองได้ดังนี้  $C = \frac{C_y}{2} + C_x = \frac{0.5\mu F}{2} + 0.5\mu F = 0.75\mu F$ ,  $L = 2L_{dm} = 2(1.2mH) = 2.4mH$  ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองจะมีค่าเท่ากับ

$$H(s) = \frac{1}{(2.4mH)(0.75\mu F)s^2 + 1}$$

ซึ่งผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองจากฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้ผลดังนี้



รูปที่ 3.18 แผนภาพโบเดของวงจรสมมูลของวงจรกรองกรณีสอบแบบโหมดผลต่าง

เมื่อกำหนดให้  $C = 0.75 \mu\text{F}$ ,  $L = 2.4 \text{ mH}$  ดังนั้น ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร  
กรองจะมีค่าเท่ากับ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(2.4\text{mH})(0.75\mu\text{F})}} = 3.75 \text{ kHz}$$

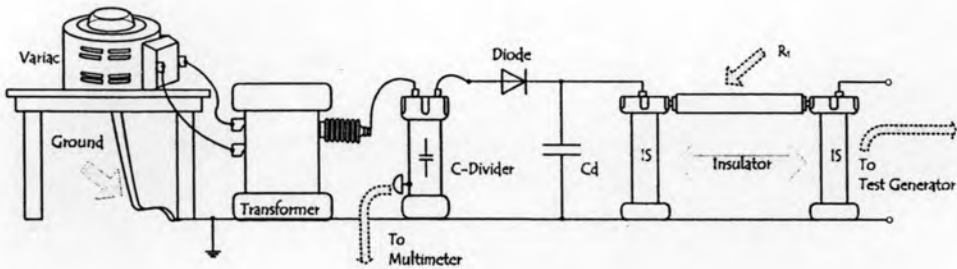
จากแผนภาพโบเดของวงจรสมมูลของวงจรกรองกรณีสอดแบบใหม่ผลต่าง  
ความถี่ของแรงดันคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ คือ 100 kHz จะถูกลดทอนสัญญาณก่อนเข้า  
แหล่งจ่ายไฟ โดยมีอัตราการลดทอนของผลตอบสนองเชิงขนาดเท่ากับ -40 dB/decade ซึ่งความถี่  
ดังกล่าวจะอยู่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ คือ 3.75 kHz ดังนั้นจึงไม่ได้รับการกระตุ้นจากภาวะเรโซแนนซ์  
ของวงจรกรอง

### 3.2 การออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์

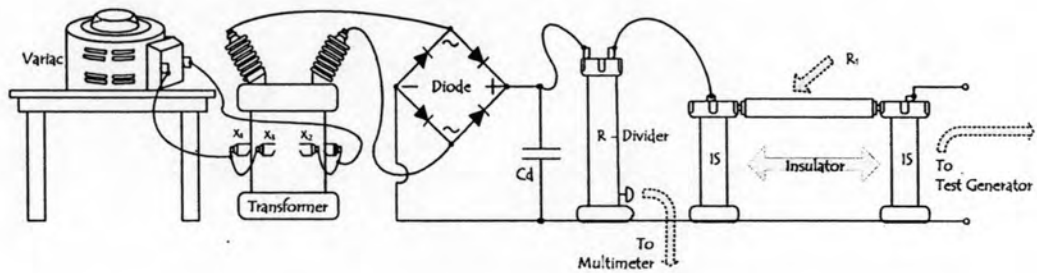
การออกแบบวงจรของเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำที่ได้คำนวณหาค่าองค์ประกอบ  
ต่างๆ ที่ใช้ในวงจรได้แล้วนั้น จึงต้องพิจารณาเลือกวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ในการประกอบสร้างเครื่อง  
กำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำก่อนการนำองค์ประกอบต่างๆ ไปทดสอบและประกอบสร้างจริง

#### 3.2.1 แหล่งกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง

การสร้างแรงดันสูงกระแสตรงได้จากการเปลี่ยนแรงดันกระแสสลับเป็นแรงดัน  
กระแสตรง โดยวงจรเรกติฟายเออร์ ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก คือ หม้อแปลงทดสอบ ไดโอด  
และตัวเก็บประจุกรองกระแส จากรูปที่ 3.19 ใช้หม้อแปลงปรับแรงดัน (Variac) ปรับขนาดแรงดันที่  
ป้อนให้กับหม้อแปลงทดสอบ โดยหม้อแปลงทดสอบจะสร้างแรงดันสูงกระแสสลับ 50 Hz ซึ่งด้าน  
ทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบจะต่อผ่านไดโอดแรงสูง ซึ่งทำหน้าที่เรียงกระแสและมีตัวเก็บประจุ  
แรงสูง  $C_d$  เป็นตัวกรองคลื่นแรงดัน ก็จะได้แรงดันสูงกระแสตรงที่ปลายขั้วทั้งสอง ในส่วนโวลต์เตจดี  
ไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ (C-Divider) มีไว้เพื่อวัดแรงดันกระแสสลับที่ออกจากหม้อแปลงทดสอบ  
โดยมีอัตราส่วนการแบ่งแรงดัน 1:995.2 และโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน (R-Divider) มีไว้  
เพื่อวัดแรงดันกระแสตรงที่ออกจากตัวเก็บประจุกรองคลื่นแรงดัน โดยมีอัตราส่วนการแบ่งแรงดัน  
1:1281.93 ส่วนความต้านทาน  $R_1$  มีไว้เพื่อจำกัดกระแสในการอัดประจุของตัวเก็บประจุสะสม  
พลังงาน



(ก) วงจรกำเนิดแรงดันกระแสตรงอัดประจุในกรณีต่อสายดิน



(ข) วงจรกำเนิดแรงดันกระแสตรงอัดประจุในกรณีไม่ต่อสายดิน

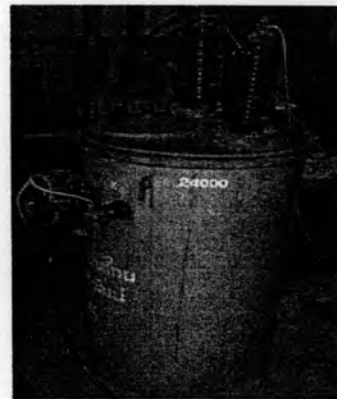
รูปที่ 3.19 วงจรกำเนิดแรงดันกระแสตรงอัดประจุ

3.2.1.1 หม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงที่ใช้ทดสอบในกรณีต่อสายดินเป็นหม้อแปลง 1 เฟส มีพิกัดด้านปฐมภูมิ 220 V, 90.9 A และด้านทุติยภูมิ 10 kV, 2 A ผลิตโดยบริษัท CHAROEN CHAI TRANSFORMER ส่วนหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบในกรณีไม่ต่อสายดินเป็นหม้อแปลง 1 เฟส มีพิกัดด้านปฐมภูมิ 240 V, 100 A และด้านทุติยภูมิ 37.5 kV, 0.64 A ผลิตโดยบริษัท ศิริวิวัฒน์ ซึ่งหม้อแปลงทั้งสองมีในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง



(ก) หม้อแปลงทดสอบกรณีต่อสายดิน

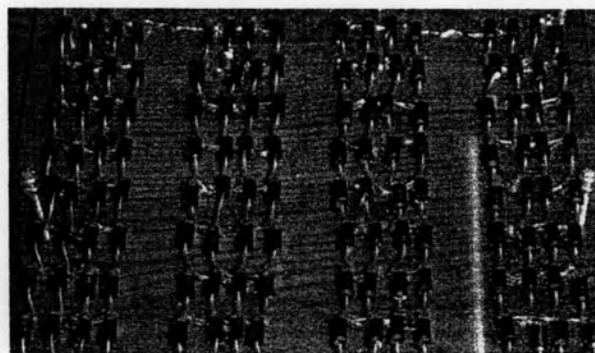


(ข) หม้อแปลงทดสอบกรณีไม่ต่อสายดิน

รูปที่ 3.20 หม้อแปลงทดสอบ

### 3.2.1.2 ไดโอดแรงสูง

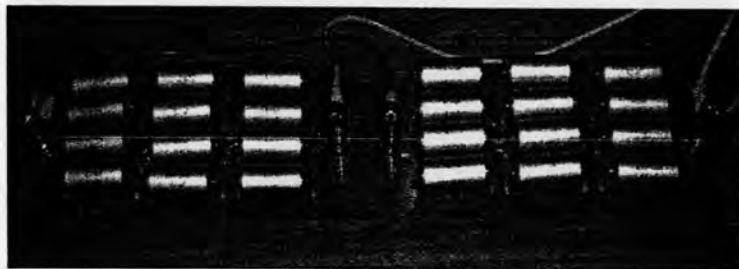
ไดโอดแรงสูงทำหน้าที่เรียงกระแส ซึ่งเปลี่ยนแรงดันสูงกระแสสลับที่ได้จากหม้อแปลงทดสอบเป็นแรงดันสูงกระแสตรง โดยทั่วไปจะใช้ไดโอดสารกึ่งตัวนำมาต่ออันดับกัน ซึ่งมีลักษณะสมบัติด้านกระแสและแรงดันที่ดีกว่าหลอดสุญญากาศ จึงเลือกใช้ไดโอดเบอร์ 1N5408 ซึ่งมีพิกัดแรงดันไบแอสกลับ 1000 V และพิกัดกระแสไบแอสตรง 3 A จำนวน 8 ตัว นำมาต่ออนุกรมกันจำนวน 4 ชุด และนำทั้ง 4 ชุดมาต่อขนานกัน ดังนั้นพิกัดไดโอดแรงสูง คือ 8 kV, 12 A



รูปที่ 3.21 ไดโอดแรงสูง

### 3.2.1.3 ตัวเก็บประจุรอกกระแส

แรงดันสูงกระแสตรงที่ได้จากไดโอดแรงสูงจะไม่มีควมราบเรียบ และแรงดันยังไม่คงที่เท่าที่ควร จึงต้องมีการต่อตัวเก็บประจุรอกกระแสเพื่อกรองแรงดันให้เรียบขึ้น โดยเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด  $0.22 \mu\text{F}$ ,  $1.6 \text{ kV}$  ชนิด Metallized Polypropylene จำนวน 8 ตัวนำมาต่อขนานกันจำนวน 3 ชุด และนำทั้ง 3 ชุดมาต่ออนุกรมกัน จะได้ขนาดของตัวเก็บประจุ คือ  $0.59 \mu\text{F}$ ,  $4.8 \text{ kV}$



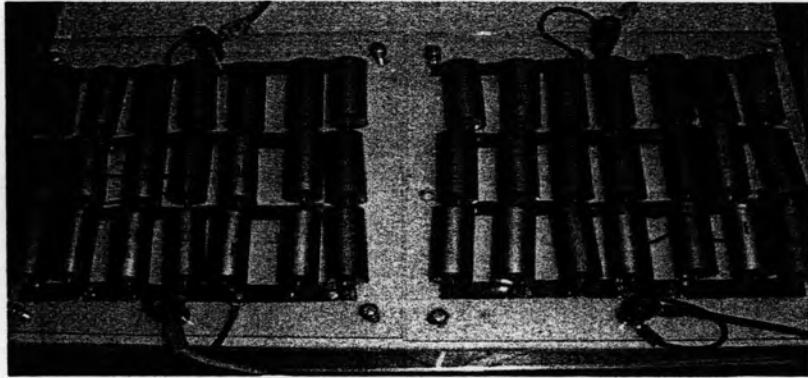
รูปที่ 3.22 ตัวเก็บประจุรอกกระแส

### 3.2.2 องค์ประกอบในวงจรกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้า

จากการคำนวณหาค่าองค์ประกอบในวงจรกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้าได้แล้วนั้น สามารถนำมาเลือกวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ในการประกอบสร้างดังนี้

#### 3.2.2.1 การออกแบบตัวเก็บประจุ

ขนาดตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน  $C_1$  ที่ได้ออกแบบไว้ คือ  $0.3 \mu\text{F}$  จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด  $0.22 \mu\text{F}$ ,  $1.6 \text{ kV}$  ชนิด Metallized Polypropylene จำนวน 4 ตัวนำมาต่อขนานกันจำนวน 3 ชุด และนำทั้ง 3 ชุดมาต่ออนุกรมกัน จะได้ขนาดของตัวเก็บประจุ คือ  $0.3 \mu\text{F}$ ,  $4.8 \text{ kV}$  ในส่วนขนาดตัวเก็บประจุ  $C_2$  ที่ได้ออกแบบไว้ คือ  $0.01 \mu\text{F}$  จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด  $0.022 \mu\text{F}$ ,  $2 \text{ kV}$  ชนิด Metallized Polypropylene จำนวน 2 ตัวนำมาต่ออนุกรมกัน ดังนั้นขนาดของตัวเก็บประจุ คือ  $0.011 \mu\text{F}$ ,  $4 \text{ kV}$  และขนาดตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ Coupling/Decoupling Network ตามมาตรฐานนั้นได้กำหนดตัวเก็บประจุสงผ่าน (Coupling Capacitors) มีค่า  $0.5 \mu\text{F}$  จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุ  $0.22 \mu\text{F}$ ,  $1.6 \text{ kV}$  ชนิด Metallized Polypropylene จำนวน 7 ตัวนำมาต่อขนานกันจำนวน 3 ชุด และนำแต่ละชุดมาต่ออนุกรมกันจะได้ขนาดของตัวเก็บประจุ คือ  $0.51 \mu\text{F}$ ,  $4.8 \text{ kV}$



รูปที่ 3.23 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรเครื่องกำเนิด

### 3.2.2.2 การออกแบบตัวต้านทาน

ตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน  $C_1$  ที่ได้ออกแบบไว้ คือ  $0.3 \mu\text{F}$  มีขนาดแรงดันอัดประจุมีค่าเท่ากับ  $2.7 \text{ kV}$  สามารถคำนวณหาพลังงานสูงสุดที่สามารถจ่ายได้คือ

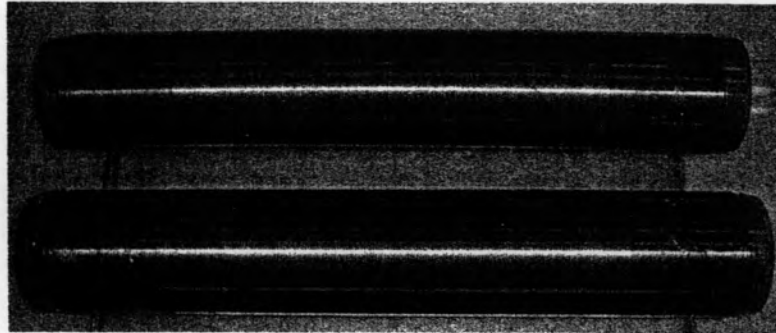
$$W = \frac{1}{2} C_1 V_{c1}^2 \quad (3.56)$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ 3.56 จะได้  $W = 1.1 \text{ Joule}$  และเมื่อพิจารณาถึงการสร้างรูปคลื่นซ้ำในอัตรา  $40 \text{ Hz}$  หรือทุก ๆ  $25 \text{ ms}$  สามารถหาค่ากำลังงานสูงสุดที่ความต้านทานแต่ละตัวต้องทนได้ดังนี้

$$\text{ค่ากำลังงานสูงสุด} \quad P = \frac{W}{T} = \frac{1.1}{25 \times 10^{-3}} = 44 \text{ W} \quad (3.57)$$

ในส่วนตัวต้านทานด้านออก คือ  $200 \Omega$  จะนำลวดโลหะผสมนิเกิลโครเมียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $1.1 \text{ mm}$  พื้นที่หน้าตัด  $0.95 \text{ mm}^2$  ความต้านทานของลวดโลหะมีค่าเท่ากับ  $1.15 \Omega/\text{m}$  และมีมวล  $7.874 \text{ g/m}$  ดังนั้นความต้านทานด้านออก  $200 \Omega$  จะต้องใช้ลวดโลหะยาว  $174 \text{ m}$  ซึ่งมีมวลรวม  $1.37 \text{ kg}$  โดยการพันลวดโลหะรอบกระบอกรอบจนวนพีวีซีแบบ 2 ชั้น เพื่อให้กระแสไหลสวนทาง สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะหักล้างกัน ทำให้ไม่มีความเหนี่ยวนำที่เกิดจากวงรอบ





รูปที่ 3.24 ตัวต้านทานที่ใช้ในวงจรเครื่องกำเนิด

### 3.2.2.3 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ [5]

ขนาดขดลวดเหนี่ยวนำ  $L$ , ที่ได้ออกแบบไว้ คือ  $9 \mu\text{H}$  ใช้สายไฟ THW ที่มีพื้นที่หน้าตัด  $1 \text{ mm}^2$  พันรอบกระบอกจนวนพีวีซี ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $3.44 \text{ cm}$  ( $1\frac{1}{4}$ ) และมีความยาว  $11 \text{ cm}$  สำหรับการพันขดลวดเหนี่ยวนำแบบชั้นเดียว สามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำโดยประมาณได้จากสมการที่ 3.58

$$L = \frac{r^2 N^2}{23r + 25l} \quad (3.58)$$

$$N = \sqrt{\frac{(9\mu\text{H}) \times [(23)(1.72\text{cm}) + (25)(11\text{cm})]}{(1.72\text{cm})^2}}$$

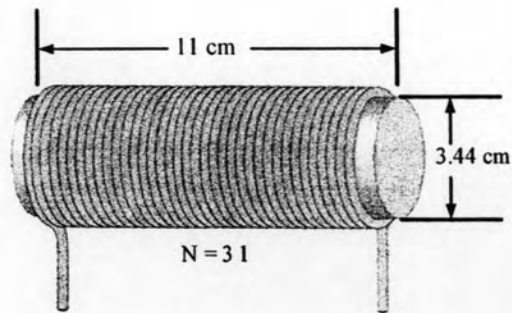
$$N = 31 \text{ รอบ}$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนรอบการพันขดลวดบนกระบอกพีวีซี

$r$  คือ รัศมีของกระบอกพีวีซี มีหน่วยเป็น  $\text{cm}$

$l$  คือ ความยาวกระบอกพีวีซี ในส่วนที่มีขดลวดพันอยู่ มีหน่วยเป็น  $\text{cm}$

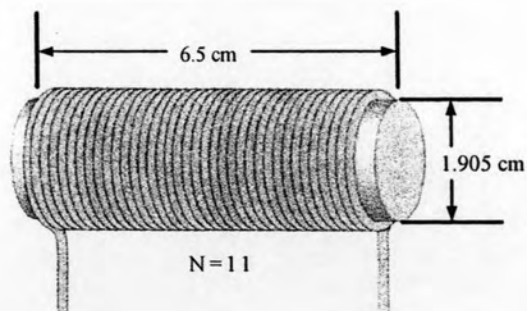
$L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโดยประมาณ มีหน่วยเป็น  $\mu\text{H}$

รูปที่ 3.25 ขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_1$ 

ในส่วขนาดขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_2$  ที่ได้ออกแบบไว้ คือ  $0.6 \mu\text{H}$  เลือกใช้สายไฟ THW ที่มีพื้นที่หน้าตัด  $1 \text{ mm}^2$  พันรอบกระบอกจนวนพีวีซี ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $1.905 \text{ cm}$  ( $\frac{3}{4}$ ") และมีความยาว  $6.5 \text{ cm}$  สามารถคำนวณหาจำนวนรอบการพันขดลวดบนกระบอกพีวีซีได้จากสมการที่ 3.58

$$N = \sqrt{\frac{(0.6\mu\text{H}) \times [(23)(0.9525\text{cm}) + (25)(6.5\text{cm})]}{(0.9525\text{cm})^2}}$$

$$N = 11 \text{ รอบ}$$

รูปที่ 3.26 ขดลวดเหนี่ยวนำ  $L_2$

สำหรับขนาดขดลวดเหนี่ยวนำในวงจร Decoupling ที่ได้ออกแบบไว้คือ 1.2 mH เลือกใช้ลวดทองแดงกลมเคลือบฉนวนเบอร์ 16 SWG ( $\phi = 0.064''$ ) พันรอบกระบอกระบายความร้อนพีวีซี ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.44 cm ( $1\frac{1}{4}''$ ) และความยาว 25 cm ( $9.84''$ ) โดยการพันขดลวดเหนี่ยวนำแบบหลายชั้น สามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำโดยประมาณได้จากสมการ 3.59

$$L = \frac{0.8(NA)^2}{6A + 9B + 10C} \quad (3.59)$$

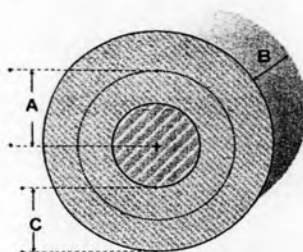
เมื่อ  $N$  คือ จำนวนรอบการพันขดลวดทั้งหมดบนกระบอกระบายความร้อนพีวีซี

A คือ รัศมีเฉลี่ยของขดลวดเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น inch

B คือ ความยาวกระบอกระบายความร้อนพีวีซี ส่วนที่มีขดลวดพันอยู่ มีหน่วยเป็น inch

C คือ ความหนาของขดลวดเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น inch

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโดยประมาณ มีหน่วยเป็น  $\mu\text{H}$



รูปที่ 3.27 พารามิเตอร์ต่างๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำ

กำหนดให้  $n_1$  คือ จำนวนรอบการพันขดลวดในแต่ละชั้น

$n_2$  คือ จำนวนชั้นของการพันขดลวด

$r$  คือ รัศมีของกระบอกระบายความร้อนพีวีซี มีหน่วยเป็น inch

$\phi$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด มีหน่วยเป็น inch

จะได้ว่า  $N = n_1 n_2$ ,  $A = r + C/2$ ,  $B = n_1 \phi$ ,  $C = n_2 \phi$  เมื่อ  $\phi = 0.064''$  กำหนด

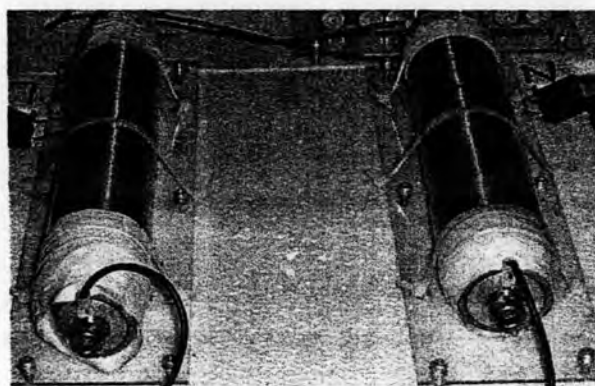
ให้ความยาวกระบอกระบายความร้อนพีวีซีส่วนที่มีขดลวดพันอยู่มีค่าเท่ากับ  $B = 9.84''$  ดังนั้น

$$n_1 = 9.84/0.064 = 153.8, \quad n_2 = N/153.8, \quad C = N/2403, \quad A = 0.68 + N/4806$$

เมื่อแทนค่า  $L = 1.2 \text{ mH}$  และแทนค่าพารามิเตอร์ A, B, C ลงในสมการที่ 3.59

โดยแก้สมการจะได้จำนวนรอบการพันขดลวดทั้งหมดบนกระบอกพีวีซี โดยประมาณ คือ  $N = 485$  รอบ ดังนั้นจะได้  $n_1 = 154$  รอบ และ  $n_2 = 3$  ชั้น

เพราะฉะนั้นขดลวดเหนี่ยวนำจะใช้ลวดทองแดงกลมเคลือบฉนวนเบอร์ 16 SWG พันรอบกระบอกฉนวนพีวีซี ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.44 cm โดยจำนวนรอบการพันขดลวดในแต่ละชั้นคือ 154 รอบ และจำนวนชั้นของการพันขดลวดคือ 3 ชั้น



รูปที่ 3.28 ขดลวดเหนี่ยวนำในวงจร Decoupling

#### 3.2.2.4 การออกแบบโครงสร้างและการฉนวน

เครื่องกำเนิดแรงดันคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำที่ได้ออกแบบและประกอบสร้างขึ้นนั้น จะถูกติดตั้งใช้งานอยู่ในสภาวะบรรยากาศที่มีอากาศเป็นฉนวนที่สำคัญ ลักษณะโครงสร้างของวัสดุที่เหมาะสมจะใช้เป็นฉนวนแข็งคือ ฟีนอลิกรีสโมลไมท์ ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับฉนวนเหลวหรือก๊าซอื่นๆ ไม่ดูดซึมความชื้น ทนความร้อนได้พอสมควร น้ำหนักเบา ตัดเป็นชิ้นงานได้ง่าย ฉนวนแข็งที่มีคุณสมบัติดังกล่าวได้แก่ แผ่นอะคริลิก แผ่นแบ็กกาไลท์ กระบอกฉนวนพีวีซี เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ แผ่นอะคริลิก และแผ่นแบ็กกาไลท์ ที่มีความหนาประมาณ 5 mm ให้สามารถรับน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบต่างๆ ในวงจรได้ โดยการติดตั้งองค์ประกอบต่างๆ บนฉนวนแข็งควรมีระยะห่างพอสมควร และเลือกใช้กระบอกฉนวนพีวีซีในการประกอบสร้างขดลวดเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ใช้ในวงจรเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ

### 3.2.2.5 สวิตช์สารกึ่งตัวนำประเภทไอจีบีที

สวิตช์ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistor: IGBT) จะมีขั้วอยู่ 3 ขั้ว คือ คอลเลกเตอร์ (Collector), เกต (Gate), อีมิเตอร์ (Emitter) เมื่อต้องการควบคุมให้ไอจีบีทีนำกระแสและหยุดนำกระแส สามารถควบคุมโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างขาเกต และขาอีมิเตอร์ ไอจีบีทีจะมีค่าของอิมพีแดนซ์ขาเกตสูง ซึ่งต้องการพลังงานน้อยมากในการควบคุมการสวิตช์ และสามารถเปลี่ยนสถานะสวิตช์ซึ่งได้เร็วสังเกตได้จากพารามิเตอร์  $t_{d(on)}$ ,  $t_{d(off)}$ ,  $t_r$  และ  $t_f$  จะอยู่ในช่วงเวลา 46 ns ถึง 500 ns อย่างไรก็ตามการเปิดวงจรของสวิตช์ IGBT อาจเป็นไปได้ช้า เนื่องจากประจุที่ค้างอยู่ระหว่างขาเกต และขาอีมิเตอร์ ทำให้สวิตช์ IGBT ยังคงทำงานอยู่ ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้โดยการต่อความต้านทานขนาด 100 k $\Omega$  เพื่อคายประจุที่ค้างอยู่ระหว่างขาเกตและขาอีมิเตอร์ ทำให้การเปิดวงจรทำได้อย่างรวดเร็วขึ้น

ซึ่งในงานวิจัยนี้มีเงื่อนไขในการเลือกสวิตช์ IGBT ที่สำคัญ คือ พิกัดแรงดันต้องสามารถใช้งานในระบบได้ และสามารถที่จะดิสชาร์จแรงดันคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้า โดยมีเวลาหน่วงคลื่นเท่ากับ 75 ns  $\pm$  20 % ตามมาตรฐาน ดังนั้นจึงแบ่งสวิตช์ IGBT ออกเป็น 2 ชุด โดยสวิตช์ IGBT ชุดที่หนึ่งทำหน้าที่เปิดปิดวงจรเพื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน  $C_1$  จึงเลือกใช้สวิตช์ IGBT เบอร์ IXEL40N400 ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 4 kV และพิกัดกระแส 40 A ที่อุณหภูมิ 90  $^{\circ}$ C และสวิตช์ IGBT ชุดที่สองทำหน้าที่ดิสชาร์จแรงดันจากตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน  $C_1$  จึงเลือกใช้สวิตช์ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 1.2 kV และพิกัดกระแส 21 A ที่อุณหภูมิ 100  $^{\circ}$ C แต่เนื่องจากสวิตช์ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD มีพิกัดแรงดันต่ำ ทำให้การต่อสวิตช์ IGBT เพียงตัวเดียวไม่สามารถทนต่อพิกัดแรงดันอัดประจุได้ ดังนั้นจึงต้องนำสวิตช์ IGBT จำนวน 3 ตัวนำมาต่ออนุกรมกันในหนึ่งชุด เพื่อเพิ่มพิกัดทางแรงดันให้สามารถทนแรงดันระหว่างขาคอลเลกเตอร์และขาอีมิเตอร์ได้มากกว่าพิกัดแรงดันในระบบ โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสวิตช์ IGBT เบอร์ IXEL40N400 ตามตารางที่ 3.1 และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสวิตช์ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสวิตช์ IGBT เบอร์ IXEL40N400

Symbol	Test Conditions	Maximum Ratings	
$V_{CES}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$ to $125^\circ\text{C}$	4000	V
$V_{GES}$	Continuous	$\pm 20$	V
$I_{C90}$	$T_C = 90^\circ\text{C}$	40	A
$I_{CM}$	Limited by $T_J$	170	A
$P_C$	$T_C = 25^\circ\text{C}$	380	W
$T_J$		-40 ... +125	$^\circ\text{C}$
$T_{JM}$		125	$^\circ\text{C}$
$T_{stg}$		-40 ... +125	$^\circ\text{C}$
	Maximum Lead temperature for soldering 1.6 mm (0.062 in.) from case for 10 s	300	$^\circ\text{C}$
	Maximum Tab temperature for soldering SMD devices for 10 s	260	$^\circ\text{C}$
$F_C$	Mounting Force	30..170 / 7..36	N/lb
$V_{ISOL}$	$I_{ISOL} < 1$ mA, 50/60 Hz, $t = 1$ minute	2500	V~
<b>Weight</b>		10	g

Symbol	Test Conditions	Characteristic Values ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified)		
		min.	typ.	max.
$V_{GE(th)}$	$I_C = 10$ mA, $V_{CE} = V_{GE}$	6.0		7.5 V
$I_{CES}$	$V_{CE} = 4000$ V $V_{GE} = 0$ V $T_J = 125^\circ\text{C}$		1.5	100 $\mu\text{A}$ mA
$I_{GES}$	$V_{CE} = 0$ V, $V_{GE} = \pm 20$ V			$\pm 500$ nA
$V_{CE(sat)}$	$I_C = I_{C90}$ , $V_{GE} = 15$ V $T_J = 125^\circ\text{C}$		3.0 3.9	4.0 V V

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสวิตช์ IGBT เบอร์ IXEL40N400

Symbol	Test Conditions	Characteristic Values ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)		
		min.	typ.	max.
$g_{fs}$	$I_C = I_{C90}, V_{CE} = 10\text{ V}$ ,		21	S
$I_{sc}$	$V_{CC} = 3400\text{ V}, V_{CM} < 4000\text{ V}, V_{GE} = 15\text{ V}$ $T_J = 125^\circ\text{C}, t_{SC} \leq 10\ \mu\text{s}$		175	A
$C_{ies}$			7450	pF
$C_{oes}$	$V_{CE} = 25\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$		280	pF
$C_{res}$			70	pF
$Q_{ge}$	$I_C = I_{C90}, V_{GE} = 15\text{ V}, V_{CE} = 0.5 V_{CES}$		310	nC
$R_{gint}$			5	$\Omega$
$t_{d(on)}$	<b>Inductive load</b>		170	ns
$t_{ri}$	$I_C = I_{C90}, V_{GE} = \pm 15\text{ V}$		100	ns
$E_{on}$	$V_{CE} = 2800\text{ V}, R_G = 33\ \Omega$		54	mJ
$t_{d(off)}$			660	ns
$t_{fi}$			450	ns
$E_{off}$			170	mJ
$t_{d(on)}$	<b>Inductive load, <math>T_J = 125^\circ\text{C}</math></b>		165	ns
$t_{ri}$	$I_C = I_{C90}, V_{GE} = \pm 15\text{ V}$		105	ns
$E_{on}$	$V_{CE} = 2800\text{ V}, R_G = 33\ \Omega$		72	mJ
$t_{d(off)}$			750	ns
$t_{fi}$			480	ns
$E_{off}$			22	mJ
$R_{thJC}$				0.33 K/W
$R_{thCK}$	(Pressure mount)		0.15	K/W

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสวิตช์ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD

**Electrical Characteristics @  $T_J = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise specified)**

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions	
$V_{(BR)CES}$	Collector-to-Emitter Breakdown Voltage <sup>①</sup>	1200	—	—	V	$V_{GE} = 0\text{ V}, I_C = 250\ \mu\text{A}$	
$\Delta V_{(BR)CES}/\Delta T_J$	Temperature Coeff. of Breakdown Voltage	—	0.43	—	V/ $^\circ\text{C}$	$V_{GE} = 0\text{ V}, I_C = 1.0\text{ mA}$	
$V_{CE(on)}$	Collector-to-Emitter Saturation Voltage	—	2.43	3.1	V	$I_C = 21\text{ A}, V_{GE} = 15\text{ V}$	
		—	2.97	—		$I_C = 41\text{ A}$	See Fig. 2, 5
		—	2.47	—		$I_C = 21\text{ A}, T_J = 150^\circ\text{C}$	
$V_{GE(th)}$	Gate Threshold Voltage	3.0	—	6.0		$V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250\ \mu\text{A}$	
$\Delta V_{GE(th)}/\Delta T_J$	Temperature Coeff. of Threshold Voltage	—	-11	—	mV/ $^\circ\text{C}$	$V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250\ \mu\text{A}$	
$g_{fe}$	Forward Transconductance <sup>②</sup>	16	24	—	S	$V_{CE} = 100\text{ V}, I_C = 21\text{ A}$	
$I_{CES}$	Zero Gate Voltage Collector Current	—	—	250	$\mu\text{A}$	$V_{GE} = 0\text{ V}, V_{CE} = 600\text{ V}$	
		—	—	5000		$V_{GE} = 0\text{ V}, V_{CE} = 600\text{ V}, T_J = 150^\circ\text{C}$	
$V_{FM}$	Diode Forward Voltage Drop	—	2.6	3.3	V	$I_C = 8.0\text{ A}$	
		—	2.4	3.1		$I_C = 8.0\text{ A}, T_J = 125^\circ\text{C}$	
$I_{GES}$	Gate-to-Emitter Leakage Current	—	—	$\pm 100$	nA	$V_{GE} = \pm 20\text{ V}$	

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสวิตช์ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD

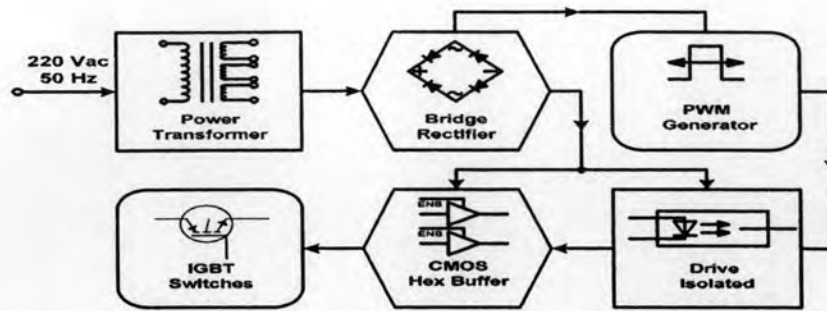
Switching Characteristics @  $T_J = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$Q_g$	Total Gate Charge (turn-on)	—	86	130	nC	$I_c = 21\text{A}$ $V_{CC} = 400\text{V}$ See Fig. 8 $V_{GE} = 15\text{V}$
$Q_{ge}$	Gate - Emitter Charge (turn-on)	—	13	20		
$Q_{gc}$	Gate - Collector Charge (turn-on)	—	29	44		
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	46	—	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}$ $I_c = 21\text{A}$ , $V_{CC} = 800\text{V}$ $V_{GE} = 15\text{V}$ , $R_G = 10\Omega$ Energy losses include "tail" and diode reverse recovery. See Fig. 9, 10, 18
$t_r$	Rise Time	—	35	—		
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	97	150		
$t_f$	Fall Time	—	240	360		
$E_{on}$	Turn-On Switching Loss	—	1.80	—	mJ	$T_J = 150^\circ\text{C}$ , See Fig. 11, 18 $I_c = 21\text{A}$ , $V_{CC} = 800\text{V}$ $V_{GE} = 15\text{V}$ , $R_G = 10\Omega$ Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.
$E_{off}$	Turn-Off Switching Loss	—	1.93	—		
$E_{ts}$	Total Switching Loss	—	3.73	4.6		
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	42	—	ns	$T_J = 150^\circ\text{C}$ , See Fig. 11, 18 $I_c = 21\text{A}$ , $V_{CC} = 800\text{V}$ $V_{GE} = 15\text{V}$ , $R_G = 10\Omega$ Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.
$t_r$	Rise Time	—	32	—		
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	240	—		
$t_f$	Fall Time	—	510	—		
$E_{ts}$	Total Switching Loss	—	7.04	—	mJ	
$L_E$	Internal Emitter Inductance	—	13	—	nH	Measured 5mm from package
$C_{ies}$	Input Capacitance	—	1800	—	pF	$V_{GE} = 0\text{V}$ $V_{CC} = 30\text{V}$ See Fig. 7 $f = 1.0\text{MHz}$
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	120	—		
$C_{res}$	Reverse Transfer Capacitance	—	18	—		
$t_{rr}$	Diode Reverse Recovery Time	—	63	95		
$I_{rr}$	Diode Peak Reverse Recovery Current	—	4.5	8.0	A	$T_J = 25^\circ\text{C}$ See Fig. 15 $T_J = 125^\circ\text{C}$ 15
$Q_{rr}$	Diode Reverse Recovery Charge	—	140	380		
$di_{(rec)}/dt$	Diode Peak Rate of Fall of Recovery During $t_b$	—	133	—	A/ $\mu\text{s}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$ See Fig. 17 $T_J = 125^\circ\text{C}$ 17
		—	85	—		

### 3.2.2.6 การออกแบบชุดวงจรควบคุมการขับสวิตช์ IGBT

ในงานวิจัยแบ่งการทำงานสวิตช์ IGBT ออกเป็น 2 ชุด โดยสวิตช์ IGBT ของแต่ละชุดจะต้องสลับกันทำงานดังนี้ สวิตช์ IGBT ชุดที่หนึ่งจะปิดวงจรเพื่อทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน  $C_j$  จนได้ระดับแรงดันที่ต้องการแล้วจึงทำการเปิดวงจร หลังจากนั้นสวิตช์ IGBT ชุดที่สองจะปิดวงจรเพื่อทำการดิสชาร์จแรงดันจากตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน  $C_j$  จนหมดแล้วจึงจะทำการเปิดวงจร ดังนั้นชุดวงจรขับสวิตช์ IGBT จะต้องควบคุมการขับสวิตช์ IGBT ทั้ง 2 ชุดนี้ได้ โดยสวิตช์ IGBT ชุดที่หนึ่งประกอบด้วยสวิตช์ IGBT จำนวน 1 ตัว และสวิตช์ IGBT ชุดที่สองประกอบด้วยสวิตช์ IGBT จำนวน 3 ตัวต่ออนุกรมกัน นั่นคือชุดวงจรควบคุมการขับสวิตช์ IGBT จะต้องขับสวิตช์ IGBT ชุดที่หนึ่งจำนวน 1 ตัว และสวิตช์ IGBT ชุดที่สองจำนวน 3 ตัว ให้สลับกันทำงานในแต่ละชุด โดยส่วนประกอบของชุดวงจรควบคุมการขับสวิตช์ IGBT ดังรูปที่ 3.29

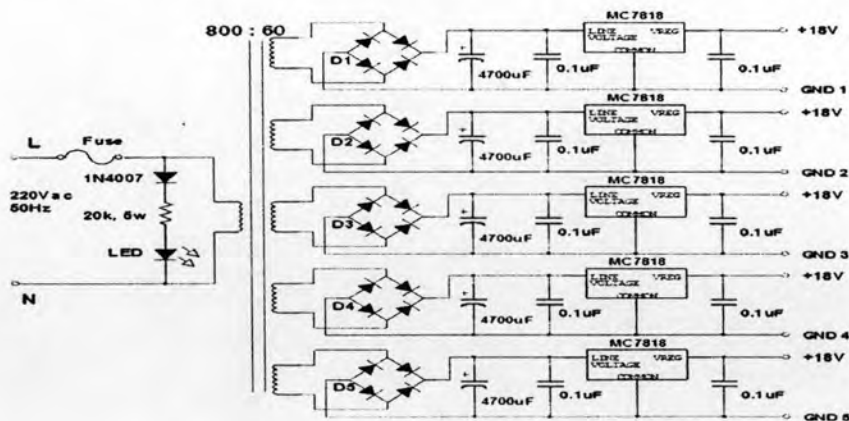




รูปที่ 3.29 บล็อกไดอะแกรมของชุดวงจรถวลคุมการขับสวิตช์ IGBT

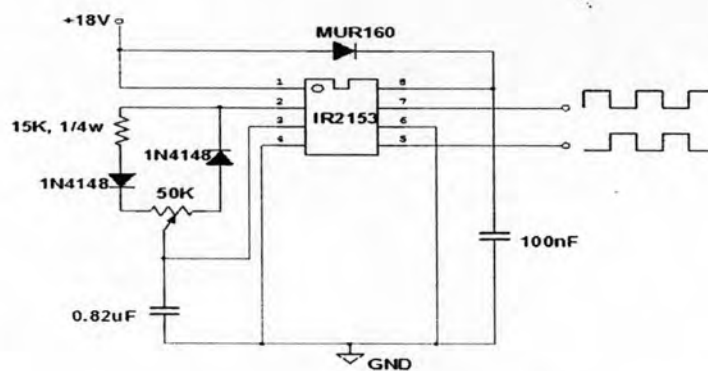
จากบล็อกไดอะแกรมของวงจรถวลคุมการขับสวิตช์ IGBT สามารถแบ่งภาคการทำงานหลักๆ อยู่ 3 ส่วน คือ

1. วงจรเรกกูเรเตอร์ (Regulator Circuit) เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรถวลคุมทั้งหมด โดยประกอบด้วยหม้อแปลงกำลัง ซึ่งออกแบบให้หม้อแปลงกำลังมีจำนวนรอบการพันขดลวดทางด้านปฐมภูมิ 800 รอบ จำนวน 1 ขด และมีจำนวนรอบการพันขดลวดทางด้านทุติยภูมิ 60 รอบ จำนวน 5 ขด และเมื่อป้อนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V, 50 Hz ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลัง จะได้ระดับแรงดันในแต่ละขดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังมีค่าเท่ากับ 16.5 V, 50 Hz จากนั้นนำแรงดัน 16.5 V ผ่านวงจรถวลคุมเรกกูเรเตอร์เพื่อแปลงเป็นแรงดันกระแสตรงมีค่าเท่ากับ  $16.5\sqrt{2}$  V เพื่อควบคุมระดับแรงดันกระแสตรงให้มีค่าเท่ากับ 18 V จึงใช้ไอซีเรกกูเรเตอร์ เบอร์ MC7818 เป็นตัวรักษาระดับแรงดันให้คงที่ ดังรูปที่ 3.30



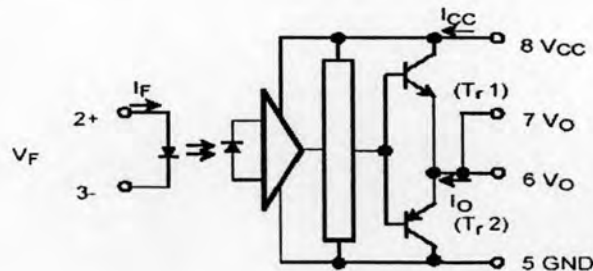
รูปที่ 3.30 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรถวลคุม

2. วงจรควบคุม (Control Circuit) เลือกใช้ไอซีเบอร์ IR2153 ในการกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM) เพราะสามารถกำหนดค่าความถี่ในการออกซัลเลตได้ และมีสัญญาณพัลส์ด้านออกในแบบ High และ Low ดังนั้นเมื่อต่อชุดวงจรควบคุมการขับสวิตช์ IGBT ชุดที่หนึ่งทางด้าน High และต่อชุดวงจรควบคุมการขับสวิตช์ IGBT ชุดที่สองทางด้าน Low จะทำให้สวิตช์ IGBT ของแต่ละชุดสลับกันทำงานได้ ดังรูปที่ 3.31

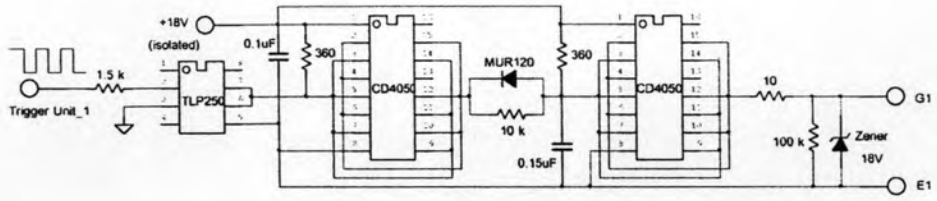


รูปที่ 3.31 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์

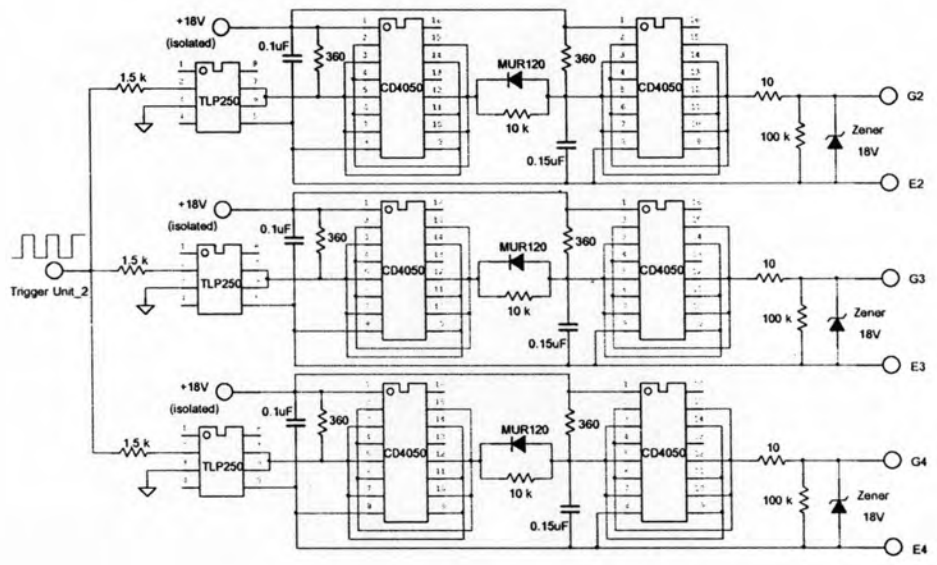
3. วงจรขับ (Drive Circuit) ในส่วนของวงจรขับจะประกอบด้วยวงจรเชื่อมโยงทางแสง (Optocoupler) เลือกใช้ไอซีเบอร์ TLP250 ซึ่งมีวงจรภายในดังรูปที่ 3.32 โดยสัญญาณพัลส์ที่ได้จากวงจรควบคุมจะนำมาต่อเข้ากับวงจรเชื่อมโยงทางแสง เพื่อแยกกราวนด์ของวงจรควบคุมกับวงจรกำลังออกจากกัน จากนั้นสัญญาณพัลส์ที่ออกจากวงจรเชื่อมโยงทางแสงจะต่อผ่านวงจรบัฟเฟอร์ เพื่อเพิ่มกระแสในการขับสวิตช์ IGBT ทำให้การเปลี่ยนสถานะสวิตช์ได้เร็วขึ้น ดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.32 วงจรภายในไอซีเบอร์ TLP250

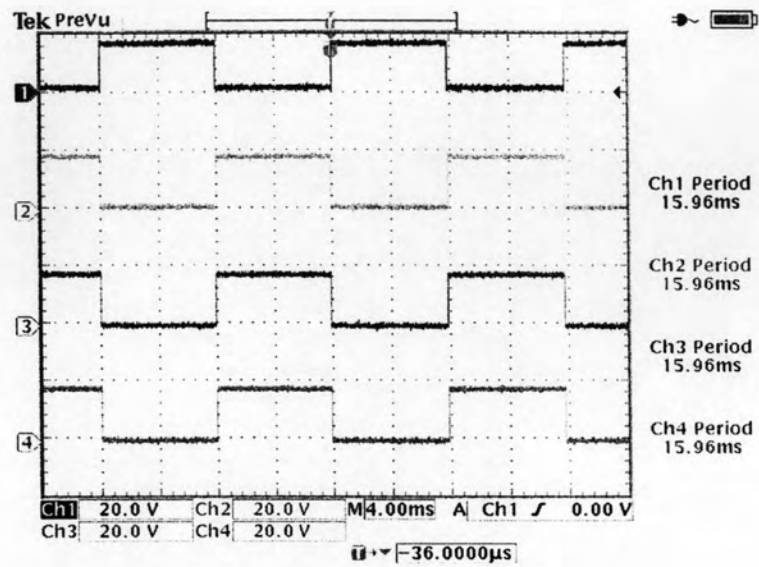


(ก) ชุดวงจรขับสวิตช์ IGBT เบอร์ IXEL40N400



(ข) ชุดวงจรขับสวิตช์ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD

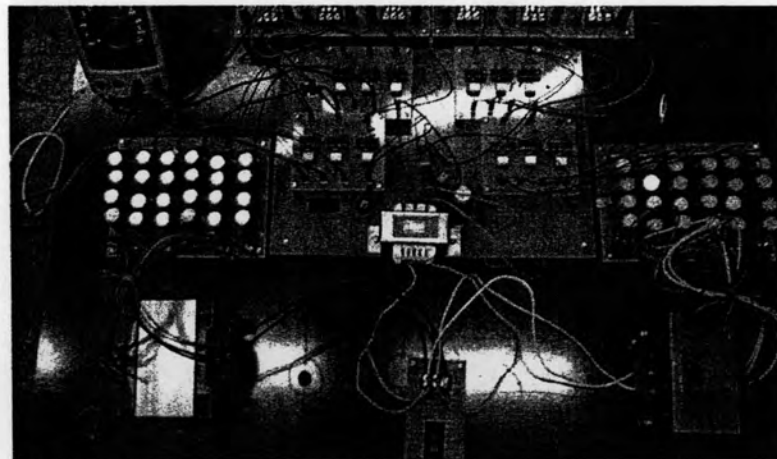
รูปที่ 3.33 ชุดวงจรขับสวิตช์ IGBT



Ch1: สัญญาณพัลส์ขับสวิตช์ IGBT เบอร์ IXEL40N400

Ch2, Ch3, Ch4: สัญญาณพัลส์ขับสวิตช์ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD

รูปที่ 3.34 สัญญาณพัลส์ขับสวิตช์ IGBT



รูปที่ 3.35 ชุดวงจรควบคุมการขับสวิตช์ IGBT