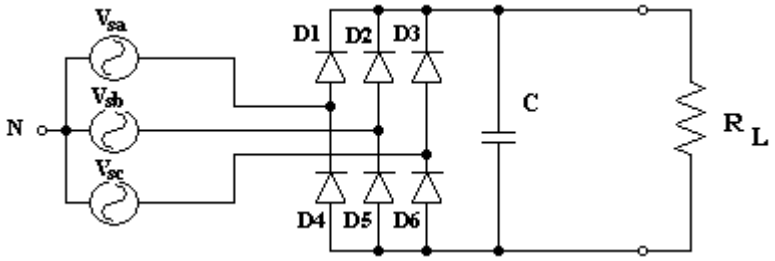
บทที่ 3
การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังงาน

3.1 การออกแบบวงจรเรียงกระแส

จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 48 โวลต์ และพิกัดกำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์



รูปที่ 3.1 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส

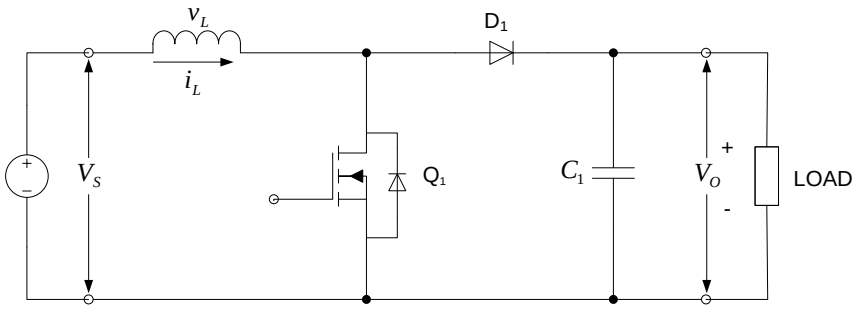
ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส และตัวเก็บประจุที่มาต่อใช้งาน

กระแสสูงสุดของวงจรที่นำมาต่อใช้งาน	ค่าของตัวเก็บประจุที่นำมาต่อเพื่อสำรองไฟ
125 mA	470 µF
250 mA	1,000 µF
500 mA	2,200 µF
1A	4,700 µF
2A	6,800 µF
4A	10,000 µF
8A	22,000 µF

3.2 การออกแบบวงจรทบระดับแรงดัน

ในการออกแบบวงจรทบระดับแรงดันในงานวิจัยนี้จะกำหนดแรงดันด้านเข้าของวงจรทบระดับมีค่าเท่ากับ 48 โวลต์ และแรงดันด้านออกของวงจรทบระดับมีค่าเท่ากับ 100 โวลต์ ที่ความถี่สวิตช์ 10 kHz โดยในงานวิจัยนี้ใช้มอสเฟตเบอร์ IRFP 250 ซึ่งมีอัตราทนแรงดันเท่ากับ 200 โวลต์

กระแส 33A จากค่าต่าง ๆ ที่กำหนดนี้สามารถนำมาหาค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุของวงจรทบระดับแรงดันได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 วงจรทบระดับแรงดัน

1. หาค่า Dudy Cycle จากสมการ (2.13)

จาก $$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1\text{-}D}$$

$$\frac{100}{48} = \frac{1}{1\text{-}D}$$

$$1 - D = \frac{48}{100} = 0.48$$

$$D = 0.52$$

หาขนาดตัวเหนี่ยวนำ (L) สามารถคำนวณจากสมการ (2.21)

$$L_{min1} = \frac{D(1\text{-}D)^2 R}{2f}$$

$$L_{min1} = \frac{0.52(1\text{-}0.52)^2 \times 10}{2(10 \times 10^3)}$$

$$= 60\,\mu H$$

2. หาขนาดตัวเก็บประจุค่าระลอกคลื่นแรงดันของตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์จากสมการที่ (2.24)

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf}$$

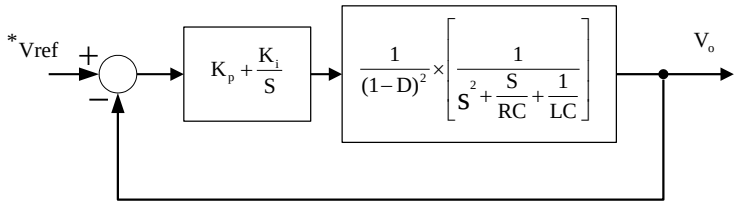
จะได้ $$C_1 = \frac{D}{Rf\frac{\Delta V_o}{V_o}}$$

$$C_1 = \frac{0.52}{10\times\left(10\times10^{3}\right)\times0.1}$$

$$= 52\ \mu F$$

3.2.1 การจำลองตัวควบคุมชนิด PI ด้วย Ziegler-Nichols

เป็นการออกแบบตัวควบคุมชนิด PI ด้วย Ziegler-Nichols เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ที่ทำให้ระบบมีความ ผิดพลาด (Error) น้อยที่สุด ที่สภาวะคงตัว (Steady State) และมีผลต่อการตอบสนองที่รวดเร็ว จึงสามารถออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจรได้รูปที่ 3.3



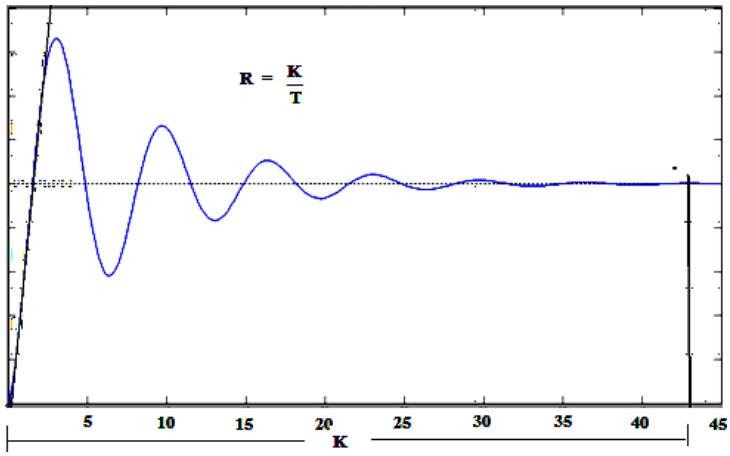
รูปที่ 3.3 บล็อกฟังก์ชันโอนย้าย Transfer Function ตัวควบคุมชนิด PI

ลำดับขั้นตอนการหาค่า Kp Ki ด้วย Ziegler-Nichols

1. ทำการสุ่มค่า Kp Ki ขึ้นมาเพื่อทำการหา Step Response

```
kp = 10;
ki = 15;
L  = 60e6;
C  = 52e-6;
R  = 10;
Num = [kp ki];
Den = [1 1/(R*C) 1/(L*C) 0];
Sys = tf(num,den);
sys1 = feedback(sys,1);
step(sys1)
```

จะได้กราฟ Step Response ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กราฟแสดง Step Response จากการสุ่มค่าเริ่มต้น

จากรูปที่ 3.4 จะได้ค่าดังนี้

L = 0.2

R = 1/43.5 = 0.02298

ต้องการควบคุมแบบ PI controller

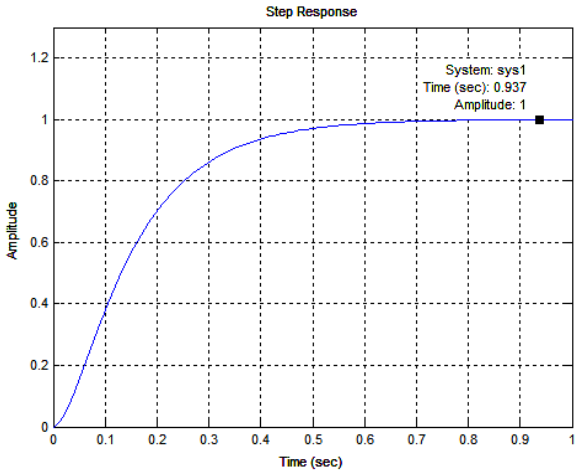
Kp = 0.9/R.L = 0.9/0.2x0.02298 = 195.822

Ki = L/0.3 = 0.2/0.3 = 0.666666

3. นำค่าที่ได้มาคำนวณการควบคุมแบบ PI controller ตามกฎของ Ziegler -Nichols และนำค่าที่ได้จากการมาคำนวณหา Step Response อีกครั้ง ได้ดังภาพที่ 3.5

Kp = 0.9T/L = 0.9x0.54/0.12 = 4.05

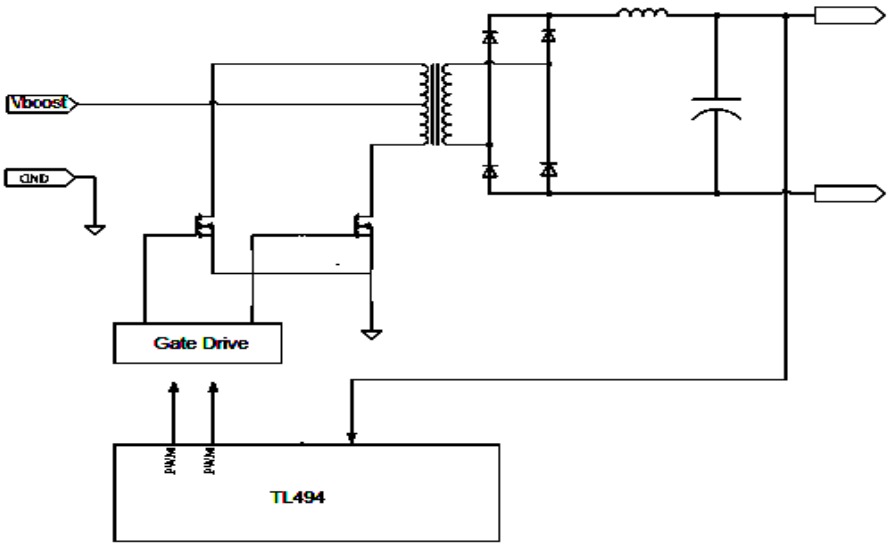
Ki = L/0.3 = 0.12/0.3 = 0.4



รูปที่ 3.5 กราฟแสดง Step Response ที่ได้จากกฎของ Ziegler-Nichols

3.3 การออกแบบวงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์

ในการออกแบบวงจรพุช-พูล คอนเวอร์เตอร์นี้จะใช้ IC TL494 เป็นตัวสร้างสัญญาณ PWM เพื่อไปควบคุมการขับของสวิตช์ MOSFET ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เบอร์ IRFP 460 มีคุณสมบัติในการทนแรงดันได้ 500V ทนกระแสได้ 20A



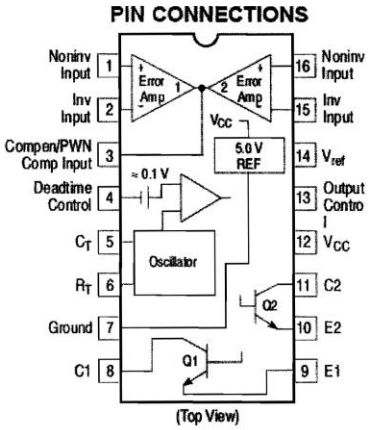
รูปที่ 3.6 โครงสร้างพื้นฐาน และส่วนประกอบของวงจรพุช–พูลคอนเวอร์เตอร์

3.3.1 ข้อพิจารณาในการออกแบบวงจรควบคุม

การออกแบบวงจรควบคุมเป็นการออกแบบสัญญาณ เพื่อไปควบคุมการขับสวิตซ์ MOSFET ออกแบบให้วงจรทำงานที่ภาคขับกำลังแบบ Push-Pull converter จึงต้องออกแบบให้สัญญาณเอาท์พุตคู่ และมีการแยกราวด์ของชุดวงจรควบคุมออกจากภาคกำลัง ด้วยวิธีการเชื่อมโยงสัญญาณทางแสง เพื่อให้มีความปลอดภัยในการใช้งานโดยใช้ HCPL 3120 และปรับความกว้างพัลส์ และความถี่ให้ได้ตามที่ต้องการด้วยความต้านทานปรับค่าได้

3.3.2 การออกแบบวงจรควบคุม

วงจรควบคุมเลือกใช้ไอซี TL494 เนื่องจากไอซีเบอร์นี้สามารถใช้ในการควบคุมวงจรพุช-พูล คอนเวอร์เตอร์และสามารถควบคุม PWM ของวงจรควบคุม โดยภายในตัวไอซีจะมีแรงดันอ้างอิง, และวงจรเปรียบเทียบ 2 วงจร, วงจรผลิตความถี่, PWM, flip flop และมีสัญญาณเอาท์พุตสองสัญญาณเพื่อไปขับสวิตช์ MOSFET



รูปที่ 3.7 ขาต่าง ๆ ภายในตัวไอซี

คำนวณหาความถี่ที่ใช้

$$f_{osc} \approx \frac{1.1}{R_T C_T} \tag{3.1}$$

แต่จาก Data sheet ของ TL494 การใช้เอาท์พุตของไอซีเพื่อขับวงจร ให้ทำงานแบบ push-pull

ความถี่

$$\frac{f_{out}}{f_{osc}} = 0.5$$

ดังนั้นสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความถี่เอาท์พุตจึงเท่ากับ

$$f_{out} = \frac{f_{osc}}{2} \tag{3.2}$$

ดังนั้นความถี่เอาท์พุตเท่ากับ

$$f_{out} = \frac{1.1}{2R_T C_T} \tag{3.3}$$

ในการออกแบบเลือกความถี่ ในการทำงานเท่ากับ 10 kHz และเลือกค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 1nF การหาค่าความต้านทาน R_T จึงเท่ากับ

$$R_T = \frac{1.1}{2C_T f_{out}} \tag{3.4}$$

$$R_T = \frac{1.1}{2\times 1\times 10^{-9}\times 10\times 10^{3}} \tag{3.5}$$

$$R_T = 55k\Omega$$

3.3.3 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับวงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์

แรงดันด้านเข้า $\left(V_{in}\right)$ 100 V

กระแสด้านออก $\left(I_0\right)$ 2 A

ความถี่สวิตชิ่ง $\left(f_s\right)$ 10 kHz

แรงดันด้านออก $\left(V_0\right)$ 537 V $\pm$10%

ก. <u>หากำลังไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ</u>

$$P_{o2} = \left(V_0 + V_{rl} + V_D\right)\cdot I_0 = \left(537 + \left(537\cdot 10\%\right) + 1.5\right)\cdot 2 = 1184W$$

ข. <u>การเลือกขนาดของแกนแม่เหล็ก</u>

$$A_P = A_C A_W \frac{\sqrt{2}\cdot P_{o2}\cdot\left(1+\frac{1}{\eta}\right)}{4JK_W B_W f_s} \tag{3.6}$$

เลือกค่าที่ออกแบบหม้อแปลงปลอดภัย

$\eta = 0.8$

$J = 3A/mm^2$

$K_W = 0.4$

$B_m = 0.2T$

แทนค่าในสูตร

$$A_P = \frac{\sqrt{2}\times 882\times\left(1+\frac{1}{0.8}\right)}{4\times 3\times 0.4\times 0.2\times 35\times 10^{3}} \tag{3.7}$$

$$A_P = 0.0835269 m^2$$

$$A_P = 83526.9 mm^4$$

ทำการเลือกแกนแม่เหล็กจากตาราง โดยต้องเลือก A_P ในตารางให้มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้นทำการเลือกแกนแม่เหล็กเบอร์ E65/32/13

$$A_P = 142840 mm^4, A_W = 537 mm^2, A_C = 266 mm^2$$

ค. <u>หาจำนวนรอบของหม้อแปลง</u>

จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ

$$N_1 = \frac{V_{in,max}}{4 A_C B_m f_S} \tag{3.8}$$

$$N_1 = \frac{100 + (100 \times 10\%)}{4 \times 266 \times 10^{-6} \times 0.2 \times 10 \times 10^3}$$

$$N_1 = 51 \text{ รอบ}$$

เลือก $N_1 = 51$ รอบ

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_O^{'}}{V_{in,min}\left(2 D_{max}\right)} \tag{3.9}$$

เลือกใช้ $D_{max} = 0.45$

$$\eta = \frac{537}{\left(100 - (100 \times 10\%)\right) \times 2 \times 0.45}$$

$$\eta = 5.1$$

$$N_2 = \eta N_1$$

$$N_2 = 5.1 \times 55 = 273 \text{ รอบ}$$

เลือก $N_2 = 273$ รอบ

ง. <u>การเลือกขนาดลวดตัวนำ</u>

ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสจะมีค่าเท่ากับ

$$I_2 = I_O\sqrt{D_{max}} \tag{3.10}$$

$$I_2 = 2\times\sqrt{0.45} = 1.35A$$
$$I_1 = nI_2$$
$$I_1 = 5.1\times 1.34 = 6.83 \text{ A}$$

คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดดังนี้

$$a_1 = \frac{I_1}{J} \tag{3.11}$$

$$a_1 = \frac{6.83A}{3A/mm^2} = 2.27mm^2$$

$$a_2 = \frac{I_2}{J}$$

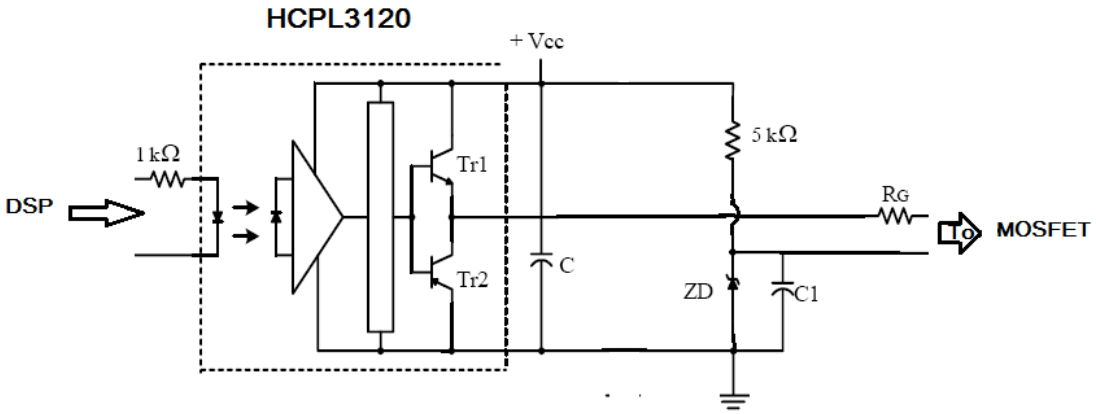
$$a_2 = \frac{1.35A}{3A/mm^2} = 0.45mm^2$$

จากตาราง ทำการเลือกขนาดขดลวดที่มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจะได้ขดลวด a_1 เบอร์ SWG15 $\left(2.54\text{mm}^2\right)$ และขดลวด a_2 เบอร์ SWG20 $\left(0.65\text{mm}^2\right)$

3.4 วงจรขับนำ และตรวจจับสัญญาณแรงดัน

3.4.1 วงจรขับนำสัญญาณของวงจรทบระดับแรงดัน และวงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์

การควบคุมการทำงานของสวิตช์จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ทำการแยกระหว่างขาเกตกับสัญญาณควบคุมที่ถูกสร้างขึ้นจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในการแยกกันของสัญญาณนี้ ก็เพื่อต้องการแยกกราวด์ด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรอันเกิดจากการใช้กราวด์เดียว อุปกรณ์ที่ใช้แยกกราวด์จะเลือกใช้ไอซีแยกระบบด้วยแสง (Opto Coupler) เบอร์ HCPL 3120 ตัวสำหรับวงจรทบระดับแรงดันซึ่งสามารถใช้ไฟฟ้าเลี้ยงวงจรขนาด 15 โวลต์ โดยแสดงวงจรดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรขับเกตสำหรับวงจรทบระดับ และวงจรพุช-พูล คอนเวอร์เตอร์

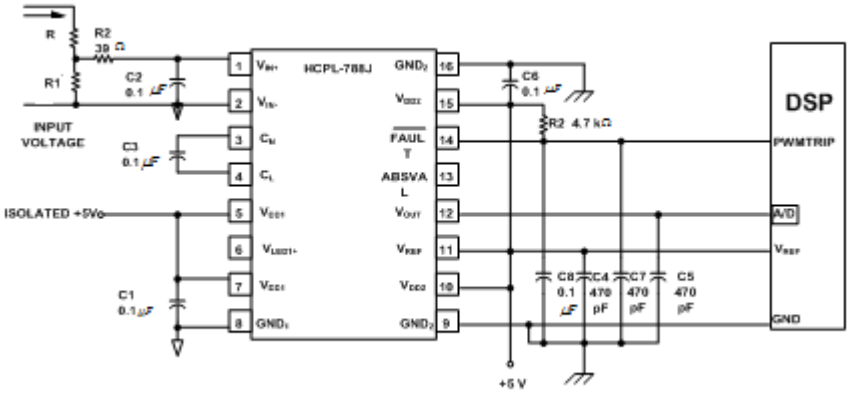
3.4.2 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน

การตรวจจับสัญญาณแรงดันของงานวิจัยนี้จะตรวจจับแรงดันด้านออกของวงจรทบระดับที่ 110 V จะใช้วงจรแบ่งแรงดัน และกำหนดค่า R เพื่อใช้เป็นแรงดันอินพุตให้กับไอซีเบอร์ HCPL-788J มีค่าอยู่ช่วง 0 - 200 mV โดยกำหนดค่า R ที่ใช้วงจรแบ่งแรงดันตกคร่อมให้เป็นแรงดันอินพุตให้กับตัวจับสัญญาณเป็นค่า R1 ดังสมการที่ (3.12)

$$V_{sense} = \frac{R_1}{R+R_1} + V_{boost} \tag{3.12}$$

$$200mV = \frac{R_1}{R+R_1} + 110$$

เลือก R = 100 kΩ จะได้ $R_1 = \frac{200\times10^{-3}\times100\times10^{3}}{100} = 181.81\ \Omega$ ดังนั้นเลือกใช้ R1 = 180 Ω



รูปที่ 3.9 วงจรการตรวจจับสัญญาณแรงดัน