บทที่ 4

การออกแบบ และ ทำอินเวอร์เตอร์

4.1 คำนำ

ในวิทยานิพนธ์นี้ เรามีความมุ่งหมายที่จะศึกษาแนวทางการใช้ไทรีสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการทำอินเวอร์เตอร์โดยจะทำอินเวอร์เตอร์คลาส C ตามวงจรแบบ แมคเมอร์เรย์-เบดฟอร์ด และใช้ตัวกรองแบบของออตสำหรับกรองรูปคลื่นสี่เหลี่ยมให้เป็นรูปคลื่นไซน์

อินเวอร์เตอร์ที่ทำมีข้อกำหนดดังนี้ คือ

กำลังปรากฏ	=	1.0	เควีเอ
แรงดันออก	=	220	โวลต์
ความถี่	=	50	แฮร์ตซ์
ตัวประกอบกำลัง	=	80 %	ล้าหลัง
แรงดันแหล่งจ่ายไฟ	=	72	โวลต์

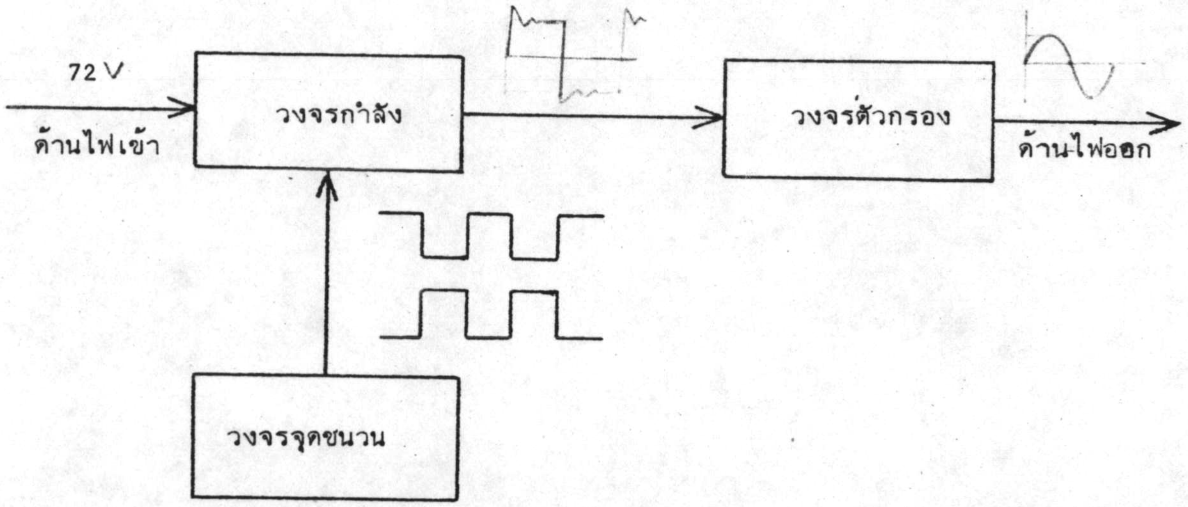
อินเวอร์เตอร์ที่จะได้อาจแบ่งออกเป็นส่วนสำคัญๆ 3 ส่วน คือ

ก. วงจรกำลัง

ข. วงจรจุดชนวน

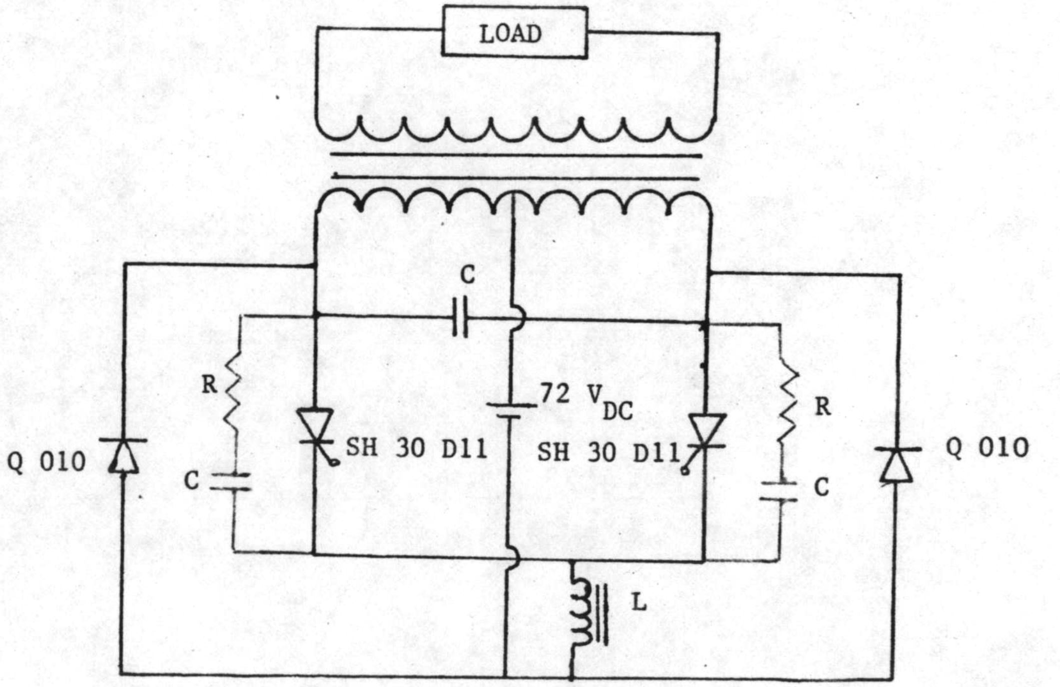
ค. วงจรตัวกรอง

ซึ่งเขียนเป็นบล๊อกไดอะแกรมได้ตามรูปที่ 4.1 และมีวิธีการออกแบบและสร้างตามหัวข้อ 4.2 - 4.4



รูปที่ 4.1 บล๊อกไดอะแกรมวงจรอินเวอร์เตอร์

4.2 การออกแบบวงจรกำลัง



รูปที่ 4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์

I16426915

การออกแบบวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ [1, 2] ตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1 ทำเป็นขั้นๆ ดังนี้คือ

4.2.1 กำลังไฟฟ้าเข้า (สมมุติประสิทธิภาพ 80 %)

$$P_{IN} = 1000 \times \frac{100}{80} = 1250 \quad \text{วัตต์}$$

4.2.2 กระแสเฉลี่ยของไทรีสเตอร์

$$I_{AV} = \frac{1250}{2 \times 72} = 8.7 \quad \text{แอมแปร์}$$

4.2.3 แรงดันเดินหน้าสูงสุด

$$V_{PK} = 2.5 \times 72 = 180 \quad \text{โวลต์}$$

4.2.4 ค่าคอมมิวเตติง L และ C

ให้ t_c = เวลาที่ทำให้ไทรีสเตอร์หยุดนำกระแส

= 30 μS (ไทรีสเตอร์มี $t_c \approx 15$ μS)

I_{PK} = 40 A (ต้องมากกว่า 2 เท่า I_{av})

$$L = \frac{30 \times 10^{-6} \times 72}{0.425 \times 40} = 127 \quad \mu H$$

$$C = \frac{30 \times 40}{1.7 \times 72} = 9.8 \quad \mu F$$

(จากภาคผนวก ข)

$$L = 119 \quad \mu H$$

สำหรับ C นั้นเราจะต้องปรับค่าของมันระหว่างทำการทดลอง เพื่อมิให้ค่าสูงสุดของไทรีสเตอร์เกินพิกัด และเพื่อให้มีขนาดโตพอที่จะทำให้ไทรีสเตอร์หยุดนำกระแสกับ เพื่อให้อินเวอร์เตอร์

มีประสิทธิภาพสูง

4.2.5 หาค่า dv/dt และ di/dt

$$\frac{dv}{dt} = \frac{3.44 \times 72 \times 72}{119 \times 40} = 3.75 \quad V/\ \mu S$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{2 \times 72}{119} = 1.21 \quad A/\ \mu S$$

4.2.6 จากค่าที่คำนวณได้ เลือกใช้ไทรีสเตอร์ของ Toshiba Model SH30D11 และไดโอดป้อนกลับของ Hitachi Model Q010 (ดูคุณสมบัติจากภาคผนวก จ)

4.2.7 หม้อแปลงไฟฟ้า

จากข้อกำหนดต้องการแรงดันออก 220 VAC แรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่เข้าตัวกรอง ต้องมีค่ายอด 365 โวลต์ (ภาคผนวก ง) เพื่อให้สามารถปรับแรงดันได้ ทางขดทุติยภูมิจึงทำให้มีจุดแยกของแรงดันที่ 260, 360, 380 และ 400 โวลต์

กระแสเฉลี่ยที่โหลดเต็มที่

ทางขดปฐมภูมิ	=	17.4	แอมแปร์
ทางขดทุติยภูมิ	=	4.7	แอมแปร์

จากค่าที่ได้ออกแบบและทำหม้อแปลงตามภาคผนวก ก

4.2.8 วงจรสนับเบอร์ (Snubber Circuit)

เพื่อควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันและค่าแรงดันสูงสุดคร่อมไทรีสเตอร์ จึงจำเป็นต้องมีวงจรสนับเบอร์ต่อคร่อมไทรีสเตอร์ วงจรนี้เป็นแบบ R – C และคำนวณได้ดังนี้ (2)

เลือก $e = 0.65$ เพื่อให้โอเวอร์ชูตประมาณ 22 %

$E_S = 72 \times 2.5 = 180$ โวลต์

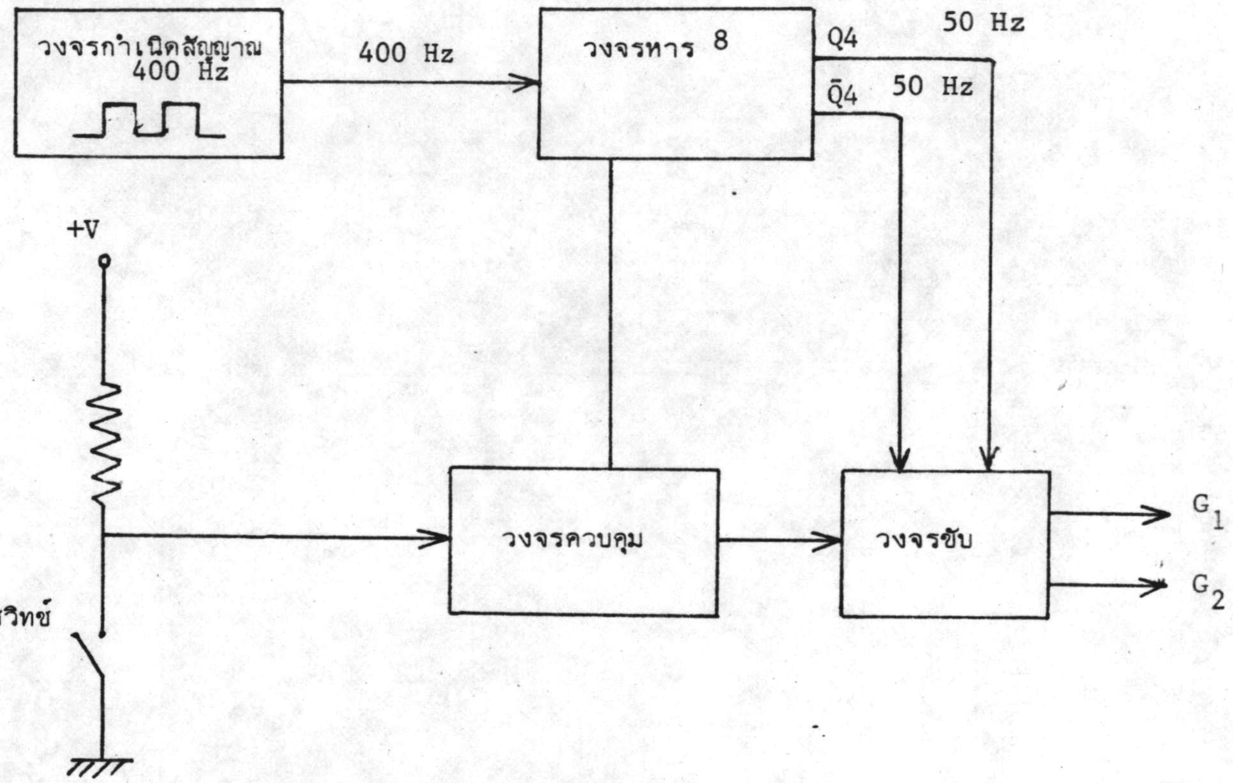
$I_{PK} = 40$ แอมแปร์

$$R = 0.63 \times \frac{125}{40} = 2 \quad \text{โอห์ม}$$

$$C = \frac{2}{2} = 1 \quad \mu F$$

4.3 การออกแบบวงจรจุดชนวน

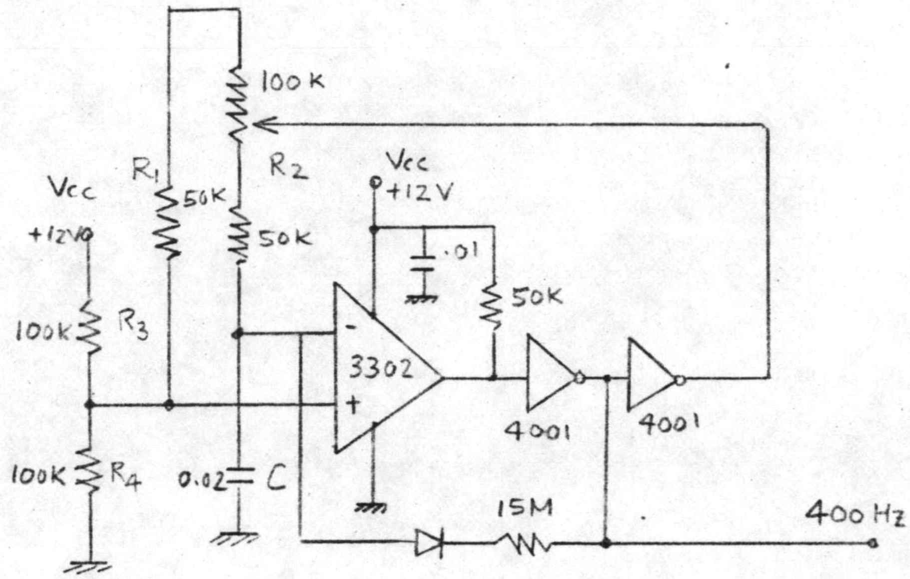
วงจรสำหรับจุดชนวนไทรีสเตอร์สำหรับอินเวอร์เตอร์นี้ มีบล๊อกไดอะแกรม ตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 บล๊อกไดอะแกรมวงจรจุดชนวน

4.3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม 400 Hz

วงจรนี้เป็นไปตามรูปที่ 4.4 ประกอบด้วย IC No LM3302 ซึ่งเป็นตัวเปรียบเทียบแรงดัน และ IC No 4001 2 ตัว ซึ่งทำหน้าที่กลับเฟสของสัญญาณ



รูปที่ 4.4 วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 4.4 และภาคผนวก จ เราคำนวน คาบเวลา T ได้เป็น

$$T = 2R_2C \ln \left(\frac{R_1 + R_3}{R_1} \right)$$

$$f = \frac{1}{T}$$

ในที่นี้เราเลือกใช้

$$R_3 = R_4 = 100 \ k\Omega$$

$$C = 0.02 \ \mu F$$

$$R_2 = 100 \ k\Omega \quad , \quad R_1 = 115 \ k\Omega$$

เนื่องจากอุปกรณ์อาจมีความคาดเคลื่อนในตัวได้ ให้ต่อ R_2 และ R_1 แบบปรับค่าได้โดยใช้ความต้านทาน 50 kΩ 2 ตัวต่อกับ VR 100 kΩ

ดังนั้นเมื่อหมุน VR อยู่ในตำแหน่งสูงสุดด้านบนจะได้

$$R_1 = 50 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 150 \text{ k}\Omega$$

$$f = 979 \text{ Hz}$$

เมื่อหมุน VR อยู่ตำแหน่งสุดด้านล่างจะได้

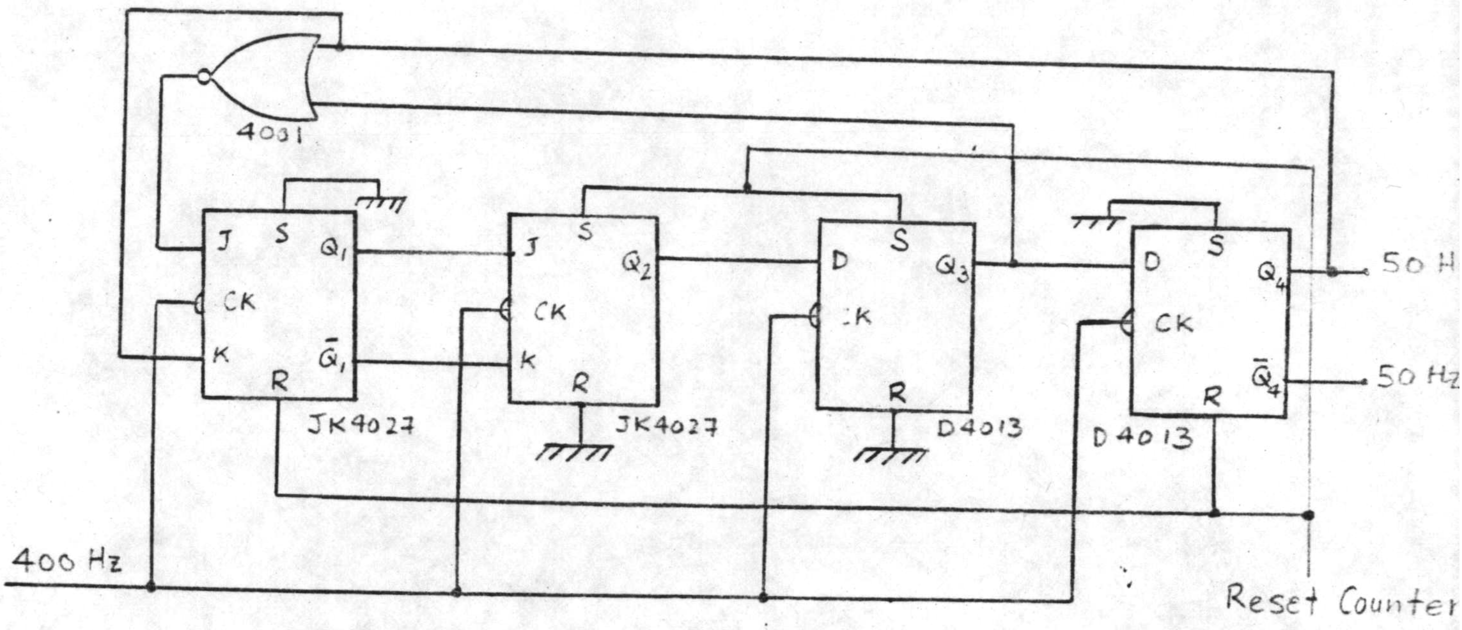
$$R_1 = 150 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 50 \text{ k}\Omega$$

$$f = 151.7 \text{ Hz}$$

โดยการปรับค่า VR ให้เหมาะสม ก็จะได้ f = 400 Hz

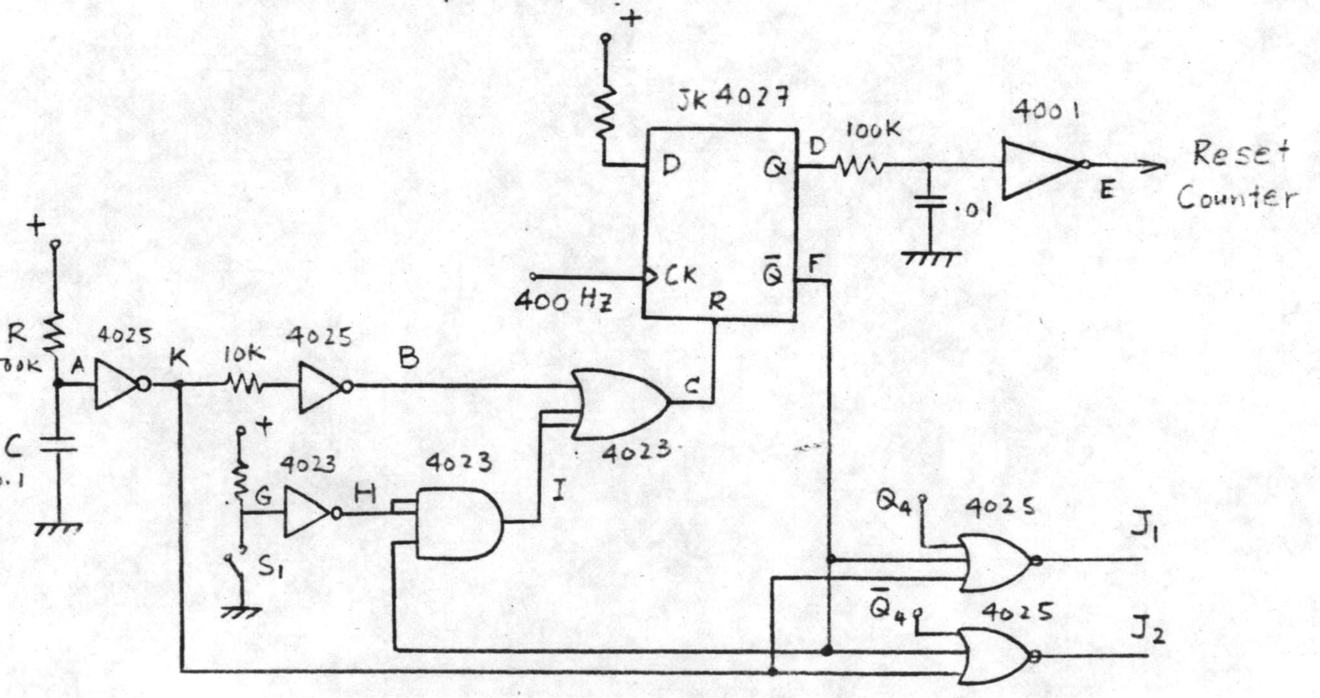
4.3.2 วงจรนับหาร 8

วงจรนี้ประกอบด้วย ฟลิป-ฟลอป ชนิด J-K (IC No JK4027) และชนิด D (IC No D4013) ออกแบบให้เป็นวงจรนับแบบซิงโครนัส (Synchronous) โดยขา Clock ของแต่ละตัวต่อร่วมกันเข้ากับความถี่ป้อนเข้า 400 Hz แล้วต่อขา R (Reset) และ S (set) ของฟลิป-ฟลอป แต่ละตัวเข้ากับสัญญาณ Reset Counter จะได้สัญญาณออกสลับกัน Q_4 และ $\bar{Q}_4$ ความถี่ 50 Hz ดูรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 วงจรนับหาร 8

4.3.3 วงจรควบคุมการทำงานของวงจรนับหาร 8 และวงจรขับ

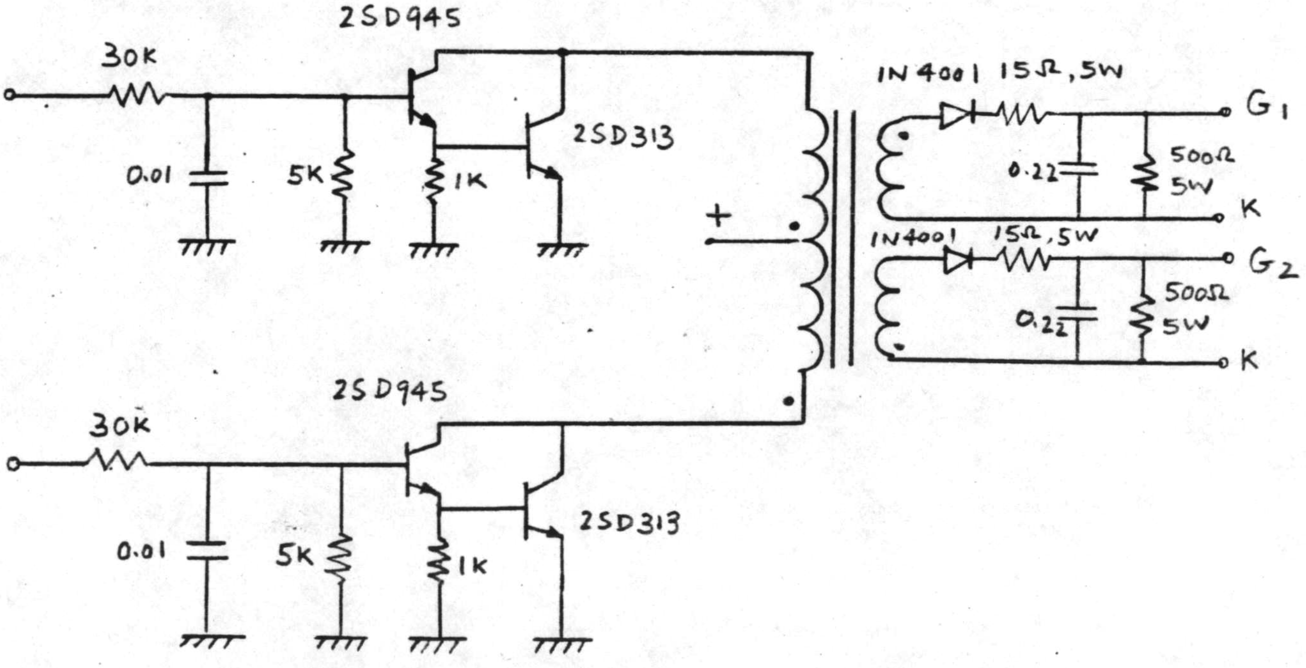


รูปที่ 4.6 วงจรควบคุมการทำงานของวงจรนับหาร 8 และวงจรขับ

จากรูปที่ 4.6 การทำงานของวงจรเป็นดังนี้ คือ ปรกติสวิทช์จะอยู่ในสภาวะปิด จุด G มีสถานะ 0 เมื่อเริ่มให้ไฟเลี้ยงแก่เครื่องจุด A จะเป็น 0 เพราะตัวเก็บประจุยังไม่มีประจุ แต่กำลังถูกอัดประจุผ่าน R อยู่ จุด K เป็น 1 ทำให้ J_1 และ J_2 เป็น 0 วงจรขับไทรีสเตอร์จึงไม่ทำงาน จุด B จะเป็น 0 ทำให้ C เป็น 1 ฟลิป-ฟลอปจะถูก Reset จุด D จะมีสถานะเป็น 0 และ F มีสถานะเป็น 1 จุด E ก็จะเป็น 1 ด้วย ทำให้วงจรนับหาร 8 ไม่ทำงาน (เพราะ Reset counter เป็น 1) เนื่องจาก F = 1 , H = 1 จะได้ I = 0 เมื่อเวลาผ่านไปช่วงเวลาหนึ่งตัวเก็บประจุจะถูกอัดประจุเต็ม A = 1 จะได้ B = 1 แต่ I ยังเป็น 0 ทำให้ F = 1 วงจรขับไทรีสเตอร์ก็ยังคงไม่ทำงาน

เมื่อกดสวิทช์ S_1 จุด G = 1 จุด H = 0 จะได้ I = 1 ในขณะที่ B = 1 จุด C ก็จะเป็น 0 ฟลิป-ฟลอป ก็จะไม่ถูก Reset เมื่อสัญญาณ Clock 400 Hz เข้ามา D = 1 F = 0 และ E = 0 วงจรนับหาร 8 จะเริ่มทำงาน ขณะที่ F = 0 สัญญาณจาก Q_4 และ $\bar{Q}_4$ ของวงจรนับหาร 8 ก็จะผ่านไปควบคุมวงจรขับไทรีสเตอร์ได้ เนื่องจาก F = 0 ทำให้ I = 1 ดังนั้น แม้จะกดสวิทช์ไปอย่างไร I ก็จะมีสถานะเป็น 1 อยู่ วงจรทำงานตลอด นอกจากจะเอาไฟเลี้ยงออกเท่านั้น

4.3.4 วงจรขับไทรีสเตอร์

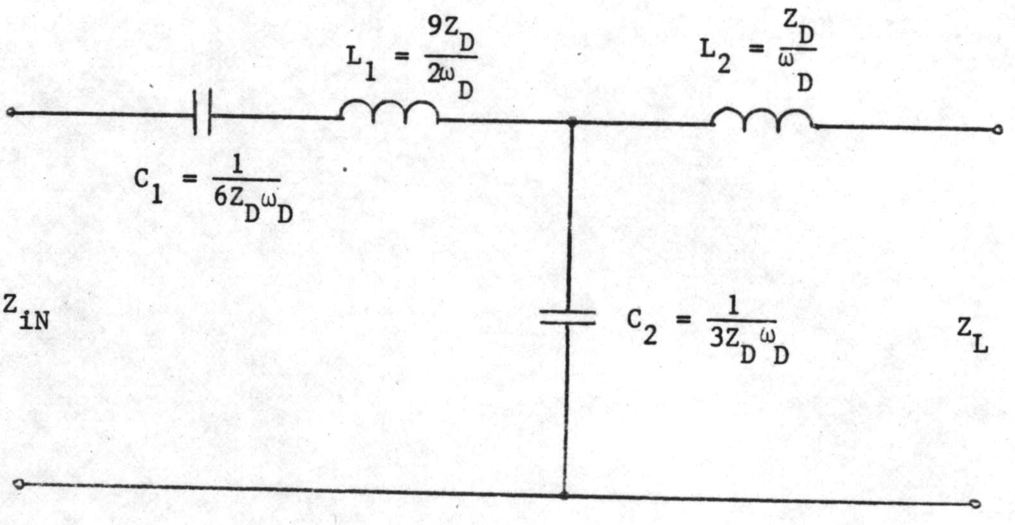


รูปที่ 4.7 วงจรขับไทรีสเตอร์

จากรูปที่ 4.7 ในขณะที่ J_1 และ J_2 เป็น 0 ทรานซิสเตอร์ทั้งหมดไม่ทำงาน แต่เมื่อขณะทำงาน J_1 และ J_2 จะมีสถานะตรงกันข้ามเสมอตาม Q_4 และ $\bar{Q}_4$ ของวงจรนับหาร 8 ในขณะที่ขาหนึ่งมีสถานะเป็น 1 วงจรส่วนนั้นจะทำงาน และกระแสจะไหลเข้าเบสของทรานซิสเตอร์ 2 ตัว คือ 2SD945 และ 2SD313 ซึ่งต่อแบบดาร์ลิงตัน (Darlington) เพื่อให้ดึงกระแสเข้าทางคอลเลกเตอร์ได้สูง กระแสนี้จะไหลผ่านขดลวดของหม้อแปลงแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันทางด้านขดทุติยภูมิซึ่งมีไดโอดต่อกันไว้ให้มีกระแสไหลผ่านได้เพียงขดเดียว แรงดันนี้จะจุดชนวนไทรีสเตอร์ตัวหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ให้นำกระแสในสภาวะต่อไปวงจรอีกข้างหนึ่งจะทำงาน แล้วจะจุดชนวนไทรีสเตอร์อีกตัวหนึ่งสลับกันไป

4.4 การออกแบบวงจรตัวกรอง [4]

วงจรตัวกรองใช้ตามรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 วงจรตัวกรอง

การออกแบบวงจรตัวกรองทำเป็นขั้นๆ ดังนี้ คือ

4.4.1 ความต้านทานของโหลด

$$R_L = \frac{220^2 \times 0.8}{1000} = 38.7 \quad \text{โอห์ม}$$

4.4.2 ความเหนี่ยวนำของโหลด

$$X_L = \frac{38.7}{0.8}\sqrt{1 - 0.8^2} = 29.0 \quad \text{โอห์ม}$$

4.4.3 อิมพีแดนซ์ของโหลด

$$Z_L = \sqrt{38.7^2 + 29.0^2} = 48.4 \quad \text{โอห์ม}$$

$$\angle Z_L = \cos^{-1} 0.8 = 36.8^{\circ}$$

4.4.4 อิมพีแดนซ์ของตัวกรอง

$$Z_D \leq \frac{Z_L}{2} \leq 24.2 \quad \text{โอห์ม}$$

เลือก $Z_D = 20$ โอห์ม

4.4.5 ความเร็วเชิงมุม

$$\omega_D = 2\pi \times 50 = 314 \quad \text{เรเดียน}$$

4.4.6 ค่าของส่วนประกอบตัวกรอง

$$C_1 = \frac{1}{60 \times 20 \times 314} = 26.5 \quad \mu F$$

$$C_2 = \frac{1}{3 \times 20 \times 314} = 53.1 \quad \mu F$$

$$L_1 = \frac{9 \times 20}{2 \times 314} = 286.6 \quad \mu H$$

$$L_2 = \frac{20}{314} = 63.7 \quad \mu H$$

4.4.7 อินพุตอิมพีแดนซ์ของตัวกรอง

$$Z_{IN} = 86.6 - j65.4 \quad \text{โอห์ม}$$

$$Z_{IN} = 108.5 \quad \text{โอห์ม}$$

4.4.8 การทำวงจรตัวกรอง

การที่จะทำและต่อวงจรตัวกรองตามค่าความจุ และความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้นั้น เราจะต้องทราบค่าแรงดันที่ตกคร่อม และกระแสที่ไหลผ่านแต่ละส่วนของวงจร (โปรดดูภาคผนวก ง) และจากแรงดันและกระแสที่ได้เราสรุปว่า

C_1 ต้องสามารถทนแรงดันได้ = 800 โวลต์

L_1 ต้องสามารถทนแรงดันได้ = 450 โวลต์

C_2 ต้องสามารถทนแรงดันได้ = 500 โวลต์

C_1 ต้องสามารถทนแรงดันได้ = 110 โวลต์

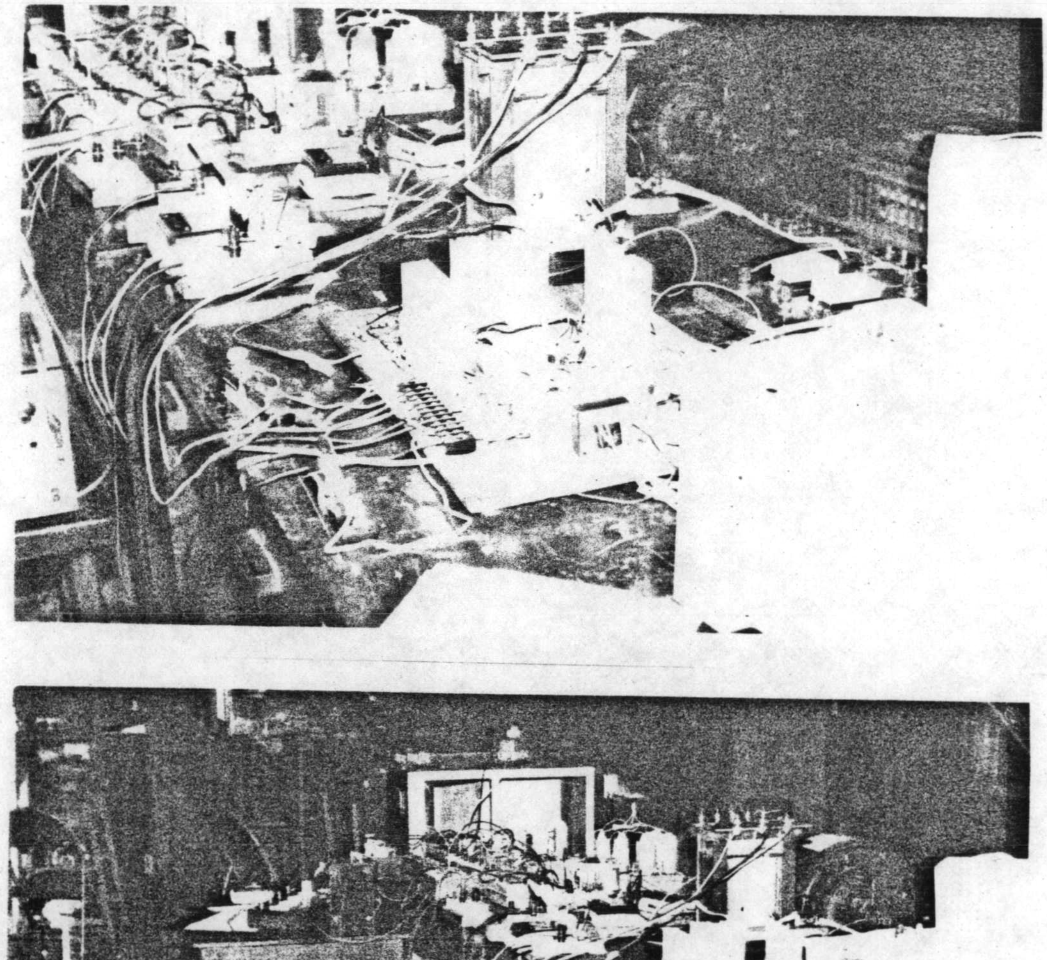
L_1 (โปรดดูภาคผนวก ข) ทำแล้วทดสอบหาความเหนี่ยวนำได้ 303 mH ตัวความเหนี่ยวนำนี้ถือเป็นชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนอื่นๆ ต้องเปลี่ยนค่าไปเพื่อให้ได้ตัวกรองที่เหมาะสม คำนวณใหม่ได้

Z_D = 21.14 โอห์ม $\quad C_1$ = 26 F

L_2 = 60 μH $\quad C_2$ = 53 F

4.5 รูปเครื่องอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ทำขึ้นประกอบได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 รูปเครื่องอินเวอร์เตอร์