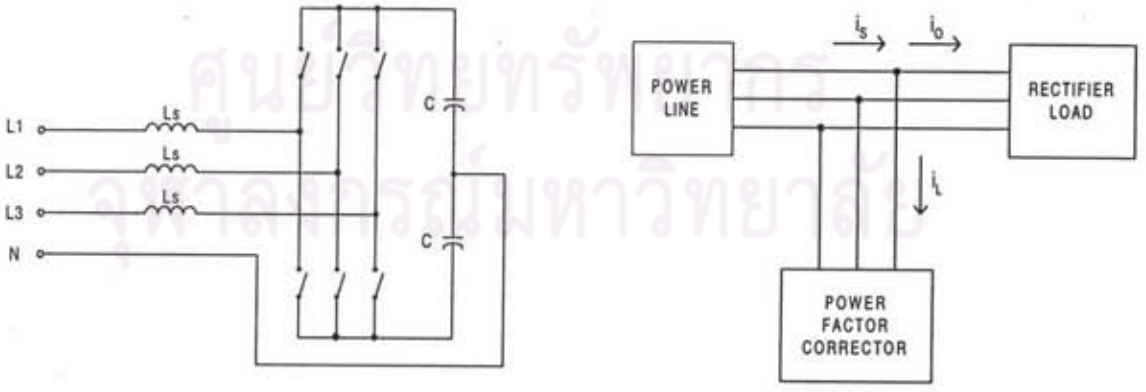
บทที่ 2

เครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง

1. ความเบื้องต้น

วงจรภาคกำลังของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลังเป็นวงจรสวิตชิงแบบครึ่งบริดจ์ ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำและสวิตช์กำลังดังภาพที่ 2.1(ก) เครื่องแก้ตัวประกอบกำลังนี้ต่อขนานเข้ากับโหลดซึ่งในที่นี้สมมติว่าเป็นโหลดเรียงกระแสดังในภาพที่ 2.1(ข) วงจรควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุมกระแสสายกำลัง i_S ให้เป็นไซน์ที่มีเฟสตรงกับแรงดันเฟสและทำหน้าที่ควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C ของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลังให้มีค่าเฉลี่ยคงตัว จากหลักความสมดุลของกำลัง สายกำลังจะจ่ายแต่กำลังจริง ส่วนเครื่องแก้ตัวประกอบกำลังจะจ่ายกำลังรีแอกตีฟให้แก่โหลด

อย่างไรก็ดีโหลดเรียงกระแสต้องการกำลังฉับพลัน (instantaneous power) ที่ความถี่ของฮาร์มอนิกหรือต้องการกำลังฮาร์มอนิกด้วย โดยเฉพาะที่ความถี่ 6 เท่าของสายกำลัง ดังนั้นเพื่อสร้างดุลภาพของกำลังฉับพลัน เครื่องแก้ตัวประกอบกำลังต้องจ่ายกำลังฮาร์มอนิกด้วยนั่นคือแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแม้จะมีค่าเฉลี่ยคงตัว แต่ก็มีแรงดันระลอกโดยเฉพาะที่ความถี่ 6 เท่าของสายกำลัง

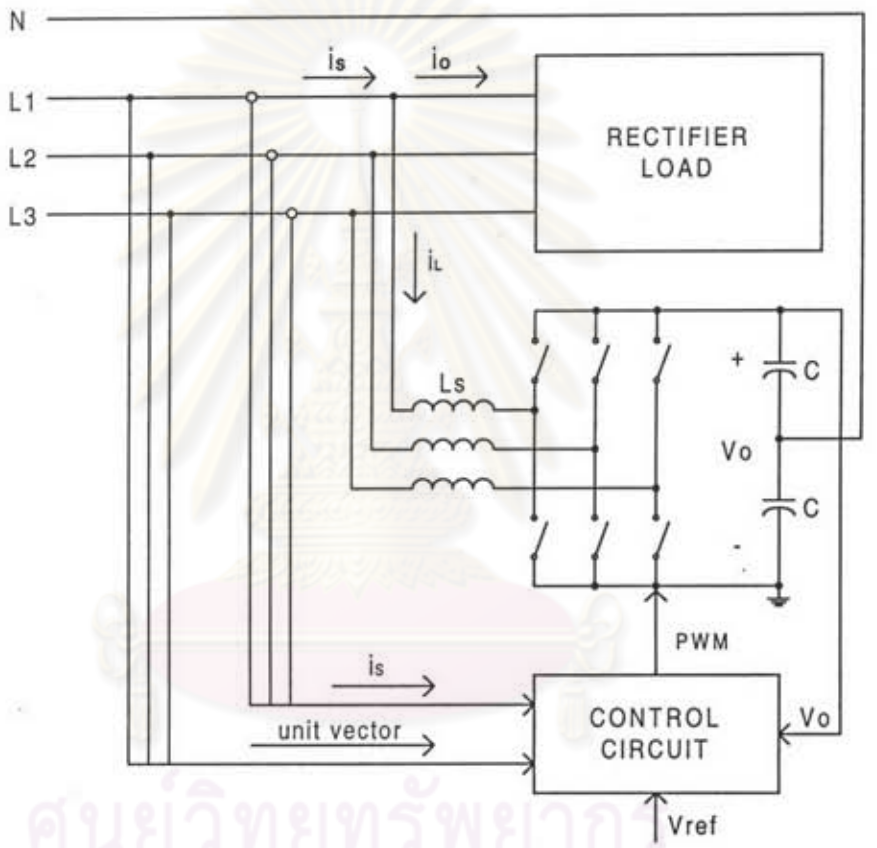


(ก) (ข)

ภาพที่ 2.1 วงจรภาคกำลังของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง

2. หลักการทำงานของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง

ภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลังและโหลดเรียงกระแสโดยที่ i_S , i_L และ i_O คือกระแสของสายกำลัง กระแสด้านเข้าของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง และกระแสด้านเข้าของโหลดเรียงกระแสตามลำดับ V_{ref} คือสัญญาณแรงดันอ้างอิง V_o คือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และ unit vector คือแรงดันไซน์ซึ่งลดทอนมาจากสายกำลัง



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลังและโหลดเรียงกระแส

วงจรควบคุมทำหน้าที่ควบคุมให้กระแส i_S เป็นรูปไซน์ที่มีเฟสตรงกับแรงดันสายกำลัง พร้อมทั้งควบคุมให้แรงดัน V_o มีค่าคงตัวตามการกำหนดของ V_{ref} ตราบใดที่แรงดัน V_o มีค่าสูงพอ คือสูงกว่า 2 เท่าของแอมพลิจูดของแรงดันเฟส การตัดต่อสวิตช์จะสามารถควบคุมรูปคลื่นกระแส i_L ได้ แต่ $i_S = i_L + i_O$ และ i_O มีรูปคลื่นที่กำหนดโดยโหลด การควบคุมรูปคลื่น i_S ให้เป็นไซน์จึงหมายถึงการควบคุม i_L ให้เป็นไปตามสมการข้างต้น

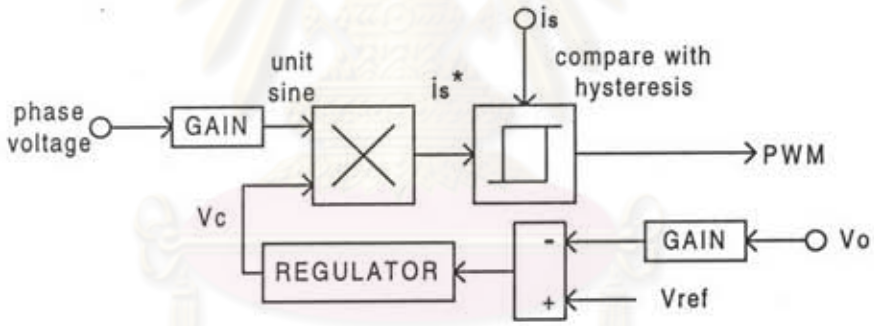
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ 2.3 แสดงแผนภาพบล็อกวงจรควบคุมของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง ซึ่งมีวงรอบควบคุม 2 วงรอบคือ

1. วงรอบภายในใช้ควบคุมกระแสของสายกำลังให้มีเฟสและรูปร่างใกล้เคียงกับแรงดันสายกำลัง

2. วงรอบภายนอก ใช้ควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

หลักการทำงานของวงจรควบคุมคือ ทำการลดทอนแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเพื่อป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง นำผลต่างที่ได้ไปผ่านวงจรคุมค่า (regulator) ซึ่งให้แรงดันคำสั่ง (command) V_C นำ V_C ไปคูณกับสัญญาณซึ่งลดทอนมาจากแรงดันสายกำลัง (unit vector) ผลคูณที่ได้จะเป็นสัญญาณกระแสอ้างอิง i_S^* เมื่อวัดสัญญาณกระแสของสายกำลัง i_S มาเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสอ้างอิงแบบมีฮิสเตอรีซิส จะได้สัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) ซึ่งใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์



ภาพที่ 2.3 แผนภาพบล็อกวงจรควบคุมของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง

3. <u>การหาแบบจำลองเฉลี่ยต่อคาบสายกำลัง (line-frequency averaged model)</u>

จากภาพที่ 2.2 ในกรณีที่โหลดเป็นเสมือนแหล่งจ่ายกระแส i_o ซึ่งมีรูปคลื่นใด ๆ และมีค่า rms เท่ากับ I_o เมื่อใช้ทฤษฎีบทของเทเลเจนจะได้

$$3v_s i_s = 3L_s i_L(di_L/dt)+0.5Cv_o(dv_o/dt)+3v_s i_o \quad \text{----------(1)}$$

เมื่อมี perturbation ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณขนาดเล็ก (ซึ่งใช้สัญลักษณ์ ^) รอบ ๆค่าสงบ (ซึ่งเป็นค่า rms และใช้สัญลักษณ์อักษรตัวใหญ่) จะได้

$$3V_s\hat{i}_s+3I_s\hat{v}_s = 3L_sI_L s(\hat{i}_s-\hat{i}_o)+0.5CV_o s\hat{v}_o+3V_s\hat{i}_o+3I_o\hat{v}_s \quad \text{----------(2)}$$

ในการเขียนสมการ (2) เราใช้สมการ $i_s=i_L+i_o$ ให้เป็นประโยชน์ เมื่อจัดแจงเทอมต่าง ๆใหม่จะได้

$$(6V_s-6L_sI_L s)\hat{i}_s+(6I_s-6I_o)\hat{v}_s = CV_o s\hat{v}_o+(6V_s-6L_sI_L s)\hat{i}_o \quad \text{----------(3)}$$

วงจรทำการควบคุมกระแสของสายกำลังให้เท่ากับสัญญาณกระแสอ้างอิงนั่นคือ

$$i_s = kv_cv_s \quad \text{----------(4)}$$

โดยที่ k คือผลคูณของอัตราการลดทอนแรงดันเฟสกับอัตราการคูณของวงจรคูณ ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์สำหรับสัญญาณขนาดเล็กได้ดังนี้

$$\hat{i}_s = kV_c\hat{v}_s + kV_s\hat{v}_c \quad \text{----------(5)}$$

แทนค่า i_s จากสมการที่ (5) ลงในสมการที่ (3) จะได้

$$\hat{v}_o = G_c\hat{v}_c + G_s\hat{v}_s + G_i\hat{i}_o \quad \text{----------(6)}$$

โดยที่ฟังก์ชันโอนย้ายมีนิพจน์ดังนี้

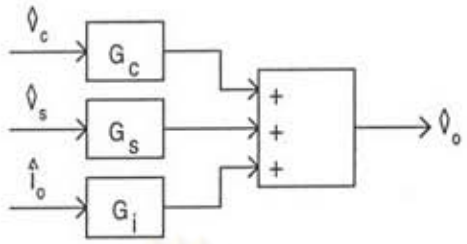
$$G_c = \hat{v}_o/\hat{v}_c = 6kV_s(V_s-L_sI_L s)/CV_os \quad \text{----------(7)}$$

$$G_s = \hat{v}_o/\hat{v}_s = (6I_s-6I_o+6kV_sV_c-6kV_cL_sI_L s)/CV_os \quad \text{----------(8)}$$

$$G_i = \hat{v}_o/\hat{i}_o = -(6V_s-6L_sI_L s)/CV_os \quad \text{----------(9)}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการ (6) สามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 แผนภาพบล็อกแบบจำลองเฉลี่ยต่อคาบสายกำลังของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง

4. <u>เกณฑ์การออกแบบวงจรภาคกำลัง</u>

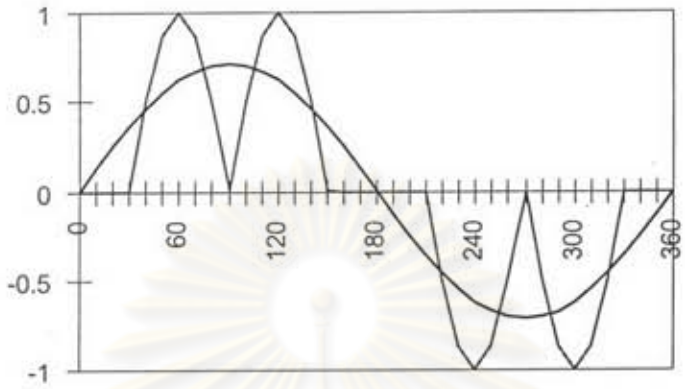
วงจรภาคกำลังของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง ประกอบด้วย IGBT ที่ต่อกันแบบครึ่งบริดจ์ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ดังภาพที่ 2.1

4.1 <u>การออกแบบขนาด IGBT ในเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง</u>

กระแสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสจะมีรูปคลื่นโดยประมาณดังแสดงในภาพที่2.5 เครื่องแก้ตัวประกอบกำลังจะทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟรวมทั้งกำลังฉับพลันที่ความถี่ฮาร์มอนิกให้กับโหลดตามที่โหลดต้องการ แหล่งจ่ายจึงจ่ายแต่กำลังไฟฟ้าจริง ที่เป็นเช่นนี้เพราะเราควบคุมกระแสของสายกำลังให้มีรูปคลื่นเป็นไซน์ที่มีเฟสตรงกับแรงดันสายกำลัง กระแสผ่านสวิตช์คือกระแสที่ไหลเข้าเครื่องแก้ตัวประกอบกำลังซึ่งเท่ากับผลต่างระหว่างกระแสโหลดและกระแสสายกำลัง ดังนั้นจากรูปคลื่นของกระแสในภาพที่ 2.5 พบว่ากระแสผ่านสวิตช์แต่ละตัวมีค่าสูงสุดที่เวลาตรงกับเศษหนึ่งส่วนสี่คาบและมีค่าเท่ากับแอมพลิจูดของกระแสของสายกำลัง

จากข้อกำหนดที่ว่าแรงดันสายของสายกำลังเป็น 180V พบว่าแอมพลิจูดของแรงดันเฟสจะมีค่า $180\sqrt{2}/\sqrt{3} \approx 150$V กำหนดแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเป็น 2.8 เท่าของแอมพลิจูดของแรงดันเฟสคือประมาณ 420V และจากข้อกำหนดที่ว่ากำลังที่โหลดเป็น 850W คิดประสิทธิภาพของระบบ 80% จะได้กำลังที่แหล่ง 1062.5W ซึ่งพบว่าแอมพลิจูดของกระแสที่แหล่งมีค่า 4.8A ดังนั้นขนาดของกระแสผ่านสวิตช์ประมาณ 5Aและแรงดันตกคร่อมสวิตช์เท่ากับ 420Vตามข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิต IGBT กำหนดให้ขนาดกระแสสูงสุดของ IGBT ควรมีค่าสูงกว่ากระแสสูงสุดที่ผ่านสวิตช์ประมาณ 3 เท่าและแรงดันสูงสุดของ IGBT ควรมีค่าสูงกว่าแรงดันคร่อมสวิตช์ประมาณ 2 เท่า เลือก IGBT เบอร์ 1MBH60-100 ที่มีขนาด $I_{C(max)}$ เท่ากับ 60A

ต่อหนึ่งตัวและ $V_{CE(max)}$ เท่ากับ 1000 โวลต์ต่อ 1 ตัว เนื่องจากเป็นเบอร์ที่สะดวกในการจัดหาและราคาสูงกว่าเบอร์ที่พิกัดต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 2.5 การเปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสโหลดกับรูปคลื่นกระแสของสายกำลัง

4.2 การออกแบบขนาดตัวเหนี่ยวนำในเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง[6]

เกณฑ์การเลือกค่าความเหนี่ยวนำเกณฑ์หนึ่ง คือเลือกค่าความเหนี่ยวนำให้สูงพอเพื่อให้ความถี่การสวิตช์ไม่สูงกว่าค่าที่กำหนด จากรูปที่ 2.6 เราคำนวณช่วงเวลาการสวิตช์ได้ดังนี้

$$dT = L_s\Delta I / [0.5V_o - v_s + L_s(di_L/dt)] \text{----------(10)}$$

$$d'T = L_s\Delta I / [0.5V_o + v_s - L_s(di_L/dt)] \text{----------(11)}$$

โดยที่ d คือวัฏจักรงานและ $d' = 1-d$ เมื่อบวกสมการ (10) ด้วยสมการ (11) และกลับเศษเป็นส่วนจะได้

$$f = 1/T = [0.25V_o^2 + (v_s - L_s(di_L/dt))^2] / V_oL_s\Delta I \text{ ----------(12)}$$

ในการคำนวณความถี่สูงสุดของการสวิตช์ เราจะละเลยเทอม $L_s(di_L/dt)$ ให้ V_m เป็นแอมพลิจูดของ v_s จากสมการ (12) จะได้ความถี่สูงสุดเท่ากับ

$$f_{max} = [0.25V_O^2+V_m^2] / V_O L_S \Delta I \text{ ----------(13)}$$

อย่างไรก็ดี ถ้าค่า L_S ที่คำนวณได้จากสมการ (13) มีค่าสูงเกินไปจะทำให้ i_L เปลี่ยนแปลงได้ช้าหรือเปลี่ยนไม่ทันการเปลี่ยนแปลงของ i_O ทั้งนี้เพราะ $i_S=i_L+i_O$ โดยทั่วไปเราอาจถือว่า i_S เปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ดังนั้น i_L ต้องเปลี่ยนแปลงได้เร็วเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของ i_O ตามสภาพของโหลดแต่อัตราการเปลี่ยนแปลงของ i_L เป็นไปตามสมการ $di_L/dt = v_L/L_S$ โดยที่ $v_L=v_S \pm v_C$ สำหรับกรณีที่ i_O เปลี่ยนอย่างรวดเร็ว เราต้องเลือกค่า L_S ที่ต่ำเพื่อให้ $di_L/dt \geq di_O/dt$ ในกรณีเช่นนี้ควรลดค่าของ L_S ลงโดยย้อนไปเพิ่มความถี่การสวิตช์ อีกประการหนึ่งค่า L_S เป็นตัวกำหนดค่าศูนย์บวกของฟังก์ชันโอนย้าย (ดูสมการที่ 7) เพื่อให้วงจรมีเสถียรภาพ เราต้องเลือกความถี่ตัดข้าม ω_c ของอัตราขยายวงรอบให้ต่ำกว่าค่าศูนย์บวก ถ้า L_S มีค่าสูงความถี่ศูนย์บวกจะมีค่าต่ำและ ω_c พลอยมีค่าต่ำไปด้วย วงจรจะมีลักษณะพลวัตที่ไม่ค่อยดี เราจึงไม่ควรเลือก L_S ที่มีค่าสูงจนเกินไป

กำหนดให้ความถี่การสวิตช์ไม่เกิน 40 kHz ขนาดการเปลี่ยนแปลงกระแส ΔI ไม่เกิน 1A แอมพลิจูดของแรงดันเฟส V_m เป็น 150V แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ V_o เท่ากับ 420V ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำได้ประมาณ 4 mH กระแสประมาณ 5A

การออกแบบสร้างตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำ 4 mH กระแสสูงสุด 5A ทำได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 หาพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ

$$E = \frac{1}{2} Li^2_{peak} = \frac{1}{2}\times 4\times 10^{-3}\times 5^2 = 50 \text{ mJ} \text{----------(14)}$$

ขั้นที่ 2 หา Area product (A_p) จากสูตร

$$A_p = 2E/(K_c K_w J B_m) \text{----------(15)}$$

โดย K_c = Crest factor

K_w = Space factor ปกติใช้ 0.4

J = Current density ปกติมีค่าระหว่าง 2 ถึง 5×10^6 A/m^2

B_m = Flux density ปกติมีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 1

ในที่นี้ใช้แกนเฟอร์ไรต์เนื่องจากกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำมีความถี่สูงปนอยู่ โดยเลือก $B_m = 0.4$ T , Crest factor = $\sqrt{2}$, $K_w = 0.4$ และ $J = 2.5\times10^6$ A/m^2 ดังนั้นจะได้ $A_p = 2\times0.05/(\sqrt{2}\times0.4\times2.5\times10^6\times0.4) = 17.67$ cm^4 เลือกแกน E 65/32/13 ซึ่งมี $A_p = 28.56$ cm^4 , $A_c = 5.32$ cm^2 และ $A_w = 5.37$ cm^2

ขั้นที่ 3 หาจำนวนรอบที่ต้องพันจากสูตร

$$N = Li_{peak} / (B_m A_c) \text{----------(16)}$$

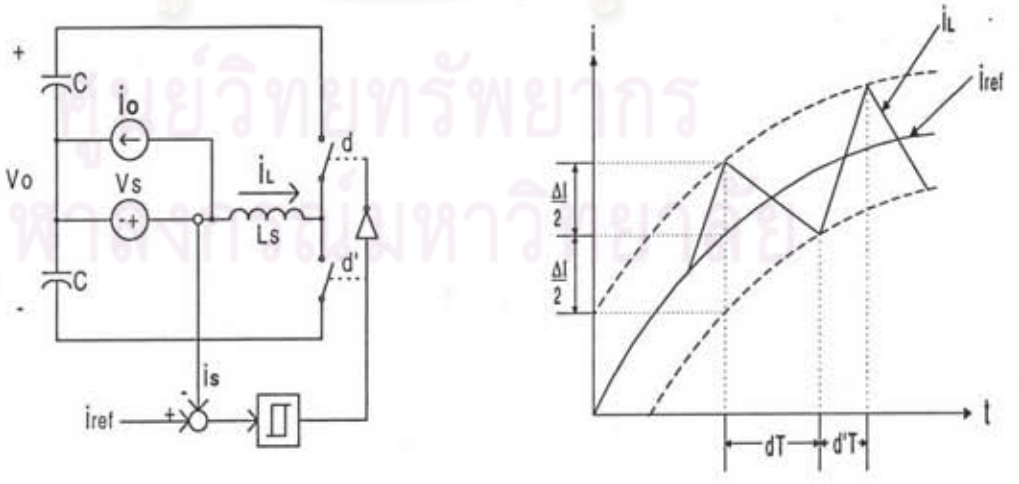
จะได้จำนวนรอบ $N = 4\times10^{-3}\times5/(0.4\times5.32\times10^{-4}) \approx 94$ รอบ

ขั้นที่ 4 หาขนาดของลวดจาก $A_{wire} = 5/(\sqrt{2}\times4\times10^6) = 0.8$ mm^2

ขั้นที่ 5 หาความกว้างช่องว่างอากาศจากสูตร

$$l_g = \mu_o A_c N^2 / L \text{----------(17)}$$

จะได้ความกว้างช่องว่างอากาศ $l_g = 4\pi\times10^{-7}\times5.32\times10^{-4}\times94^2/4\times10^{-3} \approx 1.475$ mm



ภาพที่ 2.6 วงจรและรูปที่ใช้ในการหาค่าความเหนี่ยวนำ

4.3 การออกแบบขนาดตัวเก็บประจุของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง

ในกรณีโหลดเรียงกระแส กระแสโหลดจะมีฮาร์มอนิกปนอยู่ด้วย กำลังฉับพลัน (instantaneous power)ของโหลดจึงมีองค์ประกอบที่ความถี่ฮาร์มอนิกปนอยู่ แต่กำลังฉับพลันของแหล่งยังคงมีค่ารวมคงตัว ตัวเก็บประจุจึงต้องเป็นตัวปรับดุลพลังงานที่ความถี่ฮาร์มอนิกด้วย ภาพที่ 2.5 แสดงลักษณะกระแสโหลดซึ่งสอดคล้องกับกรณีวงจรเรียงกระแสสามเฟสโดยประมาณ แต่ทำให้ง่ายขึ้นเพื่อสะดวกในการวิเคราะห์ เมื่อนำสัญญาณในภาพดังกล่าวมาวิเคราะห์หาอนุกรมฟูเรียร์จะได้ดังสมการที่ (18)

$$i_O(t) = I_{m1} \sin \omega t - I_{m5} \sin 5\omega t + I_{m7} \sin 7\omega t + \ldots \quad \text{----------(18)}$$

โดยที่ I_{m1} มีค่าเป็น 0.717 เท่าของแอมพลิจูดของ $i_O(t)$

I_{m5} มีค่าเป็น 0.358 เท่าของแอมพลิจูดของ $i_O(t)$

I_{m7} มีค่าเป็น 0.143 เท่าของแอมพลิจูดของ $i_O(t)$

ค่าฉับพลันของกำลังที่โหลดเท่ากับ

$$p(t) = \sum_{3\phi} v_S i_O = 1.5V_m I_{m1} + 1.5V_m(I_{m5}+I_{m7}) \cos 6\omega t + \ldots \quad \text{----------(19)}$$

จากสมการที่ (19) พบว่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นค่าคงตัว และส่วนที่มีความถี่เป็น 6 เท่าของความถี่สายกำลัง (กำลังฉับพลันที่ความถี่ที่เป็นพหุคูณของ 6 ที่สูงกว่านี้จะสมมติว่ามีค่าน้อยและสามารถละเลยได้) ดังนั้นตัวเก็บประจุจะต้องทำหน้าที่สร้างดุลกำลังที่ความถี่ที่เป็น 6 เท่าเป็นสำคัญ

ให้ ΔV_o เป็นค่ายอดถึงยอดของระลอก (ripple) ของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ซึ่งมีนิพจน์ใกล้เคียง (ละเลยองค์ประกอบความถี่สูง) ดังนี้

$$v_O = V_O + 0.5\Delta V_O \sin 6\omega t \quad \text{----------(20)}$$

กำลังที่ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ

$$p_C = Cv_o(dv_o/dt) = 3\omega C\Delta V_o \cos 6\omega t\ (V_o + 0.5\Delta V_o \sin 6\omega t) \text{ ----------(21)}$$

ถ้าละเลยองค์ประกอบความถี่ 12ω จะได้

$$p_C \approx 3V_o\omega C\Delta V_o \cos 6\omega t \text{ ----------(22)}$$

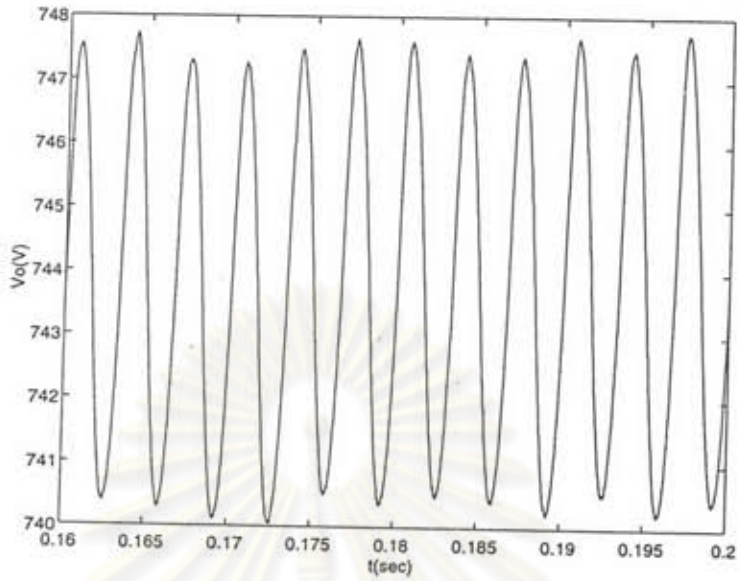
กำลังที่ตัวเก็บประจุจะต้องมีค่าเท่ากับองค์ประกอบความถี่ 6ω ของกำลังที่โหลดดังนั้น

$$1.5V_m(I_{m5}+I_{m7}) = 3V_o\omega C\Delta V_o \text{ ----------(23)}$$

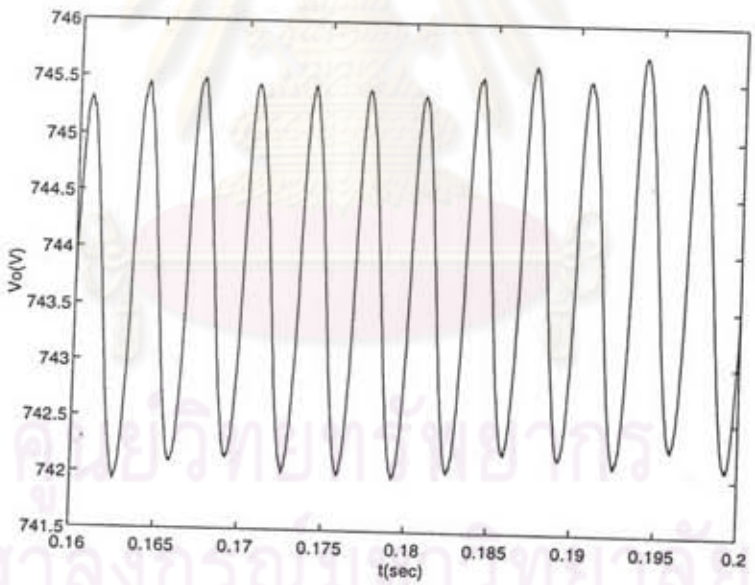
ถ้าเลือก ΔV_o = 3V และแอมพลิจูดของ i_o = 7A จะได้ตัวเก็บประจุขนาดประมาณ 660μF เราเลือกตัวเก็บประจุขนาด 1320μF 400V 2 ตัวต่ออนุกรมกัน จากสมการที่ (23) พบว่าเมื่อกำหนดแอมพลิจูดของ i_o ค่าของตัวเก็บประจุเป็นปฏิภาคผกผันกับค่าระลอกของแรงดัน ภาพที่ 2.7(ก) และ (ข) แสดงผลการชีมูเลตหาระลอกของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโดยใช้แบบจำลองสวิตช์อุดมคติเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุ ซึ่งจากผลการชีมูเลตพบว่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีระลอกที่ความถี่ที่เป็นพหุคูณของ 6 ของความถี่สายกำลังจริงและขนาดของระลอกยังสอดคล้องกับสมการที่ (23)

5. <u>วงจรภาคควบคุม</u>

ในส่วนของวงจรภาคควบคุม มีลักษณะดังภาพที่ 2.8 ซึ่งอาศัยหลักการป้อนกลับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง นำผลต่างที่ได้ไปผ่านวงจรคุมค่าแบบที่มีการจำกัดค่ารวมอยู่ด้วย สัญญาณที่ได้จากวงจรคุมค่าจะเป็นสัญญาณคำสั่ง (command) นำสัญญาณคำสั่งที่ได้ไปคูณกับแรงดันซึ่งลดทอนมาจากแรงดันสายกำลังในแต่ละเฟส นำผลคูณที่ได้ไปเปรียบเทียบแบบมีแถบฮิสเตอริซิส (hysteresis) กับกระแสที่วัดมาจากสายกำลังแต่ละเฟส ผลของการเปรียบเทียบจะเป็นสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ (pulse-width modulation ; PWM) สัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์นี้สามารถนำไปควบคุมการตัดต่อสวิตช์ของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง เพื่อคงค่าองค์ประกอบหลักมูลของกระแสของสายกำลังให้มีค่าตามผลคูณของสัญญาณคำสั่งกับแรงดันที่ลดทอนมาจากแรงดันสายกำลัง ในขณะเดียวกันก็สามารถคงค่าค่าเฉลี่ยของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุได้



(ก)

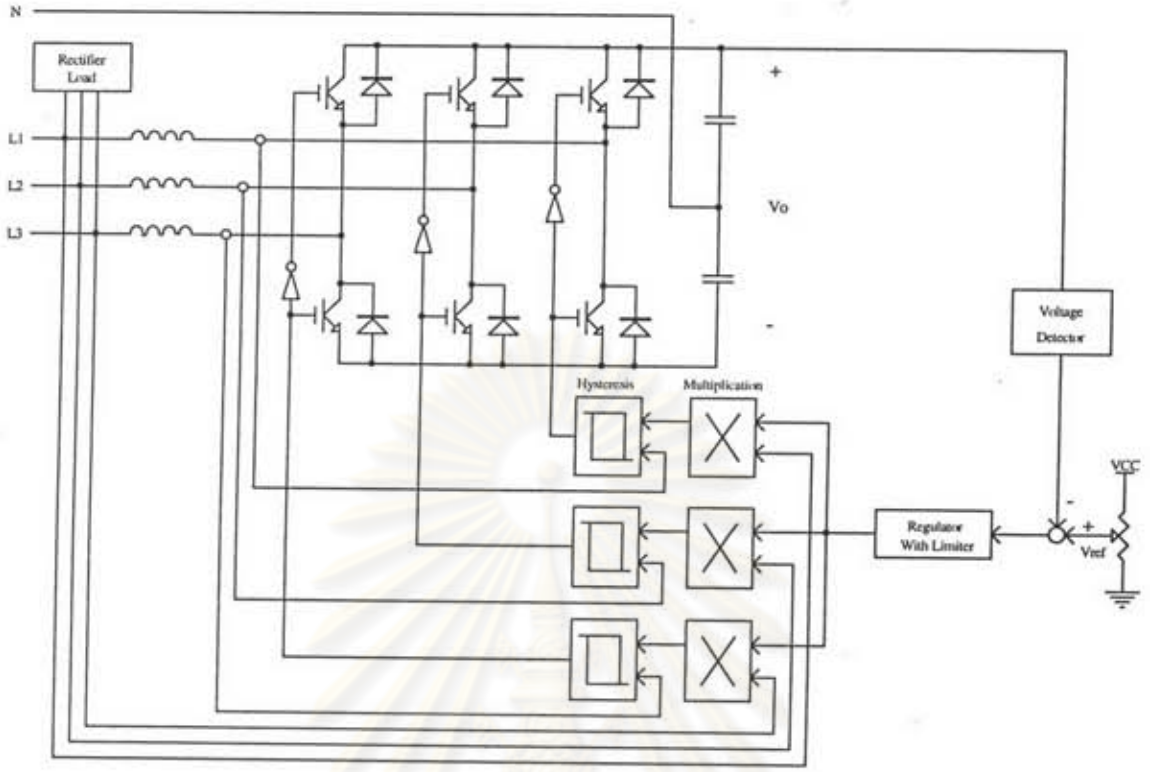


(ข)

ภาพที่ 2.7 ผลการซีมูเลตหาระลอกของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโดยใช้แบบจำลองสวิตช์อุดมคติด้วยซีมูลิงค์ของแมตแล็บโดยที่ V_S = 100 V_{rms} , V_O = 400 V , L_S = 4 mH และความถี่ตัดข้าม ω_C = 130 rad/sec ก) ตัวเก็บประจุขนาด 500 μF

ข) ตัวเก็บประจุขนาด 1000 μF

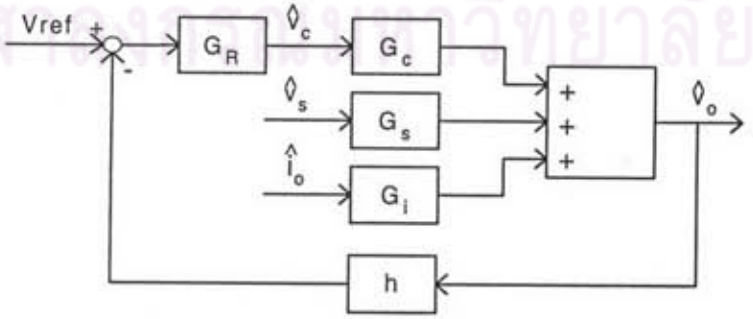
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.8 วงจรภาคควบคุมของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง

5.1 การออกแบบวงจรคุมค่า

การออกแบบวงจรคุมค่าของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลังในที่นี้จะใช้การจำลองแบบโดยใช้แบบจำลองเฉลี่ยต่อคาบสายกำลังโดยใช้โปรแกรมแมตแล็บ[10] ซึ่งจากฟังก์ชันโอนย้ายของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลังที่หาได้ในหัวข้อที่ 3 สามารถเขียนเป็นแผนภาพวงรอบการควบคุมได้ดังภาพที่ 2.9 โดย G_R เป็นค่าฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่าและ h เป็น feedback gain



ภาพที่ 2.9 แผนภาพบล็อกวงรอบควบคุมของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 17341863

จากค่าฟังก์ชันโอนย้าย G_c ในสมการที่ (7) เมื่อแทนค่า $K = \frac{1}{100\sqrt{2}}$, $V_S = 100$ Vrms , $L_S = 4$ mH , $I_L = 5$ A , $C = 1320$ μF , $V_O = 400$ V จะได้

$$G_c = \frac{6\times 100(100 - 4\times 10^{-3}\times 5s)}{100\times\sqrt{2}\times 1320\times 10^{-6}\times 400s}$$

$$= \frac{803(1-\frac{s}{5000})}{s}$$

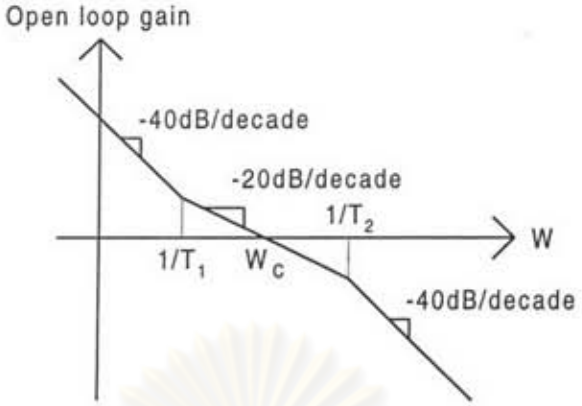
การออกแบบวงจรคุมค่า ในที่นี้จะออกแบบให้อัตราขยายวงเปิดของวงจรมีลักษณะใกล้เคียงกับภาพที่ 2.10 จึงเลือกค่าฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่า G_R เป็นดังสมการ (24) ในที่นี้มีความถี่ที่ต้องพิจารณา 2 ความถี่คือความถี่ศูนย์บวกของฟังก์ชันโอนย้ายที่ 5000 rad/sec และความถี่ระลอกของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ $6\omega = 1884$ rad/sec แต่ความถี่ระลอกของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าต่ำกว่าความถี่ศูนย์บวก ดังนั้นเงื่อนไขการเลือกความถี่ตัดข้าม ω_C ก็คือให้ ω_C มีค่าต่ำกว่าความถี่ระลอกของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ ทำให้ไม่มีการคุมค่าแรงดันที่ความถี่นี้ เครื่องแก้ตัวประกอบกำลังจึงรับและจ่ายกำลังฮาร์มอนิกได้ หรืออีกมุมมองหนึ่งคือถ้าเลือก $\omega_C \geq 6\omega$ วงจรคุมค่าจะพยายามคุมค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุไม่ให้มีค่าระลอกที่ความถี่ 6ω ทำให้กำลังฮาร์มอนิกไม่ไหลเข้าออกเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง สายกำลังจะต้องจ่ายกำลังฮาร์มอนิกเอง และจะเกิดกระแสฮาร์มอนิกใน i_S ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ

เมื่อละเลยค่าศูนย์บวกอัตราขยายวงเปิดมีค่าเท่ากับ

$$hG_RG_C \cong \frac{803h}{s}G_R$$

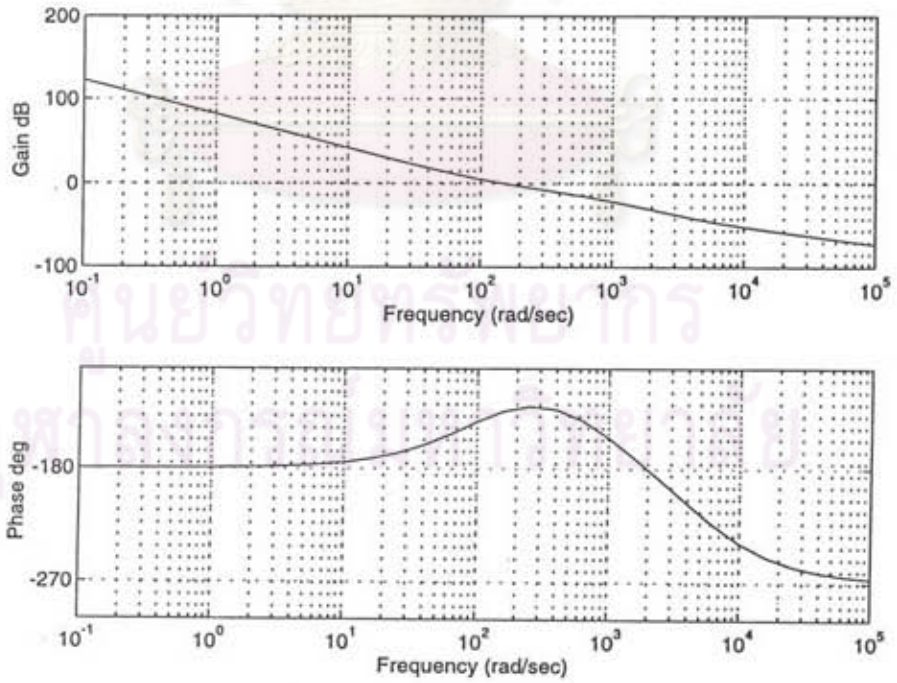
เพื่อไม่ให้มีความคลาดเคลื่อนสถิตอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของ v_S และ i_O เราให้ความลาดชันของอัตราขยายวงเปิดที่ความถี่ต่ำเท่ากับ -40dB/decade เราจึงเลือกอัตราขยายวงรอบให้มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.10 ดังนั้นฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่าจะมีนิพจน์ดังนี้

$$G_R = K_P\,(T_1s+1)/[T_1s(T_2s+1)] \text{ ----------(24)}$$



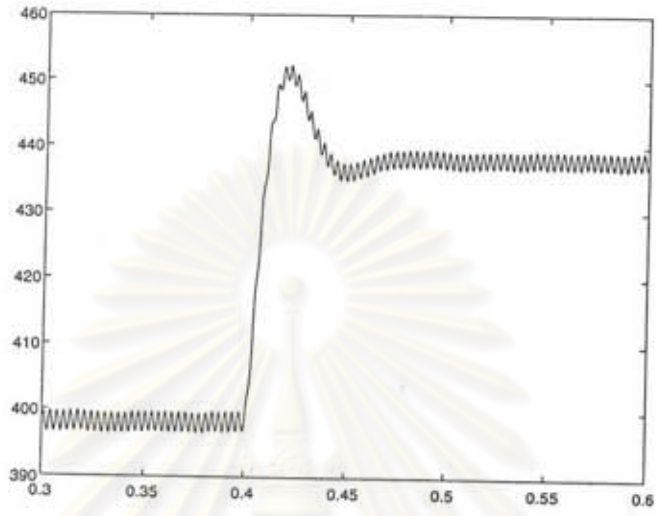
ภาพที่ 2.10 ลักษณะอัตราขยายวงเปิดที่ใช้

ในที่นี้เลือกความถี่ของขั้วที่ใช้ในวงจรคุมค่าให้มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความถี่ 6ω คือเลือกขั้วและศูนย์ของ G_R ที่ความถี่ 900 rad/sec และ 100 rad/sec ตามลำดับโดยมีค่าความถี่ตัดข้าม ω_C 120 rad/sec ที่ h = 8/700 จะได้ Kp = 13.9 , T1 = 10 ms, T2 = 1.11 ms ซึ่งจากการซีมูเลตด้วยแมตแล็บจะได้ Bode Plot ของอัตราขยายวงเปิดดังภาพที่ 2.11 ซึ่งมีค่า $\omega_C \approx 130$ rad/sec, Phase margin ≈ 40°, Gain margin ≈ 44

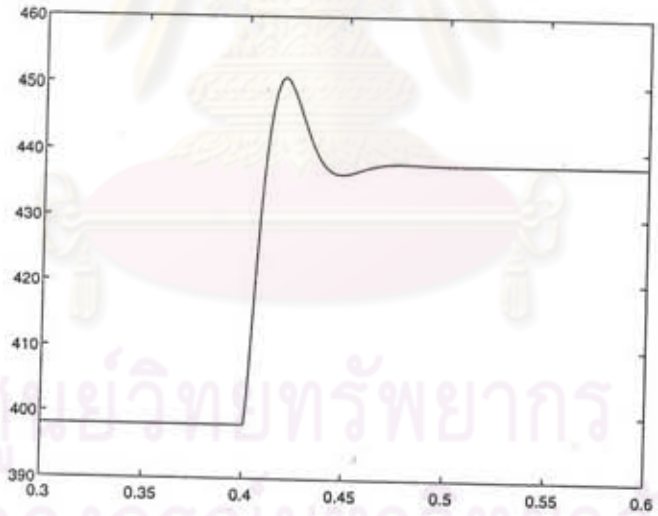


ภาพที่ 2.11 Bode Plot ของอัตราขยายวงเปิด

เมื่อนำแผนภาพบล็อกวงรอบคุมค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในภาพที่ 2.9 ไปซีมูเลต (simulate) เทียบกับการจำลองแบบสวิตช์อุดมคติ เมื่อเพิ่มค่าแรงดันอ้างอิง 10% แบบขั้นก็ให้ผลที่สอดคล้องกันดังในภาพที่ 2.12



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.12 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงแบบขั้นของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ เมื่อเพิ่มแรงดันอ้างอิง 10% แบบขั้น โดยใช้ซีมูลิงค์ของแมตแล็บโดยที่ $V_S = 100\ V_{rms}$, $V_O \approx 400$ V , $L_S = 4$ mH , $C = 1320\ \mu F$ และ $\omega_c \approx 130$ rad/sec

ก) ใช้แบบจำลองสวิตช์อุดมคติ

ข) ใช้แบบจำลองเฉลี่ยต่อคาบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 วงจรคุมค่า

วงจรคุมค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ใช้จะเป็นแบบที่มีซีเนอร์ไดโอดเป็นตัวจำกัดค่าสัญญาณด้านออกดังภาพที่ 2.13 โดยมีรายละเอียดการออกแบบในหัวข้อที่ 5.1

วงจรคุมค่าจะทำการเปรียบเทียบแรงดันอ้างอิงVref ที่ได้มาจากวงจรสร้างแรงดันอ้างอิงกับแรงดันที่ลดทอนมาจากแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุแล้วกำเนิดสัญญาณที่มีการชดเชยฟังก์ชันโอนย้าย(transfer function) ของระบบให้มีเสถียรภาพและมีผลตอบสนองในภาวะชั่วครู่ (transient response) ที่ดี

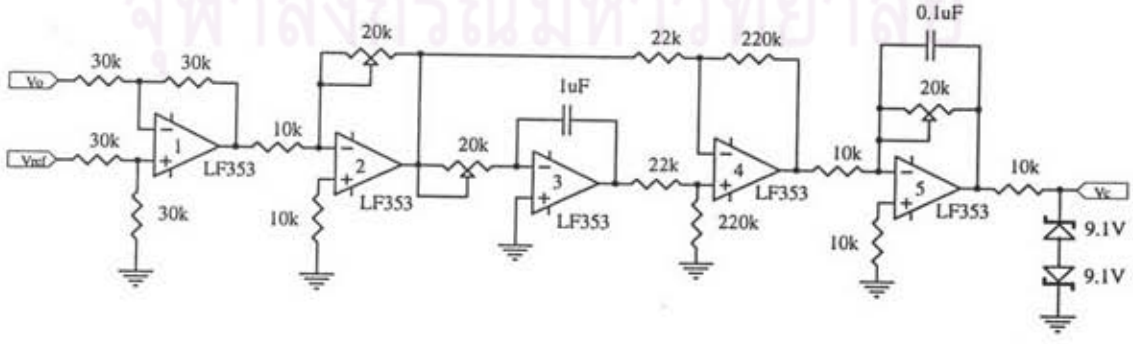
การทำงานวงจรในภาพที่ 2.13 ออปแอมป์ตัวแรกจะทำหน้าที่หาผลต่างระหว่าง Vref กับ Vo , ออปแอมป์ตัวที่ 2 จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากออปแอมป์ตัวแรกแบบกลับเฟสคือเป็นตัวกำหนดอัตราขยาย , ออปแอมป์ตัวที่ 3 ทำหน้าที่อินทิเกรทสัญญาณจากออปแอมป์ตัวที่ 2 คือเป็นตัวกำหนดค่าคงตัวเวลา T_1 , ออปแอมป์ตัวที่ 4 ทำหน้าที่ขยายผลต่างของสัญญาณที่ได้จากออปแอมป์ตัวที่ 2 และ 3 , ออปแอมป์ตัวที่ 5 เป็นวงจรสร้างขั้วคือเป็นตัวกำหนดค่าคงตัวเวลา T_2 โดยวิธีการนี้สามารถควบคุมค่าอัตราขยาย (Kp) และ ค่าคงตัวเวลา (T_1,T_2) ได้อย่างอิสระโดยไม่ขึ้นแก่กัน จากวงจรสามารถคำนวณหาสมการของวงจรคุมค่าได้ดังสมการ (24)

$$G_R = Kp\,(T_1s+1)/[T_1s(T_2s+1)] \quad \text{----------(24)}$$

โดย Kp = 13.9

T1 = 10 ms

T2 = 1.11 ms

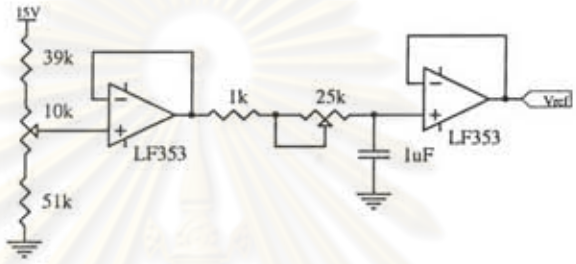


ภาพที่ 2.13 วงจรคุมค่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิง

การปรับค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ ทำได้โดยการปรับแรงดันอ้างอิงที่ได้จากวงจรสร้างแรงดันอ้างอิงดังภาพที่2.14 หน้าที่ของวงจรคือวงจรจะทำการหน่วงไม่ให้แรงดันอ้างอิงมีค่าเปลี่ยนแปลงเร็วเกินไปโดยใช้วงจร RC ซึ่งเราสามารถปรับอัตราการเพิ่มและอัตราการลดของแรงดันอ้างอิงได้ โดยการปรับความต้านทานของวงจร RC ซึ่งเป็นการปรับค่าคงตัวเวลาของวงจร RC นั่นเอง



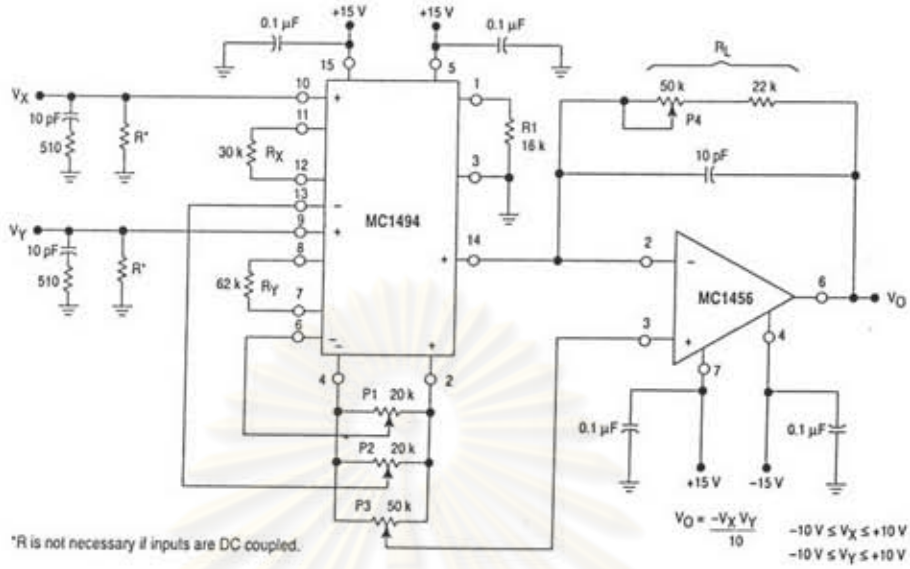
ภาพที่ 2.14 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิง

5.4 วงจรคูณสัญญาณ

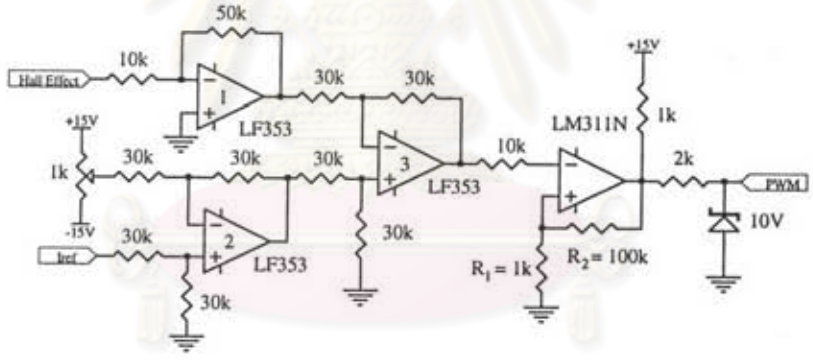
วงจรคูณทำหน้าที่คูณสัญญาณจากวงจรคุมค่ากับแรงดันที่ลดทอนมาจากแรงดันเฟสของสายกำลังเพื่อกำเนิดเป็นสัญญาณกระแสอ้างอิง วงจรคูณที่ใช้จะใช้ไอซีเบอร์ MC1494L (Motorola,1982) ร่วมกับไอซีเบอร์ MC1556U (Motorola,1982) ดังภาพที่ 2.15 ซึ่งมีฟังก์ชันการทำงานดังนี้คือสัญญาณด้านออกจะเป็นหนึ่งในสิบของผลคูณของสัญญาณด้านเข้า โดยสัญญาณด้านเข้าทั้งสองและสัญญาณทางด้านออกมีค่าสูงสุด ± 10 โวลต์[7]

5.5 วงจรเปรียบเทียบแบบมีแถบฮิสเตอริซิส

วงจรเปรียบเทียบแบบมีแถบฮิสเตอริซิส ได้แก่วงจรลั่นไกของชมิตต์ (Schmitt trigger) จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณกระแสที่วัดในแต่ละเฟส I กับสัญญาณที่ได้จากวงจรคูณซึ่งเป็นสัญญาณกระแสอ้างอิง Iref ดังภาพที่ 2.16 แล้วกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ PWM สัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์นี้สามารถนำไปควบคุมการตัดต่อสวิตช์ของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง โดยที่สัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์นี้จะมีองค์ประกอบหลักมูลของกระแสที่แปรตามสัญญาณกระแสอ้างอิง



ภาพที่ 2.15 วงจรคูณสัญญาณ



ภาพที่ 2.16 วงจรเปรียบเทียบแบบมีแถบฮิสเตอริซิส

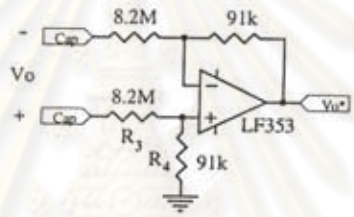
เนื่องจากตัวเปรียบเทียบสัญญาณจะให้สัญญาณค่าบวกและศูนย์ ค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบจึงมีแต่ค่าบวก ก่อนจะนำสัญญาณกระแสอ้างอิงไปเปรียบเทียบกับกระแสที่วัดได้ จึงต้องมีการยกระดับสัญญาณกระแสอ้างอิงก่อน โดยใช้ออปแอมป์ตัวที่ 2 เพื่อให้ค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบเสมือนมีทั้งค่าบวกและลบ ออปแอมป์ตัวแรกจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่วัดได้จากอุปกรณ์ Hall Effect ออปแอมป์ตัวที่ 3 ทำหน้าที่หาผลต่างระหว่างสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ถูกยกระดับกับกระแสที่วัดได้ สัญญาณจากออปแอมป์ตัวที่ 3 จะไปผ่านวงจรเปรียบเทียบสัญญาณแบบมีแถบฮีสเตอริซิส เพื่อกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์สำหรับควบคุมสวิตช์ต่อไป จากวงจรคำนวณหาค่าความกว้างของแถบฮิสเตอริซิสได้ดังสมการ (25)[8]

$$\Delta V \approx Vsupply \times R_1/(R_1+R_2) \quad \text{----------(25)}$$

กำหนดความกว้างของแถบฮิสเตอริซิสเป็น 0.15V ใช้แรงดันไฟเลี้ยง 15V แทนค่าลงในสมการที่ (25) จะได้ $R_1/(R_1+R_2) \approx 0.01$ เลือก R_1 เป็น 1kohm จะได้ $R_2 \approx 100$kohm

5.6 วงจรตรวจวัดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

การตรวจวัดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ จะต้องมีความเป็นเชิงเส้น (linearity) และมีการขจัดสัญญาณร่วม (common-mode rejection) ที่ดี ในที่นี้จึงใช้วงจรขยายผลต่างซึ่งใช้ความต้านทานค่าสูง ดังแสดงในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 วงจรตรวจวัดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

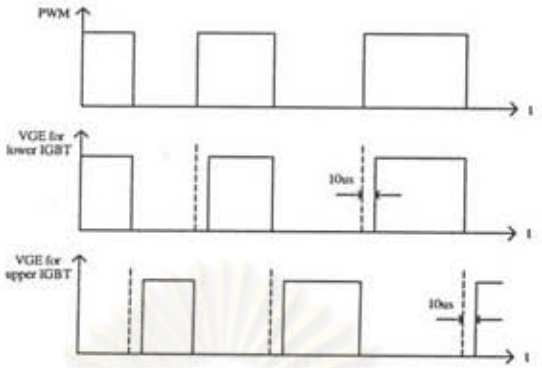
จากวงจรคำนวณหาค่าแรงดันด้านออกได้ดังสมการ (26)

$$V_O^* = (R_4/R_3)\times V_O \quad \text{----------(26)}$$

จะเห็นว่าแรงดันด้านออกจะมีความเป็นเชิงเส้นเมื่อเทียบกับแรงดันด้านเข้า

5.7 วงจรป้องกันการลัดวงจรผ่านสวิตช์

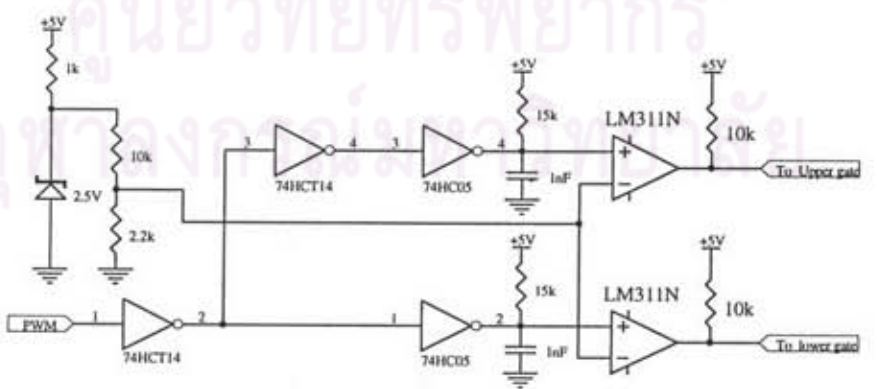
การสร้างสัญญาณขับนำ IGBT ต้องพิจารณาถึงเวลาเริ่มนำกระแส (turn on time) และเวลาหยุดนำกระแส (turn off time) ของ IGBT ที่ใช้เป็นสวิตช์ในวงจร เนื่องจากเวลาในการเริ่มนำกระแสของ IGBT โดยทั่วไปมักมีค่าน้อยกว่าเวลาในการหยุดนำกระแส ดังนั้นจึงต้องหน่วงเวลาในการเริ่มนำกระแสของ IGBT ให้มากกว่าเวลาหยุดนำกระแสของ IGBT โดยซีกบวกของสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์จะใช้ในการควบคุม IGBT ตัวล่าง ส่วนซีกศูนย์ของสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์จะใช้ในการควบคุม IGBT ตัวบน ดังในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 สัญญาณที่ใช้ควบคุม IGBT ตัวบนและตัวล่างของภาพที่ 2.1

IGBT ที่ใช้ในเครื่องแก้ตัวประกอบกำลังคือเบอร์ 1MBH60-100 มีเวลาหยุดนำกระแสประมาณ 2μs เพื่อความปลอดภัยจึงกำหนดให้เวลาที่ใช้ในการหน่วง (delay time ; td) สัญญาณขับนำ IGBT เท่ากับ 10 μs วงจรหน่วงเวลาแสดงในภาพที่ 2.19

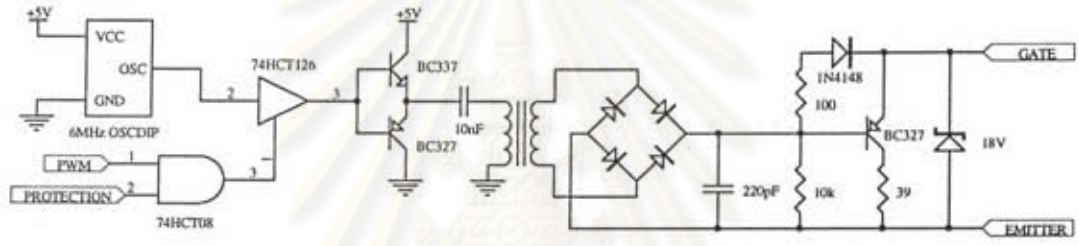
วงจรหน่วงเวลาที่ใช้อาศัยหลักการเมื่อสัญญาณจาก Not Gate เปลี่ยนเป็นสัญญาณ HI แรงดันที่เก็บตัวเก็บประจุจะค่อย ๆเพิ่มขึ้น โดยความเร็วในการเพิ่มแรงดันจะขึ้นกับค่าคงตัวเวลา RC เมื่อนำสัญญาณไปเปรียบเทียบกับค่าคงที่ก็จะได้สัญญาณที่ถูกหน่วงเวลาด้านขาขึ้น ส่วนขณะสัญญาณจาก Not Gate เปลี่ยนเป็น Low ตัวเก็บประจุจะถูกคายประจุอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นการคายประจุตรง ๆไม่ผ่านตัวต้านทานจึงไม่ทำให้สัญญาณขาลงถูกหน่วงเวลาแต่อย่างใด



ภาพที่ 2.19 วงจรหน่วงเวลาสัญญาณขับนำ IGBT

5.8 วงจรขับนำเกตของ IGBT

การขับนำเกตของ IGBT ที่ต่อแบบครึ่งบริดจ์ของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง จำเป็นต้องให้วงจรขับนำเกตมีการแยกโดด (isolate) ระหว่าง IGBT แต่ละตัว ดังนั้นการขับนำเกตของ IGBT จึงต้องใช้หม้อแปลงพัลส์เป็นตัวส่งผ่านสัญญาณไฟฟ้าจากวงจรกระตุ้นไปยังวงจรขับนำเกต แต่เนื่องจากการใช้วงจรเปรียบเทียบแบบมีแถบฮิสเตอริซิสเป็นตัวสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์สำหรับควบคุมสวิตช์ ความถี่การสวิตช์และ duty cycle จึงแปรค่าอยู่ในย่านที่กว้าง แต่หม้อแปลงพัลส์จะตอบสนองในย่านความถี่สูงและ duty cycle ไม่เกิน 0.5 เท่านั้น จำเป็นต้องใช้การแทรกพาหะความถี่สูงเข้าไปในสัญญาณที่ต้องการส่งผ่านหม้อแปลงพัลส์ เพื่อขับนำเกตของ IGBT[9] ดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 วงจรขับนำเกตที่ใช้พาหะความถี่สูงแทรกเข้าไปในสัญญาณขับนำเกต

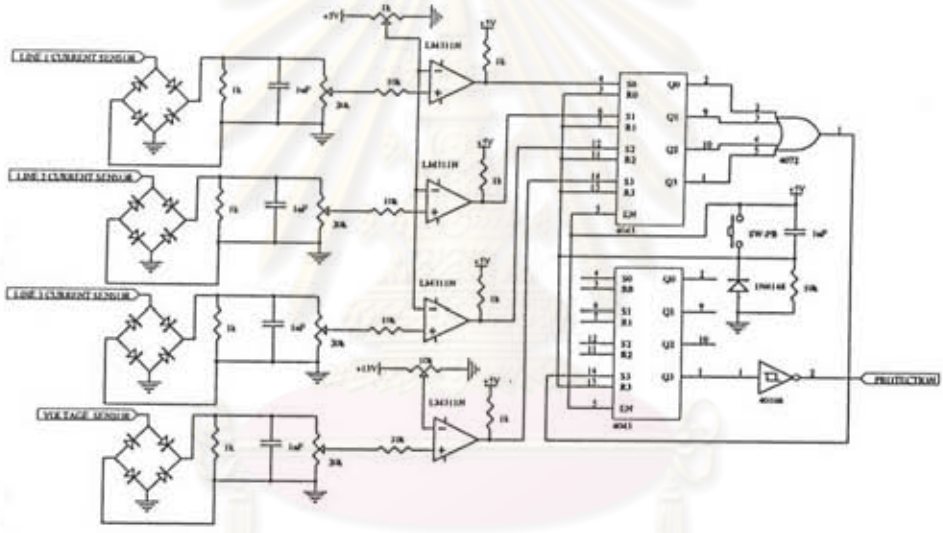
วงจรขับนำเกตนี้ อาศัยผลร่วมของสัญญาณ PWM และ PROTECTION เป็นตัวปล่อยสัญญาณความถี่สูงจากออสซิลเลเตอร์ไปขับนำทรานซิสเตอร์เพื่อป้อนแรงดันผ่านหม้อแปลงพัลส์ สัญญาณที่ส่งผ่านหม้อแปลงพัลส์มาจะถูกเรียงกระแสและกรองด้วยตัวเก็บประจุ แล้วจึงผ่านวงจรเร่งการหยุดนำกระแสของเกตโดยใช้ทรานซิสเตอร์ คือ ในขณะที่ผลร่วมของสัญญาณ PWM และ PROTECTION เป็น HI จะมีสัญญาณความถี่สูงจากออสซิลเลเตอร์ไปขับนำทรานซิสเตอร์เพื่อส่งสัญญาณผ่านหม้อแปลงพัลส์ จึงมีแรงดันไปขับนำเกต ส่วนขณะที่ผลร่วมของสัญญาณ PWM และ PROTECTION เป็น LOW จะไม่มีสัญญาณความถี่สูงจากออสซิลเลเตอร์ไปขับนำทรานซิสเตอร์ หม้อแปลงพัลส์จึงไม่ทำงาน ทำให้ไม่มีสัญญาณไปขับนำเกต

5.9 วงจรป้องกัน

ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง จำเป็นต้องมีวงจรป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์อันเนื่องมาจากกระแสเกินพิกัด , แรงดันเกินพิกัดเป็นต้น เนื่องจากเหตุผิดปกติเหล่านี้จะส่งผลให้อุปกรณ์ภาคกำลังเสียหายได้ คุณลักษณะที่สำคัญของวงจรป้องกันคือจะต้องมีการตอบสนอง

ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัด ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด (sensor) จะต้องมีทั้งความไวต่อการตอบสนองสัญญาณและความแม่นยำ

การป้องกันกระแสเกินพิกัด จะใช้อุปกรณ์ Hall Effect ในการตรวจวัดกระแสผ่านสวิตช์เพื่อเปรียบเทียบกับระดับแรงดันที่ตั้งไว้ ถ้าแรงดันที่ได้จากอุปกรณ์ Hall Effect มีค่ามากกว่าระดับแรงดันที่ตั้งไว้ วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ จะส่งสัญญาณไปเซ็ตให้ RS-FLIPFLOP ทำงานเพื่อส่งสัญญาณไปตัดการขับนำเกต พร้อมกันนั้นก็ส่งสัญญาณไปตัดแหล่งจ่ายออกจากจนกว่าจะมีการรีเซ็ต FLIPFLOP ดังกล่าว วงจรจึงจะสามารถทำงานได้อีก ทำนองเดียวกันการป้องกันแรงดันเกินพิกัดก็มีลักษณะเช่นเดียวกับการป้องกันกระแสเกินพิกัด คือจะใช้สัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจวัดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมาเปรียบเทียบกับระดับแรงดันที่ตั้งไว้ดังภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 วงจรป้องกันของเครื่องแก้ตัวประกอบกำลัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย