บทที่ 2

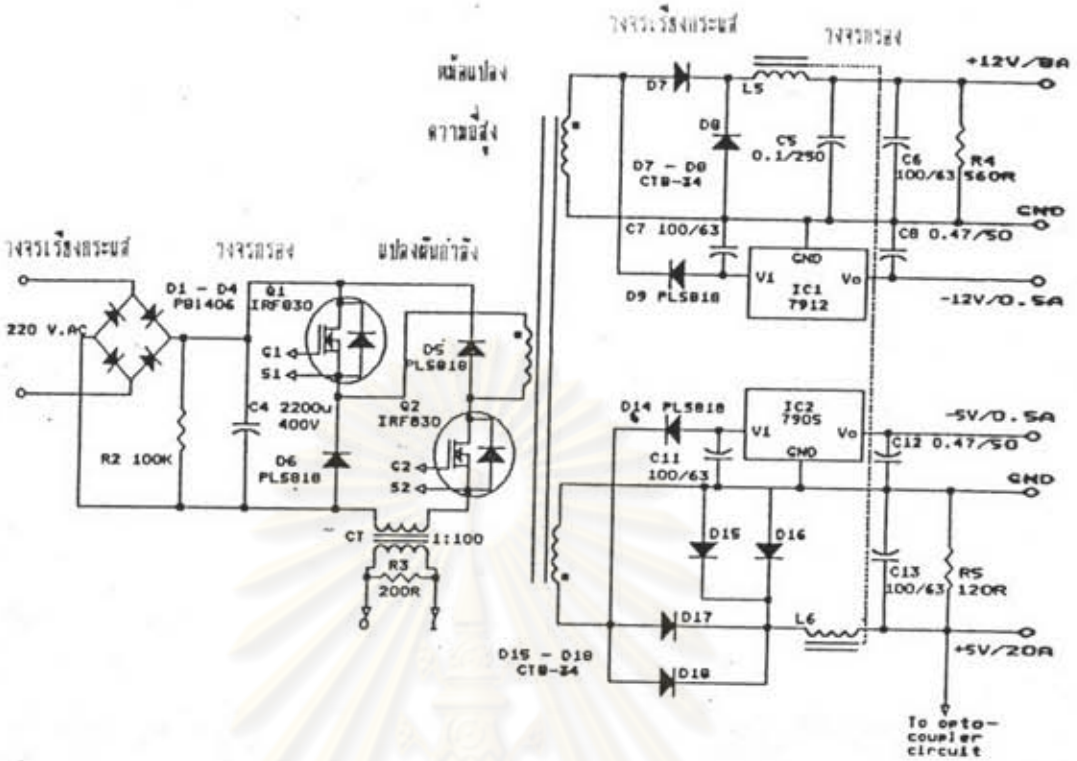
ภาควงจรกำลังที่ใช้สวิตช์ปกติ

บทที่ 2, 3 และ 4 เป็นการออกแบบและทดสอบแหล่งจ่ายไฟตรงที่ใช้สวิตช์ปกติ ซึ่งมีข้อแตกต่างจากแหล่งจ่ายไฟตรงที่มีใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทยคือ ใช้โครงสร้างวงจรกำลังแบบบริดจ์อสมมาตร เพื่อลดปัญหาการลัดวงจรผ่านสวิตช์และการใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์ซึ่งสามารถทำให้เพิ่มความถี่การสวิตช์จากประมาณ 20 - 50 kHz เมื่อใช้ไบโพล่าร์ทรานซิสเตอร์มาเป็น 50 - 120 kHz

2.1 โครงสร้างของภาควงจรกำลัง

วงจรในภาคนี้ จะประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแส และวงจรกรองด้านเข้า วงจรแปลงผันกำลัง หม้อแปลงความถี่สูง วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองด้านออกดังแสดงในรูปที่ 2.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 วงจรภาคกำลังที่ใช้สวิตช์ปกติ

2.2 ข้อกำหนดในการออกแบบ

วงจรกำลังจะต้องสามารถจ่ายกำลังให้แก่โหลดที่เป็นไมโครคอมพิวเตอร์ โดยมีข้อกำหนดดังนี้

2.2.1 สามารถจ่ายโหลด + 5 V/20 A , + 12 V/8 A , -5 V/0.5 A , -12 V/ 0.5 A นั่นคือกำลังออกมีค่า (5x20)+(12 Vx8)+(5x0.5)+(12x0.5) $\tilde{}$ 205 W

2.2.2 การลดค่าแรงดันด้านเข้า 5% (แรงดันขาเข้าเปลี่ยนแปลง 10%)

2.2.3 การลดค่าแรงดันด้านออก + 5 V / 5% , +12 V / 5%, -5 V / 10%, -12 V/10% (โหลดเปลี่ยน 10 - 90%)

2.2.4 แรงดันด้านเข้า 220 V $\pm$ 10 %

2.2.5 ประสิทธิภาพ 80 %

2.3 ข้อกำหนดด้านพิกัดการสูญเสีย

2.3.1 ไดโอดชอตต์กี มีค่าการสูญเสียประมาณ (20A x 0.72V)+(8A x 0.72V)
= 20.1 W

2.3.2 ลวดหม้อแปลง 3 W

2.3.3 แกนหม้อแปลง 2.5 W

2.3.4 สวิตช์มอสเฟต 10 W

2.3.5 ขดลวดตัวเหนี่ยวนำด้านออก (choke output) 3 W

2.3.6 วงจรกรองสัญญาณรบกวน และวงจรเรียงกระแสด้านเข้า 3 W

2.3.7 วงจรควบคุม 12V x 200 mA 2.4 W

รวมกำลังสูญเสียที่คาด = 44.0 W

$$\text{ประสิทธิภาพที่คาดล่วงหน้า} = \frac{205 \times 100}{205 + 44.06} = 82\ \%$$

ถ้าประมาณประสิทธิภาพไว้ที่ 80% จะได้พิกัดกำลังขาเข้ามีค่า

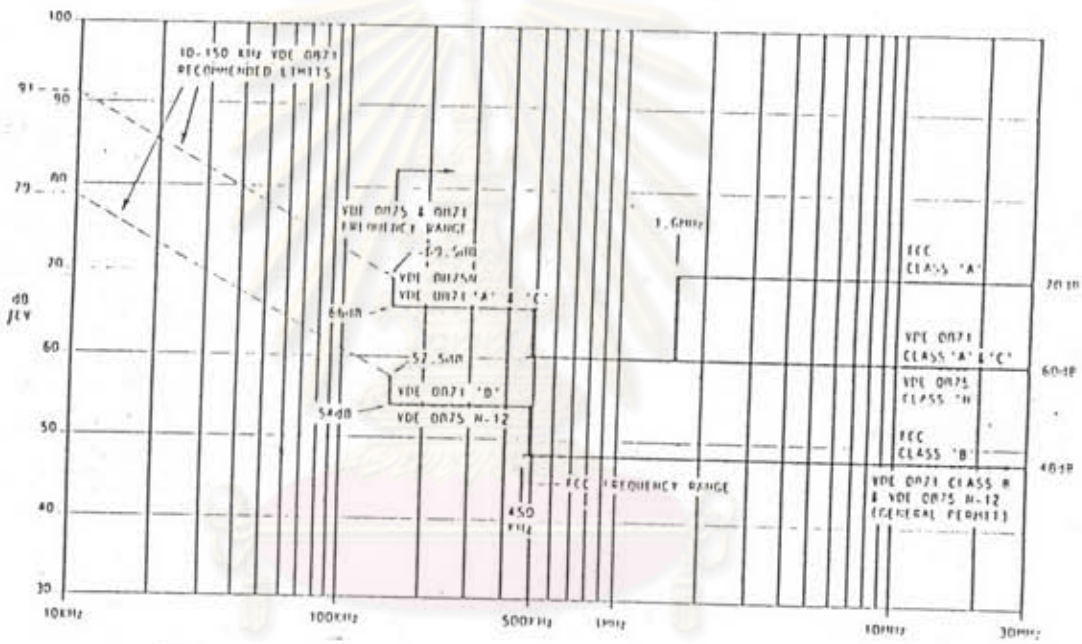
$$P_i = P_o/n = 205/0.8 \simeq 256\ W$$

2.4 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวน [5]

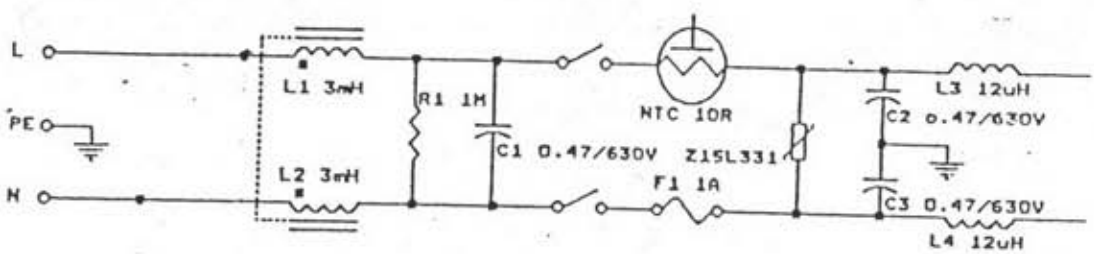
ปกติแล้วแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง จะกำหนดสัญญาณรบกวนในย่านความถี่กว้าง ยิ่งในการออกแบบให้สวิตช์ทำงานเร็ว ปัญหาเหล่านี้ก็จะเพิ่มขึ้น การออกแบบวงจรกรองต้องคำนึงถึง

มาตรฐานในตลาดของผู้ใช้ เช่น ตลาดโดยทั่วไปมาตรฐานที่ใช้คือ IEC BS 800 หรือ CISPR, ในเยอรมันคือ VDE 0871 หรือ 0875 ขึ้นอยู่กับย่านความถี่ ในอเมริกาจะมีมาตรฐาน FCC ซึ่งคล้ายกับของแคนาดา คือ CSA, C108.8-M1983

กรณีทั่วไปสำหรับบ้านอยู่อาศัย สำนักงาน และโรงงาน จะต้องควบคุมให้สัญญาณรบกวนในย่านความถี่ 10 kHz ถึง 30 MHz มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โมดน่ากระแส RFI ตามพิกัดควบคุมของ FCC PART 15 VDE 0871 และ 0875



รูปที่ 2.3 วงจรกรองสัญญาณรบกวน

018477

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถออกแบบได้ดังนี้

2.4.1 เลือกค่า L_1 , L_2 ประมาณ 3mH เพื่อให้ได้ค่า EMI limits สำหรับแหล่งจ่าย 220 V 200 W จากการกำหนดล่วงหน้าค่าสูญเสียไม่เกิน 1 W และค่าพิกัดอุณหภูมิเพิ่ม (temperature rise)ไม่เกิน 30 C เลือกแกน EE 25 ซึ่งมีค่า thermal resistance R_θ = 30 C / W กระแสเข้าเฉลี่ยมีค่าไม่เกิน 256 W/310 = 0.83 A กระแส I_{RMS} มีค่าประมาณไม่เกิน 2A จากหัวข้อ 2.7

ดังนั้นความต้านทานของลวดทองแดง R_{cu} ที่ให้กำลังสูญเสีย P_{cu} 1 W มีค่าเท่ากับ

$$R_{cu} = P_{cu} / (I_{RMS})^2$$
$$= 1/2^2$$
$$= 0.25 \text{ ohms}$$

จากตารางผู้ผลิต [5] copper resistance factor Ar ของ bobbin EE 25 มีค่า 32 micro - ohms จำนวนรอบที่พันบนแกนได้จากสูตร [5]

$$N = \sqrt{\frac{R_{cu}}{Ar}} = \sqrt{\frac{0.25}{32 \times 10^{-6}}}$$
$$= 88 \text{ รอบ}$$

แบ่งฟอร์มคอยล์เป็น 2 ส่วน พันข้างละ 40 รอบซึ่งน้อยกว่าที่ออกแบบไว้เล็กน้อย แกนที่ใช้เป็นแกนเฟอร์ไรต์เนื้อสาร N30 มี inductance factor A_L = 3100 nH การพัน 40 รอบจะให้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ

$$L = N^2 \times A_L = 40^2 \times 3100 \times 10^{-9} = 4.96 \text{ mH}$$

ซึ่งมากกว่าค่าที่ต้องการคือ 3 mH

ลวดที่เลือกใช้ต้องมีค่าความต้านทานไม่เกิน 0.25 ohms จากตารางผู้ผลิต [5] ความยาวเฉลี่ยต่อรอบมีค่า 52 mm. เส้นลวด 80 รอบมีความยาว 80 x 52 mm = 4.16 m

พื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงหาได้จากสูตรความต้านทาน

$$R = \rho \, l/A$$

เมื่อ R มีหน่วยเป็น ohms ; ความต้านทานจำเพาะ ρ มีค่า 1/58 (ohms - mm^2)/m พื้นที่หน้าตัด A มีหน่วย mm^2

แทนค่าลงในสูตรจะได้ A = 0.287 mm^2

จากตารางลวดตรงกับเบอร์ 23 SWG ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 0.317 mm^2 จากตารางผู้ผลิตพื้นที่ช่องหน้าต่างมีค่า 56 mm^2 สามารถพันลวดเบอร์ 23 SWG ได้ = 56 / 0.317 = 176 รอบ ซึ่งมากกว่าจำนวนรอบที่ต้องการ แสดงว่าลวดเบอร์ 23 SWG สามารถพันลงในพื้นที่ช่องหน้าต่างได้

2.4.2 C_2 , C_3 เลือกค่า 0.47 μF [5] ตาม VDE 0804 ยอมให้กระแสไหลลงดินไม่เกิน 3.5 mA

2.4.3 L_3 , L_4 เลือกค่า 12 μH และ C_1 เลือกค่า 0.47 μF เพื่อให้ลดสัญญาณรบกวนในดีฟเฟอเรนเชียลโมด (differential mode) ขนาดที่ใช้นี้เป็นขนาดที่ใช้ทั่วไปในตลาด อัตราการทอนสามารถคำนวณหาหรือใช้ LEC 5.0 หาได้ [6]

2.5 <u>ฟิวส์ของฟิวส์ F1</u> เลือกค่า 2 A ฟิวส์ที่เลือกนี้จะใช้ป้องกันไดโอด ความไวในการตัดวงจรไม่สามารถป้องกันสวิตช์สารกึ่งตัวนำได้ ถ้าใช้ค่าเล็กกว่านี้ ฟิวส์อาจขาดโดยที่วงจรไม่เสียได้

2.6 <u>ฟิวส์ของไดโอดของวงจรเรียงกระแสด้านเข้า</u> D_1 _ D_4 ใช้ PB 1406 (4A 800V) ฟิวส์นี้จะรับกระแส ในช่วง charge C4 ซึ่งมีกระแสสูงสุดไม่เกินแรงดันแหล่งจ่ายสูงสุดหารด้วยความต้านทานของตัวต้านทานที่มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิค่าลบ NTC (ดูรูปที่ 2.3) ซึ่งมีค่า 10 ohms ที่อุณหภูมิห้อง กระแสสูงสุดมีค่า 300 V/ 10 ohms = 30A ซึ่ง PB 1406 ทนกระแส 30 A นี้ได้ สำหรับกระแสใช้งาน (RMS) จะพิจารณาในหัวข้อต่อไป

2.7 พิกัดของสวิตช์มอสเฟต

สมมุติประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังเท่ากับ 80 % แรงดันไฟตรงด้านเข้ามีค่าต่ำสุดเท่ากับ 90 % ของค่าปกติหรือ V_{min} = 0.9 x 310 = 280 V เลือกวัฏจักรการทำงาน (duty ratio) D (ในกรณีที่แรงดันด้านเข้าต่ำสุด)ให้มีค่าเท่ากับ 0.4 สาเหตุที่เลือก D มีค่า 0.4 นั้นเป็นเพราะเงื่อนไขวงจรแบบบริดจ์อสมมาตรไม่สามารถมีวัฏจักรการทำงาน D ที่มีค่าเกิน 0.5 เพราะหม้อแปลงไม่สามารถคืนกระแสทำแม่เหล็กกลับแหล่งจ่ายได้ [3]

กระแสเดรนในสวิตช์มอสเฟตสูงสุด I_{dp} เมื่อกำลังด้านออก P_o = 200 W หาได้จาก

$$I_{dp} = P_o / n \times D \times V_{min}$$

$$= 2.3 \quad A$$

ค่า RMS ของกระแสเดรนเท่ากับ

$$I_{d,rms} = \sqrt{D}\, I_{dp} = 1.5 \text{ A} \qquad (2.1)$$

ค่าเฉลี่ยของกระแสเดรนเท่ากับ

$$I_{d,av} = D(I_{dp}) = 0.4\ (2.3) = 0.92 \text{ A} \qquad (2.2)$$

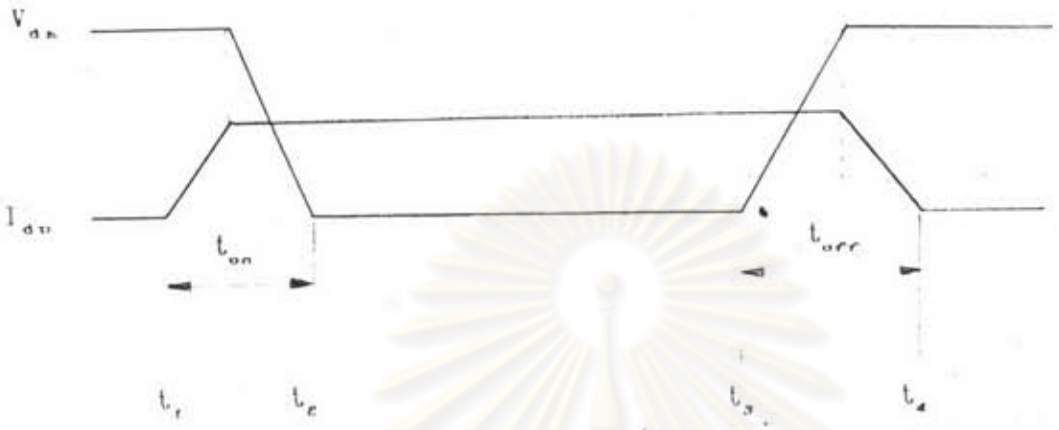
แรงดันตกคร่อมสวิตช์มอสเฟตมีค่าตามตารางที่ 1.1 คือเท่ากับแรงดันไฟตรงด้านเข้า

$$V_{ds\ max} = 310 \text{ V}$$

ในวงจรที่ใช้ ใช้มอสเฟตเบอร์ IRF 830 ($I_{d\ (cont.)}$ = 4.5 A , V_{dss} = 500 V)

2.8 การสูญเสียในสวิตช์และพิกัดของแผ่นระบายความร้อนของสวิตช์ [5]

ในการที่สวิตช์นำกระแสและหยุดนำกระแส ที่กระแส 2.3 A แรงดัน 310 V โดยประมาณรูปคลื่นเปลี่ยนสถานะในช่วงเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแสมีลักษณะตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนสถานะในช่วงเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแส

จากลักษณะสมบัติของมอสเฟตที่ใช้ เวลา t_{on} = 15 ns และ t_{off} = 45 ns

พลังงานสูญเสียในช่วงเริ่มนำกระแสมีค่า $\int_{t_1}^{t_2} v \times i \, dt$

$$\simeq [(V_{ds} \times I_{dv})/2] \times t_{on}$$

$$= [(310 \times 2.3)/2] \times 15 \times 10^{-9}$$

$$= 5.3 \times 10^{-6} \quad J$$

พลังงานสูญเสียในช่วงเริ่มหยุดนำกระแสมีค่า $\int_{t_3}^{t_4} v \times i \, dt$

$$\simeq (V_{ds} \times I_{dv} \times t_{off})/2$$

$$= (310 \times 2.3 \times 45 \times 10^{-9})/2$$

$$= 1.6 \times 10^{-5} \quad J$$

พลังงานสูญเสียรวมมีค่า W $= 1.6 \times 10^{-5} + 5.3 \times 10^{-6}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$= 2.13 \times 10^{-5}$ J

ที่ความถี่ f = 100 kHz การสูญเสียในสวิตช์

$$P_{switching} = (W)\, f = (2.13 \times 10^{-5}) \times 10^{5} \simeq 2.13 \text{ W} \quad (2.3)$$

ค่าสูญเสียในรูปนำกระแส

$$P_{cond} = (I_{d,\,rms})^2\, r_{ds(on)} \quad (2.4)$$

มอสเฟตที่ใช้มีค่า $r_{ds(on)}$ = 1.5 ohms ดังนั้น

P_{cond} = 3.375 W

ผลรวมของการสูญเสียในสวิตช์

$$= P_{switching} + P_{cond} \quad (2.5)$$

$$= 2.13 + 3.375$$

$$= 5.5 \text{ W}$$

การสูญเสียรวมของสวิตช์ทั้งสองมีค่า 5.5 x 2 = 11 W

แผ่นระบายความร้อนของสวิตช์จะต้องมีขนาด 5 ลูกบาศก์นิ้ว โดยมีการเพิ่มของอุณหภูมิ 50 C[5] ในทางปฏิบัติใช้ลมช่วยในการระบายความร้อนถ้าความเร็วลมประมาณ 250 ฟุต/นาทีขนาดแผ่นระบายความร้อนจะมีขนาด 1.2 ลูกบาศก์นิ้ว

2.9 <u>ไดโอดของวงจรเรียงกระแสด้านออก</u>

สำหรับด้านออก 12 V/8 A เลือกใช้ไดโอด D_7, D_8 เป็นไดโอดชอตคีย์ชนิดโมดูลสองตัวเบอร์ CTB - 34 ที่มีพิกัด 30 A, 45 V มีพิกัดแรงดันตกคร่อมช่วงนำกระแสที่กระแสสูงสุด 0.72 V ถ้าจ่ายกระแสเฉลี่ย 8A ผลการทดลองมีแรงดันตกคร่อม 0.4 V กำลังสูญเสียในช่วงนำกระแสของไดโอดทั้งสองมีค่า 8 A x 0.4 V = 3.2 W

สำหรับด้านออก 5 V/20 A เลือกใช้ไดโอด D_{15} - D_{16} เป็นไดโอดชอตต์กี CTB - 34 ขนานสองโมดูลกระแสผ่านไดโอดจะมีค่าครึ่งหนึ่ง คือ 10 A และมีแรงดันตกประมาณ 0.42 V กำลังสูญเสียในช่วงนำกระแสของไดโอดทั้งสองโมดูลมีค่า

$$2(10\ A \times 0.42\ V) = 8.4\ W$$

สำหรับด้านออก - 12 V/0.5 A และ -5V/ 0.5 A เลือกใช้ไดโอด D_{9},D_{14} เป็นไดโอดฟื้นตัวเร็ว (fast recovery diode) ใช้เบอร์ MR 812 ซึ่งทนกระแส 1 A

2.10 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุด้านออก

สำหรับด้านออก 5 V / 20 A จากสูตร [7]

$$C = T\ (\Delta i_L)\ /\ (8\ \Delta V_o) \qquad (2.6)$$

เมื่อ T คือคาบเวลาในการสวิตช์ กำหนดความถี่สวิตช์ไว้ที่ 100 kHz

$$T = 1/f = 1/(100 \times 10^{-3})$$

$$= 1 \times 10^{-5}\ s$$

$\Delta\ i_L$ คือกระแสที่เปลี่ยนแปลงในตัวเหนี่ยวนำกำหนดให้มีค่า 10 เปอร์เซ็นต์ของกระแสเฉลี่ยด้านออก

$$= 0.1\ I_o$$

$$= 0.1 \times 20 = 2\ A$$

$\Delta\ V_o$ คือแรงดันที่เปลี่ยนแปลงทางด้านออกกำหนดให้มีค่า 1 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันด้านออก

$$= 0.01 \times 5 = 0.05\ V$$

จากสมการ 2.6 จะได้ C_{13} $= (1 \times 10^{-5})(2)/(8 \times 0.05)$ F

$$= 50\ \mu F$$

ในทางปฏิบัติเลือกค่า C_{13} มีค่า $100\mu F$ เพื่อชดเชยความต้านทานอนุกรมสมมูล (ESR)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับด้านออก 12 V / 8 A จากสมการ (2.6)

เมื่อ $T = 1/f = 10^{-5}$ s ;เลือก $\Delta i_L = 0.25\ I_o = 2$ A ,

$\Delta V_o = 0.01 \times 12 = 0.12$ V จะได้

$$C_o = (10^{-5})(2) / (8 \times 0.12)\ \text{F}$$

$$\simeq 21\ \mu\text{F}$$

ในทางปฏิบัติเลือกค่า C_o มีค่า 100 μF

สำหรับด้านออก -12 V/0.5 A และ -5V/0.5 A ใช้ตัวเก็บประจุขนาด 100 μF สำหรับ C_7, C_{11}

2.11 การคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำด้านออก

สำหรับตัวเหนี่ยวนำด้านออก L_5 และ L_6 จะพันขดลวดบนแกนเดียวกันเพื่อปรับปรุงการคงค่าไขว้ [8]

สำหรับด้านออก 5V /20 A จากสูตร [7]

$$L = V_o (1-D)\ T / (\Delta i_L) \qquad (2.7)$$

เมื่อ $V_o = 5$ V , $D = 0.4$ และ $\Delta i_L = 0.1\ I_o = 2$ A จะได้ค่าความเหนี่ยวนำ

$$L_6 = 5(1-0.4)(10^{-5}) / (2)\ \text{H}$$

$$= 15\ \mu\text{H}$$

สำหรับด้านออก 12 V / 8 A จากสูตร (2.7)

เมื่อ $V_o = 12$ V , $D = 0.4$ และ $\Delta i_L = 0.25\ I_o = 2$ A จะได้ค่าความเหนี่ยวนำ

$$L_5 = 12(1-0.4)(10^{-5}) / (2)$$

$$= 36\ \mu\text{H}$$

อัตราส่วนจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำ L_5 และ L_6 ที่พันบนแกนเฟอร์ไรต์จะต้องเท่ากันจากอัตราส่วนของแรงดันด้านออก [8] ให้ n_{L5} และ n_{L6} เป็นจำนวนรอบของ L_5, L_6

ดังนั้น

$$\frac{n_{L6}}{n_{L5}} = \frac{V_{12v} + V_{diode}}{V_{5v} + V_{diode}}$$

$$= \frac{12 + 1}{5 + 1}$$

$$= 13/6 \qquad (2.8)$$

เลือกใช้แกน TRB 24 x 15 x 10 ซึ่งมี inductance factor A_L จากการวัดเท่ากับ 5×10^{-6} H

จำนวนรอบมีค่าเท่ากับ [5]

$$n = \sqrt{\frac{L}{A_L}} \qquad (2.9)$$

สำหรับ L_6 ซึ่งมีค่าประมาณ 15 μH จะต้องพันขดลวดให้มีจำนวนรอบเท่ากับ

$$n_{L6} = \sqrt{\frac{15 \times 10^{-6}}{5 \times 10^{-6}}}$$

$$\simeq 17 \text{ รอบ}$$

ลดรอบ n_{L6} ลง 1 รอบ เพื่อให้ช่องหน้าต่างพอเพียง

$$n_{L6} = 16 \text{ รอบ}$$

จากสมการ (2.8) จำนวนรอบ L_5

$$n_{L5} = (13 / 6) \times 16$$

$$= 34 \text{ รอบ}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลดรอบ n_{LS} ลง 8 รอบ เพื่อให้ช่องหน้าต่างพอเพียง

n_{LS} = 26 รอบ

จากสมการ (2.9) $L_S = 5 \times 10^{-8} \times 26^2$

$= 33.8 \ \mu H$

$L_P = 5 \times 10^{-8} \times 16^2$

$= 13 \ \mu H$

L_P ใช้ลวดเบอร์ 27 SWG 26 เส้นขนานเพื่อให้สะดวกในการพัน

L_S ใช้ลวดเบอร์ 27 SWG 18 เส้นขนาน

2.12 การออกแบบหม้อแปลง

ขั้นแรกพิจารณาอัตราการแปลงโดยเลือกสภาวะที่แรงดันเข้าลดลงเหลือ 90% ของค่าปกติ

แรงดันไฟตรงจะมีค่าเท่ากับ

$V_{min} = \sqrt{2}(220V) \times 0.9$

$= 280 \ V$

กรณีนี้เลือก D duty ratio ให้มีค่า 0.4 แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ภายในหม้อแปลงและตกคร่อมไดโอดทางด้านออกรวมมีค่าประมาณ 2 V โดยคิดถึงแรงดันตกคร่อมไดโอด 0.4 V รวมกับแรงดันตกคร่อมความต้านทาน และรีแอกแทนซ์ของฟลักซ์รั่วไหล (leakage reactance) อีก 1.6 V ดังนั้นแรงดันที่ขดลวด V_{o1} สำหรับด้านออก 5 V จะมีพิกัดแรงดัน 7 V

อัตราส่วนการแปลงจะมีค่า

$$n_1 = V_{min} \ D \ / \ V_{o1} \qquad (2.10)$$

$= 280 \ (0.4)/7 \simeq 16$

ในการออกแบบหม้อแปลงจะใช้วิธี K_g approach [9] โดยพิจารณาสมการ (2.11)

$$K_g = kWS^2 / t = \rho D (P_t)^2 / 4 [(Bm)^2 f^2 P_{cu}] \qquad (2.11)$$

โดยที่ k คืออัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดลวดทองแดงทั้งหมดต่อพื้นที่ของช่องหน้าต่าง (empirical window utilization factor) (มีค่าระหว่าง 0.3 ถึง 0.6)

W คือพื้นที่หน้าตัดช่องหน้าต่างมีหน่วยเป็น $mm.^2$

S คือพื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์มีหน่วยเป็น $mm.^2$

t คือความยาวเฉลี่ยของลวดหนึ่งรอบมีหน่วยเป็น mm.

ρ คือความต้านทานจำเพาะของทองแดงมีค่า 1.724×10^{-8} ohms - m

Bm คือความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมีหน่วยเป็น Tesla [Weber/m^2]

สำหรับหม้อแปลงที่กำลังออกแบบ พารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นดังนี้

P_t = 256 W, D = 0.4, Bm = 0.2 T f = 100 kHz และP_{cu} คิดจาก 1% ของ P_t คือ 3 W โดยประมาณ จากสมการ (2.11)จะได้

$$K_g = (1.724 \times 10^{-8}) \, 0.4(256)^2 / 4 \, [(0.2 \times 10^{5})^2 \times 3$$

$$= 9.415 \times 10^{-14}$$

เลือกแกน Thomson ETD 39 มีค่า W = 125 mm^2 , S = 123 mm^2

t = 92.2 mm และเลือก k = 0.3

$$(K_g) \text{ actual} = kWS^2 / t$$

$$= 0.3 \times 125 \times 10^{-6} \times (123 \times 10^{-6})^2 / 92.2 \times 10^{-3}$$

$$= 6.15 \times 10^{-12}$$

K_g ที่ได้จากการเลือก ETD 39 มีค่าเป็น 65 เท่าของค่าที่ต้องการเพื่อให้การสูญเสียในแกนลดลง [10] จะใช้ B_m = 70 mT น้อยกว่าค่าที่กำหนดในสมการ (2.11) ประมาณ 3 เท่า เพราะพื้นที่หน้าตัดช่องหน้าต่างมีเพียงพอที่จะพันขดลวดให้มีจำนวนรอบเพิ่มขึ้นได้ จำนวนรอบทางขดปฐมภูมิ N_1 หาได้จากสมการ (2.12)

$$V_{min} (D T) = N_1 B_m S \qquad (2.12)$$

$$N_1 = V_{min} (D T) / (B_m S)$$

$$= 280 \, (0.4 \times 1 \times 10^{-5}) \, / (0.07 \times 1.23 \times 10^{-4})$$

$$= 130 \text{ รอบ}$$

จำนวนรอบของขดลวด 5V หาได้จาก

$$N_{s1} = N_1/n_1 = 130/16 \simeq 8 \text{ รอบ}$$

จำนวนรอบของขดลวด 12 V คิดจากแรงดันด้านออกบวกด้วยแรงดันตกคร่อมในหม้อแปลง และไดโอด ประมาณ 2 V โดยคิดแรงดันตกคร่อมไดโอด 0.4 V และแรงดันตกคร่อมหม้อแปลง 1.6 V แรงดันที่ใช้ในการคำนวณจึงมีค่า 14 V จำนวนรอบทางด้านออกมีค่า

$$N_{s2} = \frac{14 \times 8}{7} = 16 \text{ รอบ}$$

พื้นที่หน้าตัดของขดลวดปฐมภูมิ

$$A_{w1} = k(W/2)/N_1 = 0.3(89)/130 \text{ mm}^2$$

$$= 0.205 \text{ mm}^2$$

และพื้นที่หน้าตัดของขดลวดทุติยภูมิ

$$A_{w21} = k(W/4)/N_{21} = 0.3(44.5)/8 \text{ mm}^2$$

$$= 1.67 \text{ mm}^2$$

$$A_{w22} = k(W/4)/N_{22} = 0.3(44.5)/16 \text{ mm}^2$$

$$= 0.83 \text{ mm}^2$$

หม้อแปลงที่ได้ขดปฐมภูมิจะพันด้วยลวด SWG 27 ($A_w = 0.131 \text{ mm}^2$) 2 เส้นขนาน และขดลวดทุติยภูมิ จะใช้ลวด SWG 36 ($A_w = 0.029 \text{ mm}^2$) สำหรับขด 5 V จะใช้ขนาน 36 เส้น และสำหรับขด 12 V จะใช้ 18 เส้นขนาน

สาเหตุที่ใช้ลวดหลายเส้นขนานกันเพราะต้องการลดผลของไฟสลับความถี่สูงขึ้นกระแสไฟฟ้าจะไหลที่ผิวมากกว่าใจกลางลวดตัวนำตามปรากฏการณ์ผิว จึงต้องเพิ่มพื้นที่ผิวโดยขนานตัวนำหลายเส้นนอกจากนี้ยังมีข้อดีอีกคือ ตัวนำขนานกันจะพันได้สะดวกกว่าตัวนำเส้นเดียว