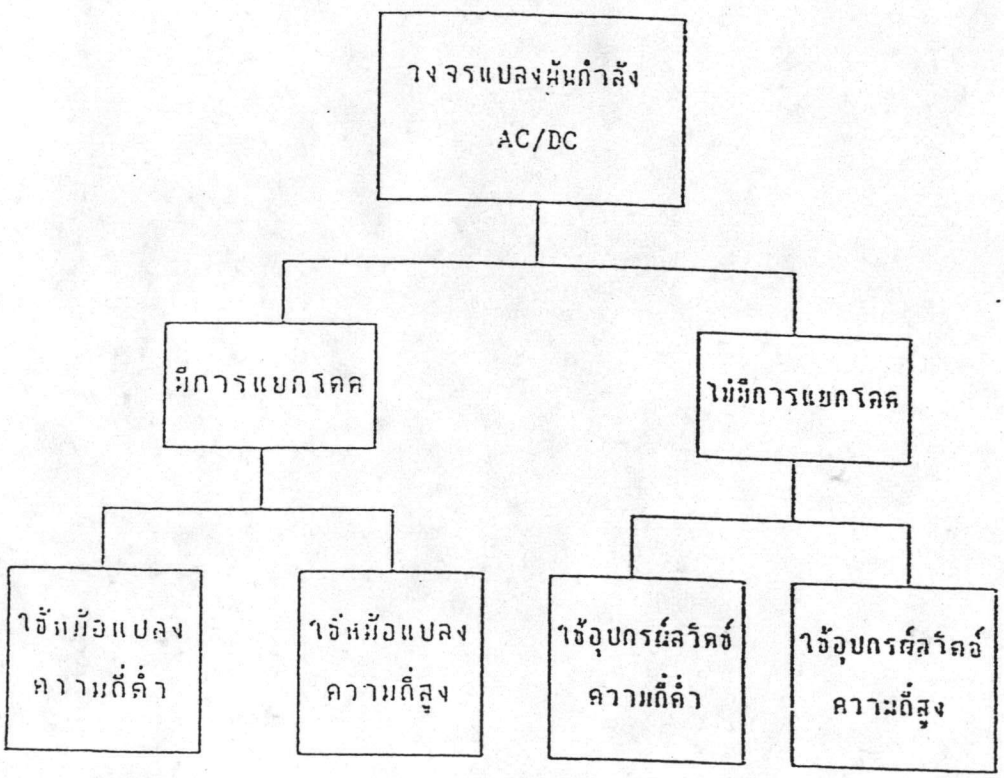
บทที่ 2

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

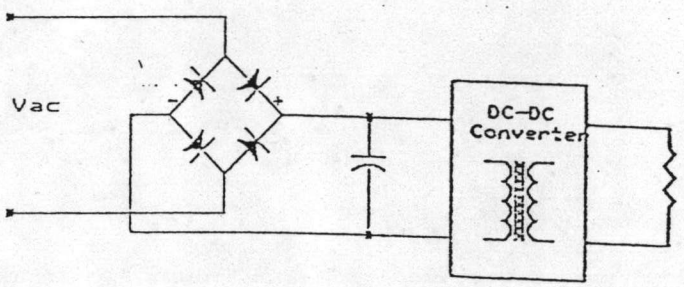
2.1 ชนิดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่นำมาใช้กับ UPS ในที่นี้จะทำหน้าที่แปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถคงค่าแรงดันกระแสตรงด้านออกได้ตามต้องการ เราสามารถแบ่งหลักการใหญ่ ๆ ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังรูปที่ 2.1 (เจิดกุล โสภาวนิตย์, 2532)



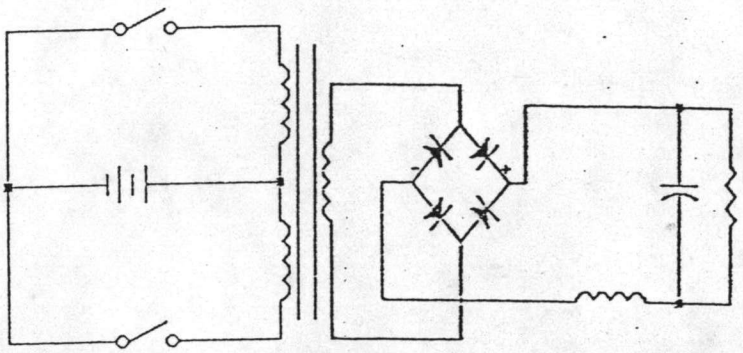
รูปที่ 2.1 ชนิดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบที่มีการแยกโดด (isolation) และให้ใช้หม้อแปลงความถี่สูง ส่วนใหญ่จะใช้ไดโอดต่อเป็นบริดจ์เพื่อแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง แล้วใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการแยกโดด เพื่อให้ได้ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตามต้องการ และมีความปลอดภัยในการใช้งาน เช่น วงจรจ่ายไฟในเรื่องคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 2.2

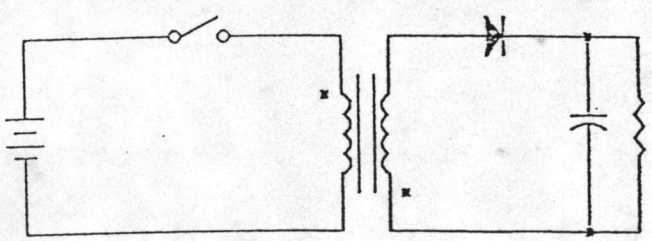


รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันที่มีการแยกโดดโดยใช้หม้อแปลงความถี่สูง

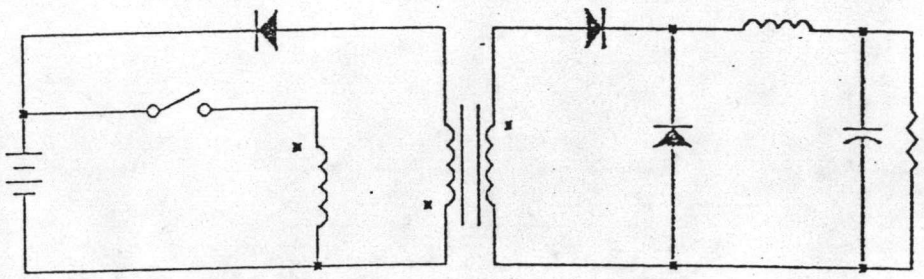
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการแยกโดดโดยหม้อแปลงความถี่สูงมีอยู่ด้วยกันหลายวงจร (เจิดกุล โสภาวนิตย์ ,2532) เช่น วงจรพุชพูล (push-pull) วงจรฟลายแบ็ก (flyback) วงจรไปหน้า (forward) วงจรบริดจ์เต็ม (full-bridge) วงจรกึ่งบริดจ์(half-bridge) วงจรบริดจ์อสมมาตร (asymmetrical-bridge) ดังในรูปที่ 2.3-รูปที่ 2.8



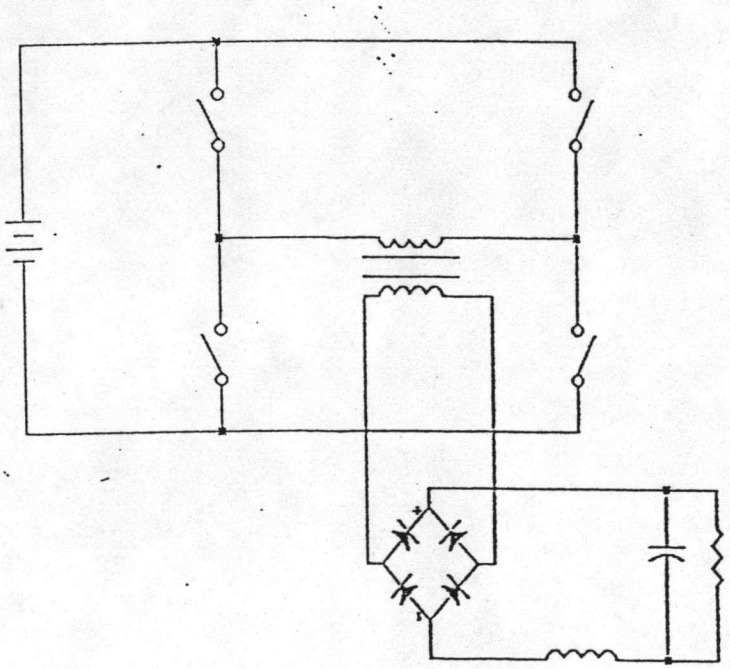
รูปที่ 2.3 วงจรพุชพูล



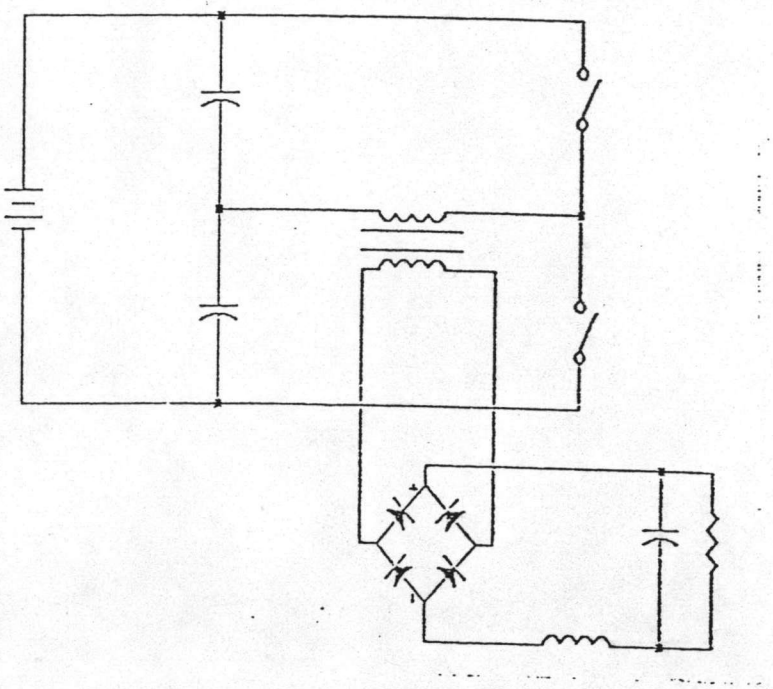
รูปที่ 2.4 วงจรฟลายแบ็ก



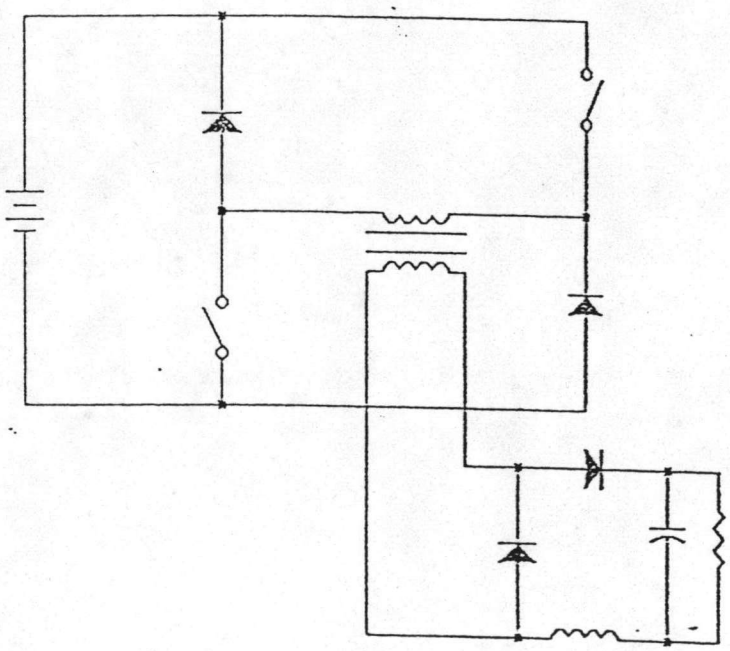
รูปที่ 2.5 วงจรไปหน้า



รูปที่ 2.6 วงจรบริดจ์เต็ม



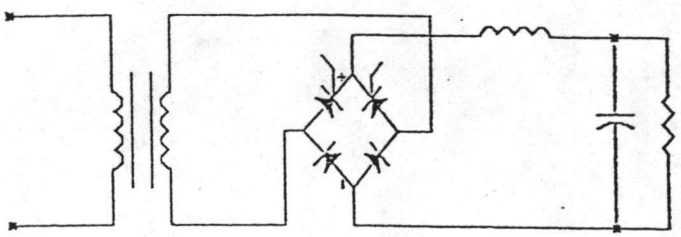
รูปที่ 2.7 วงจรกึ่งบริดจ์



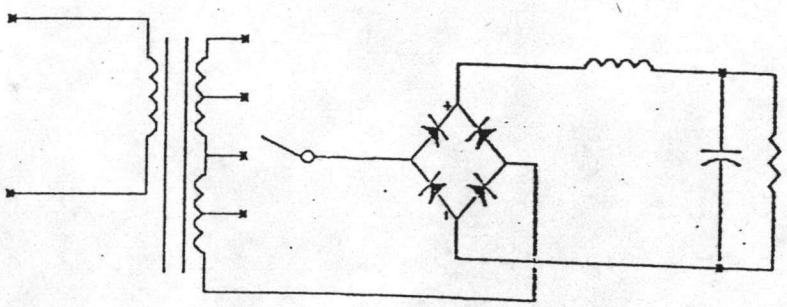
รูปที่ 2.8 วงจรบริดจ์อสมมาตร

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่กล่าวมาแล้วนั้นมีข้อดีและข้อเสียต่างๆ กัน (เจิดกุล โสภาวนิตย์ , 2532) ทั้งในแง่ของสวิตช์และขนาดของหม้อแปลง เช่น วงจรไปหน้าต้องใช้หม้อแปลงที่มีขดลวดเพิ่มอีกหนึ่งขดเพื่อใช้ในการรีเซต (reset) กระแสแมกนิไตซิง วงจรบริดจ์เต็มสามารถใช้สวิตช์ที่ทนกระแสได้ต่ำกว่าวงจรกึ่งบริดจ์ที่กำลังเท่ากัน เพราะกำลังที่จ่ายออกมีค่าเท่ากับผลคูณของแรงดันคร่อมหม้อแปลงกับกระแส ในวงจรบริดจ์เต็มแรงดันคร่อมหม้อแปลงมีค่าเท่ากับแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้ ส่วนในวงจรกึ่งบริดจ์แรงดันคร่อมหม้อแปลงมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้ ดังนั้นกระแสของวงจรกึ่งบริดจ์ที่จ่ายกำลังเท่ากับวงจรบริดจ์เต็มจึงมีค่าเป็น 2 เท่าของวงจรบริดจ์เต็ม วงจรบริดจ์อสมมาตรมีกระแสทำแม่เหล็กไหลในทิศทางเดียวและต้องมีการรีเซท (reset) กระแสแมกนิไตซิงก่อนการทำงานในรอบใหม่ ซึ่งเป็นการใช้หม้อแปลงอย่างไม่คุ้มค่าแต่มีข้อดี คือไม่เกิดแรงดันยอดแหลม (spike) ในสวิตช์ในขณะที่สวิตช์ตัดวงจร ดังนั้น ในการที่จะเลือกใช้โครงสร้างของวงจรใดต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของแต่ละงานว่าสมควรใช้วงจรใด

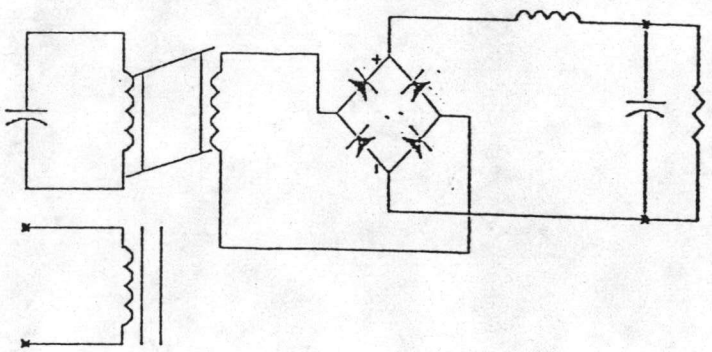
สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกโดดโดยใช้หม้อแปลงความถี่ต่ำ วงจรที่ใช้คุมค่าแรงดันออกมีอยู่ด้วยกันหลายวงจรเช่น วงจรควบคุมเฟส (phase control)วงรเปลี่ยนจุดต่อแยกหม้อแปลง (tap-change) วงจรเฟอร์โรเรโซแนนซ์ (ferroresonance) ดังในรูปที่ 2.9-รูปที่ 2.11



รูปที่ 2.9 วงจรควบคุมเฟสที่มีหม้อแปลงแยกโดด

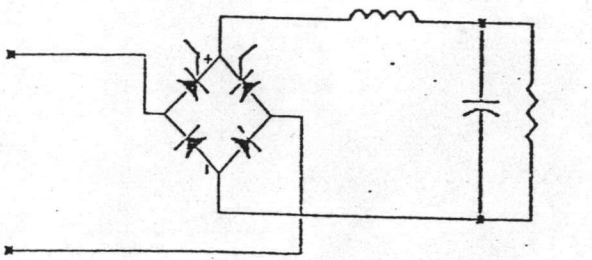


รูปที่ 2.10 วงจรเปลี่ยนจุดต่อแยกหม้อแปลง

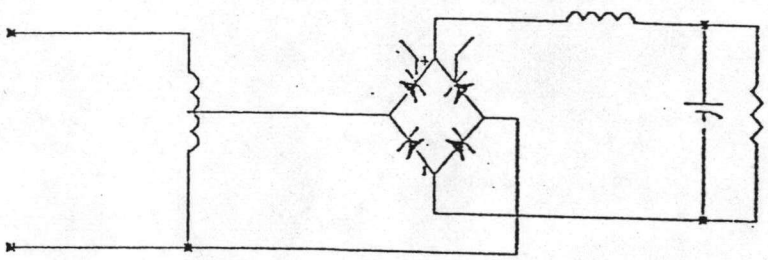


รูปที่ 2.11 วงจรเฟอร์โรเรโซแนนซ์

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีการแยกโดดและจะใช้สวิตช์ความถี่ต่ำ มักใช้หลักการควบคุมเฟส ดังวงจรในรูปที่ 2.12 และอาจมีการเพิ่มหม้อแปลงเพื่อช่วยในการลดแรงดันดังในรูปที่ 2.13

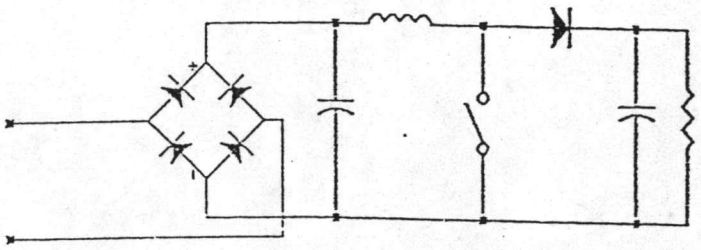


รูปที่ 2.12 วงจรควบคุมเฟส



รูปที่ 2.13 วงจรควบคุมเฟสแบบมีหม้อแปลงลดแรงดัน

สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีการแยกโดดและใช้อุปกรณ์สวิตช์ที่ความถี่สูงวงจรส่วนใหญ่จะใช้ไดโอดต่อ เป็นบริดจ์ แปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงแล้วใช้วงจรทบระดับ (boost) หรือทอนระดับ(buck)เพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าตรงให้ได้ตามต้องการดังวงจรในรูปที่ 2.14

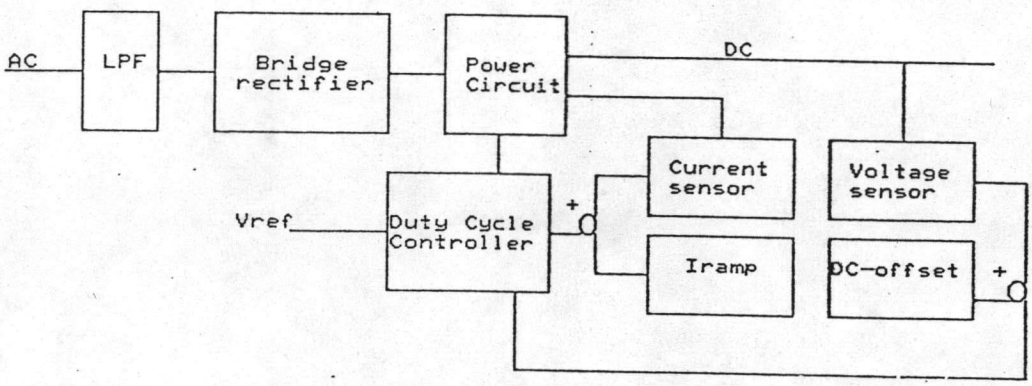


รูปที่ 2.14 วงจรแปลงผันที่ไม่มีการแยกโดดและใช้สวิตช์ความถี่สูง

จากที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจะเห็นว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนใหญ่จะใช้วงจรเรียงกระแสแล้วใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวกรองแรงดันด้านออก ซึ่งการใช้ตัวเก็บประจุในการกรองแรงดันด้านออกนั้นจะทำให้รูปคลื่นกระแสด้านเข้ามีลักษณะเป็นกระแสอิมพิลส์อันเนื่องมาจากการประจุตัวเก็บประจุซึ่งตามหลักของอนุกรมฟูเรียร์ รูปคลื่นกระแสอิมพิลส์ดังกล่าวจะประกอบด้วยความถี่พื้นฐานและฮาร์มอนิกอันดับสูงมากมาย และฮาร์มอนิกส์อันดับสูงเหล่านี้จะทำให้เกิดการรบกวนต่อวงจรภายนอกที่ใช้สายจ่ายเดียวกับวงจรแปลงผันนี้ ซึ่งอุปกรณ์บางประเภท จะมีความไวต่อกระแสฮาร์มอนิกเหล่านี้มาก และอาจเกิดความเสียหายได้ นอกจากจะก่อให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับสูงขึ้นในสายจ่ายแล้ววงจรแปลงผันกำลังดังกล่าวยังมีค่าตัวประกอบกำลัง (power factor) ที่ค่อนข้างต่ำ นั่นคือในขณะที่วงจรจ่ายโหลดด้วยกำลังจริงค่าหนึ่ง (active power) ในสายจ่ายจะจ่ายกำลังเสมือน (reactive power) ซึ่งเป็นกำลังไฟที่ไม่ถูกใช้เป็นกำลังออกในโหลดแต่จำเป็นที่จะต้องจ่ายให้แก่วงจร

ดังนั้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงในที่นี้จึงเลือกใช้วงจร SMR (switchmode rectifier) ซึ่งเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ทำหน้าที่แปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยการควบคุม

การตัด-ต่อสวิตช์ที่ความถี่สูง และมีการกรองทำให้สามารถฮาร์มอนิกอันดับสูงลงมาอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ในขณะเดียวกันยังสามารถทำให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้ามีค่าเข้าใกล้หนึ่งอีกด้วย ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น และวงจร SMR นี้มีลักษณะโครงสร้างดังในรูปที่ 2.15

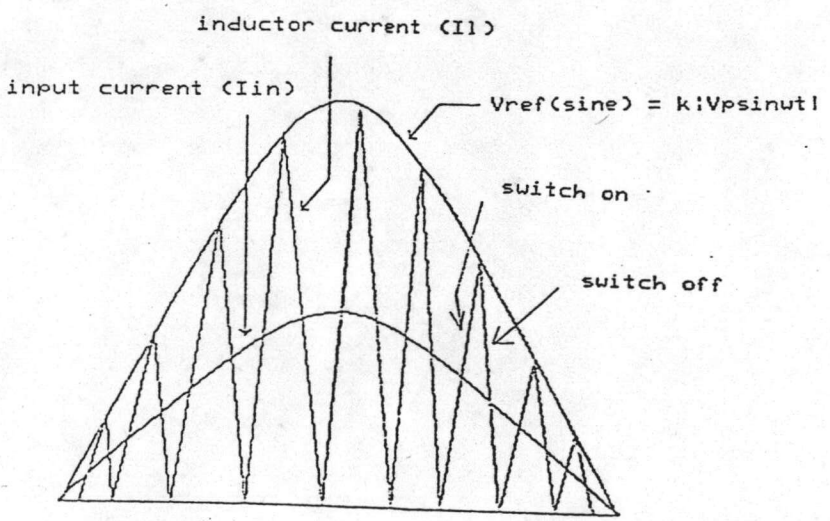


รูปที่ 2.15 แผนภาพบล็อกของวงจร SMR

2.2 หลักการทำงานของวงจร SMR

วงจร SMR ทำงานโดยการตัด-ต่อสวิตช์ด้วยความถี่สูง และมีโครงสร้างของวงจรภาคกำลังเป็นแบบวงจรทบระดับ (boost) ซึ่งเป็นรูปแบบของวงจรที่มีความเหมาะสมมาก ในการที่จะควบคุมเพื่อให้มีตัวประกอบกำลังมีค่าเข้าใกล้หนึ่งเนื่องจากวงจรทบระดับ (boost) มีตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมอยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งจะมีผลทำให้เกิดคลื่นรบกวนทางแม่เหล็ก(EMI)น้อย เมื่อวงจรทำงานที่โหมดต่อเนื่อง (C.Zhou , R.B.Ridley and F.C. lee , 1990) และเนื่องจากการที่มีโครงสร้างของวงจรภาคกำลังเป็น

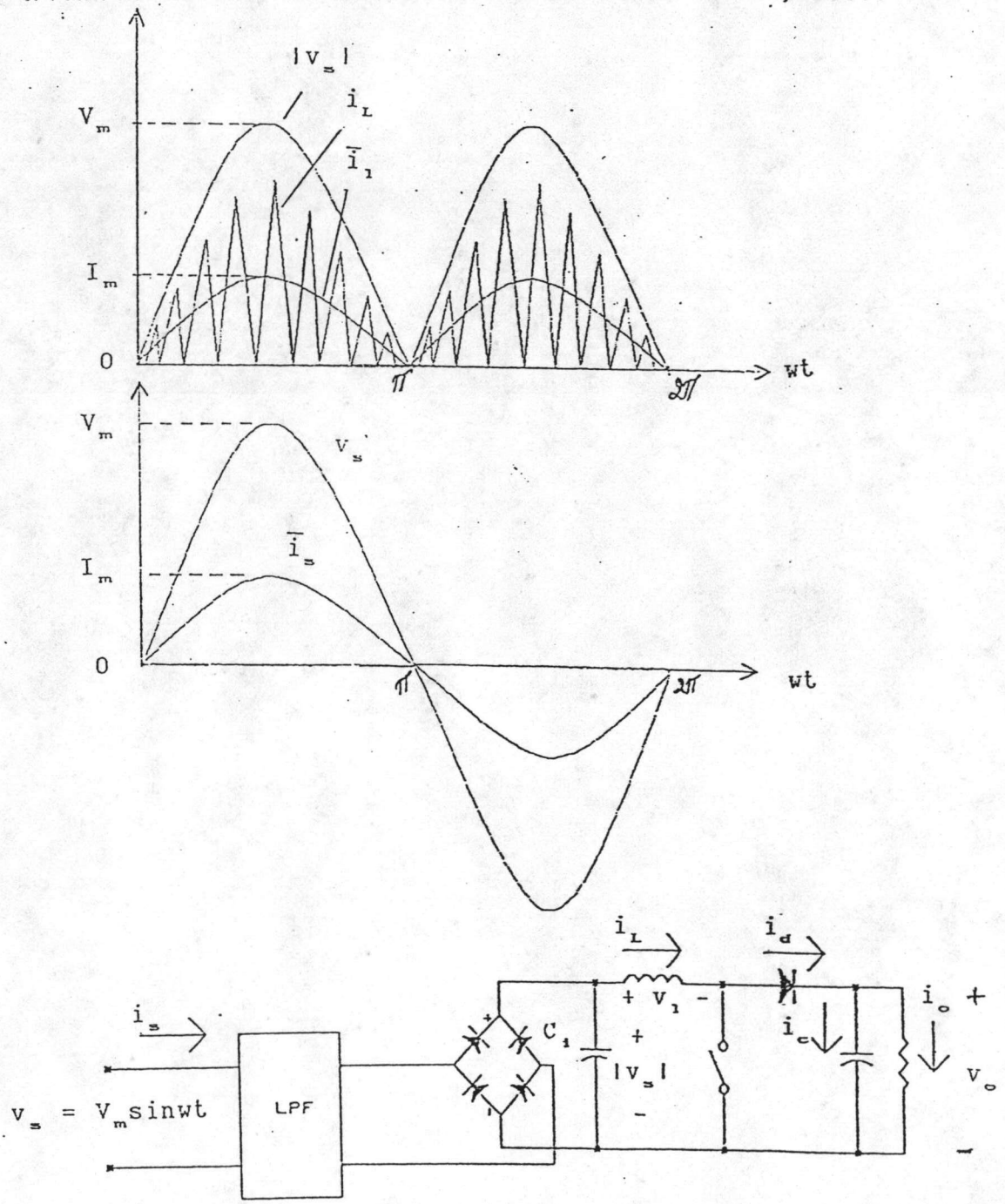
วงจรทบระดับ(boost) จึงทำให้แรงดันออก มีระดับแรงดันมีค่าสูงกว่าระดับแรงดันด้านเข้า จากรูปที่ 2.15 เมื่อสวิตช์ต่อวงจรจะทำให้มี กระแสในผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีอัตราการเพิ่มด้วยความชัน ของกระแสเป็นบวกและเมื่อค่ากระแสดังกล่าวเพิ่มขึ้นถึงค่าอ้างอิง ที่เป็นสัดส่วนกับจุดใดจุดหนึ่งบนรูปคลื่นไซน์ สวิตช์จะทำการตัดวงจร กระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำ จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำไบแอสให้ไดโอดนำกระแส กระแสเหนี่ยวนำ จะไหลผ่านตัวเก็บประจุ และกระแสนี้จะมีค่าลดลงด้วยความชันเป็นลบเมื่อกระแสนี้ลดลงจนเป็นศูนย์ สวิตช์จะทำการต่อวงจรอีกครั้ง กระแสในตัวเหนี่ยวนำก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอีกเหมือนในครั้งแรก และเมื่อถึงค่าอ้างอิงที่เป็นสัดส่วนกับรูปคลื่นไซน์ก็จะทำการตัดวงจร ซึ่งการทำงานจะเป็นไปในลักษณะนี้ตลอด การสวิตช์ดังกล่าวจะมีความถี่ที่สูงกว่าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับมากคือ ประมาณ 25-100 kHz ขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำและขนาดโหลดใช้งาน คือ ถ้าวงจรมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำวงจรจะมีความถี่สูงหรือ ถ้ากระแสโหลดมีค่าต่ำความถี่ก็จะมีค่าสูงด้วย ในทางตรงข้ามถ้าวงจรมีค่าความเหนี่ยวนำสูง หรือมีค่ากระแสโหลดมาก วงจรก็จะทำงานที่ความถี่ต่ำ รูปคลื่นกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำนี้มีลักษณะดัง รูปที่ 2.16 เมื่อกรองรูปคลื่นกระแสนี้ด้วยวงจรกรองผ่านต่ำ จะได้รูปคลื่นกระแส ที่มีลักษณะใกล้ไซน์ ที่มีค่าตัวประกอบกำลังที่มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง



รูปที่ 2.16 รูปคลื่นของกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำและกระแสด้านเข้าของวงจร SMR.

2.3 สมการพื้นฐานของวงจร SMR

วงจรทบระดับ เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เราจึงต้องใช้วงจรเรียงกระแสที่ใช้ไดโอด เพื่อแปลงผันแรงดันไฟฟ้าสลับเป็นค่าสัมบูรณ์ของไซน์ จากนั้นจึงใช้วงจรทบระดับแปลงผันค่าสัมบูรณ์ของไซน์เป็นแรงดันไฟตรง ซึ่งวงจรและรูปคลื่นของวงจรมีลักษณะดังรูปที่ 2.17 และสามารถคำนวณค่าความสัมพันธ์ต่างของวงจรได้ดังนี้ (โดทม อารียา , 2537)



รูปที่ 2.17 แสดงวงจร SMR ทบระดับและรูปคลื่นของวงจร

2.3.1 ค่าวัฏจักรงานของวงจร SMR

เพื่อให้ได้แรงดันด้านออก v_o เป็นแรงดันไฟตรงหรือ $v_o-\langle v_o\rangle$ วัฏจักรงานของวงจรทบระดับจะต้องเป็นฟังก์ชันของเวลาดังนี้

$$d' \simeq |v_s|/\langle v_o\rangle \text{ หรือ}$$

$$d \simeq 1-|v_s|/\langle v_o\rangle \qquad (2.1)$$

อย่างไรก็ตามสมการที่ (2.1) เป็นเพียงสมการใกล้เคียงเนื่องจาก v_o ไม่ใช่แรงดันไฟตรงแต่จะมีฮาร์มอนิกที่ 2 รวมอยู่ด้วยเสมอ อีกทั้งยังละเลยผลของตัวเหนี่ยวนำในการเขียนสมการ

วงจรในรูปที่ 2.17 นอกจากจะประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสและวงจรทบระดับแล้ว ยังมีวงจรกรองผ่านต่ำเพื่อกรองความถี่ของการสวิตช์ออกให้เหลือเฉพาะความถี่มูลฐานเท่านั้น ซึ่งจะทำให้กระแสด้านเข้ามีลักษณะใกล้ไซน์ ส่วนตัวเก็บประจุ Ci ซึ่งมีค่าเล็กใส่ไว้ระหว่างวงจรเรียงกระแสกับวงจรทบระดับเพื่อช่วยกรองความถี่การสวิตช์เช่นกัน

2.3.2 ค่าระลอกของแรงดันด้านออก

จากรูปที่ 2.17 จะเห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบของการตัด-ต่อวงจรเป็นรูปสามเหลี่ยม ดังนั้น ค่ากระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำเฉลี่ย $\bar{i}_1$ จึงมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่ายอดของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำนั่นคือ

$$\bar{i}_1 = (\text{ค่ายอดของ } i_L)/2$$

$\bar{i}_1$ หมายถึงค่าเฉลี่ยเฉพาะที่(ค่าเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์)ซึ่งเป็นค่าสัมบูรณ์ของไซน์ (ดูรูปที่ 2.17)

สมมุติว่าสวิตช์ไวงานและไดโอดไม่มีการสูญเสีย เมื่อใช้ทฤษฎีบทของเทลเลเจน (Tellegen) กับวงจรทบระดับ สำหรับค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ (กรององค์ประกอบความถี่สูงออกแล้ว) จะได้

$$|v_s|\bar{i}_1 = \bar{v}_1\bar{i}_1 + v_o i_o + v_o\bar{i}_c \qquad (2.2)$$

ทำการคำนวณโดยใกล้เคียงโดยมีสมมุติฐานดังนี้ L มีค่าเล็ก จึงละเลยเทอม $\bar{v}_1\bar{i}_1$ ให้ $v_o = \langle v_o\rangle + v_{or}$ โดยที่ v_{or} คือค่าระลอก ในการคำนวณขั้นต้นเราจะละเลยค่าระลอก v_{or} ดังนั้นจากสมการที่ (2.2) จะได้

$$|v_s|\bar{i}_1 \simeq \langle v_o\rangle i_o + \langle v_o\rangle\bar{i}_c \qquad (2.3)$$

แต่ $|v_s|$ และ i_1 ต่างก็เป็นค่าสัมบูรณ์ของไซน์และมีแอมปลิจูดเท่ากับ V_m และ I_m ตามลำดับ ดังนั้น

$$|v_s|\bar{i}_1 = [(V_mI_m) - (V_mI_m\cos 2wt)]/2 \qquad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.3) และ (2.4) จะได้

$$i_o = (V_mI_m)/2\langle v_o\rangle \quad , \quad \bar{i}_c = -\, i_o\cos 2wt \qquad (2.5)$$

จากค่ากระแส i_c สามารถประมาณค่าของ v_{or} ได้ดังนี้

$$v_{or} = (1/C_o)\int\bar{i}_c\,dt$$
$$= -\,(i_o/2C_ow)\sin 2wt \qquad (2.6)$$

สมการที่ (2.6) แสดงว่าเพื่อความสมดุลของกำลัง แรงดันออกจะต้องมีระลอกที่ความถี่ 2w เสมอ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ถ้าพยายามคงค่า v_o ให้มีแต่ค่าไฟตรง จะทำให้กระแสด้านเข้าเพี้ยนไปจากรูปไซน์

2.3.3 ความถี่สวิตช์ของวงจร SMR

จากรูปที่ (2.16)

I = ค่ายอดถึงยอดของกระแสระลอก

f = ความถี่สวิตช์

T_{on} = ช่วงเวลาที่สวิตช์ต่อวงจร

T_{off} = ช่วงเวลาที่สวิตช์ตัดวงจร

เราสามารถคำนวณเวลาที่สวิตช์ต่อวงจรและตัดวงจรได้ดังนี้

$$T_{on} = L\ I/|v_s| \tag{2.7}$$

$$T_{off} = L\ I/(\langle v_o \rangle - |v_s|) \tag{2.8}$$

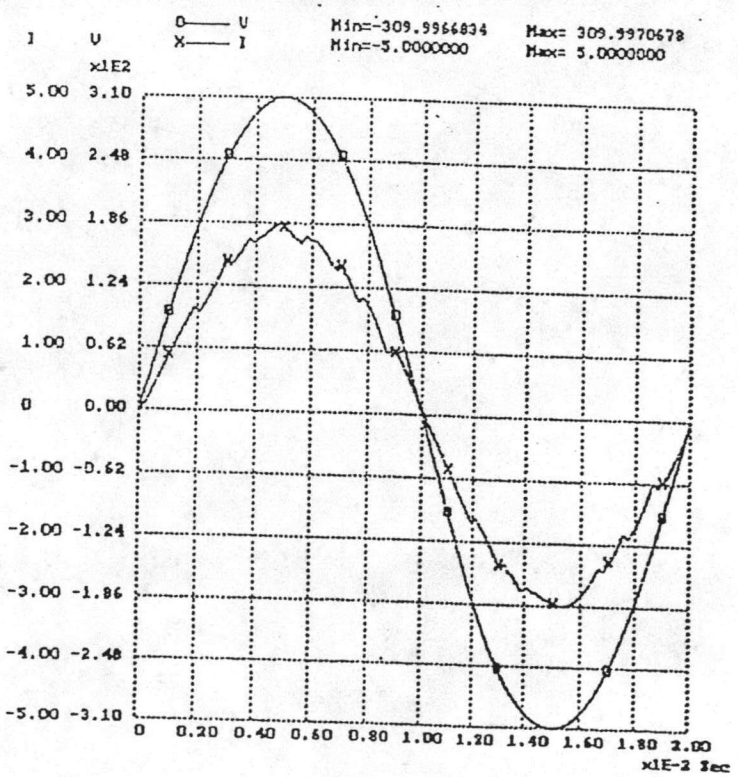
ดังนั้นความถี่สวิตช์เท่ากับ

$$f = 1/(T_{on} + T_{off}) \tag{2.9}$$

$$f = \{\langle v_o \rangle - |v_s|\}|v_s|/L\ I\langle v_o \rangle \tag{2.10}$$

จากสมการที่ (2.10) จะเห็นว่าความถี่ของการสวิตช์จะแปรผกผันกับค่าตัวเหนี่ยวนำ (L) และค่าระลอกกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งหมายความว่าที่วงจรกำลังเดียวกันเมื่อจ่ายกระแสโหลดเพิ่มขึ้น ค่า I ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังนั้นความถี่สวิตช์จึงมีค่าลดลง ในทางกลับกันเมื่อจ่ายกระแสโหลดลดลงความถี่สวิตช์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น และสำหรับกรณีที่จ่ายโหลดเท่ากันวงจรที่มีค่าตัวเหนี่ยวนำมากกว่าจะมีความถี่สวิตช์น้อยกว่าวงจรที่มีค่าตัวเหนี่ยวนำน้อยกว่า

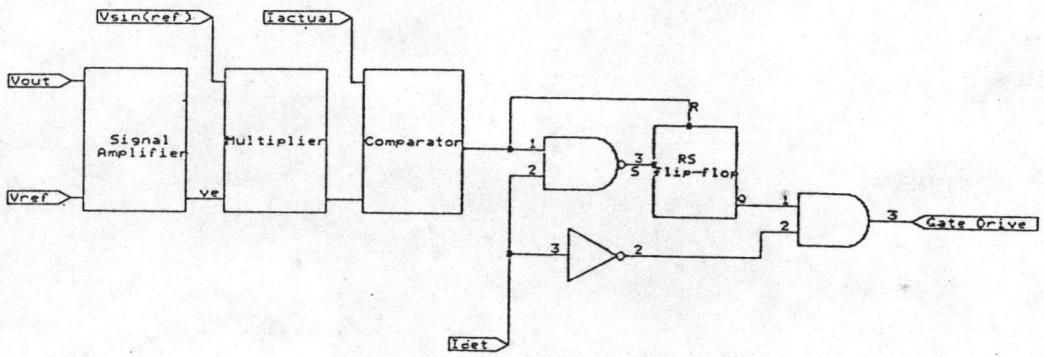
จากหลักการทำงานของวงจร SMR เราสามารถทำการชีมูเลตโดยใช้โปรแกรม LEK (เอกชัย ลีลารัศมี , 2536) เพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมได้ และจากการชีมูเลตค่าความเหนี่ยวนำมีค่า 1 mH เพราะถ้ามีค่ามากกว่านี้เมื่อโหลดวงจรจนเต็มพิกัด จะทำให้ความถี่ในการสวิตช์มีค่าต่ำกว่า 20 kHz ได้ซึ่งจะทำให้เกิดเสียงรบกวนขึ้นได้แต่ถ้าค่าตัวเหนี่ยวนำมีค่าน้อยกว่านี้จะทำให้ความถี่ในการสวิตช์มีค่ามากเกินไป จนอาจทำให้สวิตช์ทำงานไม่ทัน ส่วนค่าตัวเก็บประจุนั้นเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุขนาด 50 uF ซึ่งจะทำให้แรงดันออกมีค่าแรงดันระลอกไม่มากเกินไป (จากสมการที่ (2.6) $v_{or} = \pm 35\sin 2wt$ V คือมีค่าระลอกของแรงดันมากสุด 75 V_{p-p} ซึ่งมีค่าเป็น 15.5% ของแรงดันออก) สำหรับรูปแรงดันด้านขาเข้าและกระแสด้านเข้าของวงจร SMR ที่มีค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเท่ากับที่กล่าวมาแล้วนั้นเป็นดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แรงดันขาเข้าและกระแสขาเข้าของวงจร SMR (ชีมูเลต)

2.4 วงจรส่วนควบคุม

วงจรควบคุมการทำงานของวงจร SMR จะใช้ IC เบอร์ TDA 4814 ซึ่งมีแผนภาพบล็อกดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แผนภาพบล็อกของวงจรควบคุมการทำงานของวงจร SMR

จากรูปที่ 2.19 สามารถอธิบายสัญญาณในส่วนต่าง ๆได้ดังนี้

V_{out} = แรงดันที่แบ่งมาจากแรงดันขาออกของวงจร เพื่อใช้ในการคงค่าแรงดันขาออกไว้

V_{ref} = แรงดันอ้างอิงที่กำเนิดขึ้นภายในเป็น IC มีขนาด 2 Vdc

$V_{sin}(ref)$ = แรงดันไซน์อ้างอิงที่แบ่งมาจากแรงดันทางด้านเข้าที่ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์แล้ว

V_e = สัญญาณความคลาดเคลื่อนของแรงดันด้านออกกับแรงดันอ้างอิง

I_{actual} = สัญญาณกระแสผ่านสวิตช์

I_{det} = สัญญาณจากวงจรตรวจจับกระแสผ่านศูนย์

การทำงานของวงจรควบคุมเป็นดังนี้คือ เมื่อเริ่มต้นการทำงานสัญญาณแรงดัน V_{out} จะมีค่าน้อยกว่าที่เราออกแบบไว้ให้วงจรคงค่าแรงดันไว้ ดังนั้นแรงดัน V_{out} จะมีค่ามีค่าน้อยกว่า V_{ref} มากทำให้ออปแอมป์อยู่ในสภาวะอิ่มตัวและส่งสัญญาณระดับแรงดัน V_{cc} ออกมาเป็น V_s ซึ่งสัญญาณ V_s นี้จะถูกวงจรคูณเข้ากับ $V_{sin}(ref)$ แล้วสัญญาณที่ได้จะถูกส่งไปยังขาเข้าไม่กลับชั้วของออปแอมป์ ในขณะที่สัญญาณ I_{actual} จะถูกส่งไปยังขาเข้ากลับชั้วของออปแอมป์แต่ในสภาวะเริ่มต้นสวิตช์ยังอยู่ในสภาวะตัดวงจร ดังนั้น $I_{actual} = 0$ ดังนั้นสัญญาณออกจากวงจรเปรียบเทียบจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัว และให้สัญญาณออกเป็น +Vcc ในขณะที่วงจรยังไม่ทำงาน สัญญาณ I_{det}(ขา14) จะอยู่ในสภาวะ "0" เมื่อผ่าน NAND GATE จะส่งผลให้ อาร์เอสฟลิปฟลอปอยู่ในสภาวะค้างค่า (latch) จะพบว่าวงจรจะไม่สามารถทำงานได้เลยคือจะไม่เกิดการสวิตช์ขึ้น จึงต้องอาศัยวงจรเริ่มทำงาน (start) ที่จะกำเนิดพัลส์บวก (positive pulse) เพื่อไปทำให้ฟลิปฟลอปหยุดการค้างค่า และส่งสัญญาณควบคุมออกไปได้ เมื่อวงจรเริ่มทำงานตามปกติแล้ว วงจรเริ่มทำงานจะต้องมีผลต่อวงจรน้อยมาก ซึ่งจะกล่าวถึงวงจรนี้ในตอนหลังโดยใช้ชื่อว่าวงจรจุดชนวน สมมุติว่ามีสัญญาณพัลส์บวกมาเข้าที่ขา I_{det}ของ IC จะทำให้ฟลิปฟลอบส่งสัญญาณเป็น "1 " ที่ขา Q ขณะที่อยู่ในช่วงของขาขึ้นของพัลส์บวก และฟลิปฟลอปจะอยู่ในสภาวะค้างค่าสัญญาณออกไว้อีกครั้งหนึ่ง เมื่ออยู่ช่วงขอบขาลงของพัลส์บวกส่งผลให้สัญญาณออกของ AND GATE อยู่ในสภาวะ "1" และสวิตช์จะต่อวงจร

เมื่อวงจรทำงานที่สภาวะปกติจะพบว่าสัญญาณจาก signal amplifier จะมีขนาดแปรตามความแตกต่างของสัญญาณ V_{out} และ V_{ref} ซึ่งในขณะนี้สัญญาณทั้งสองจะมีขนาดใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะแตกต่างกันอยู่ในช่วง mV และออปแอมป์จะทำงานอยู่ในช่วงเชิงเส้น เมื่อขนาดของ V_{out} แตกต่างจากระดับแรงดันที่ต้องการคงค่าไว้ขนาดของสัญญาณออกของ signal amplifier จะถูกขยายแล้วคูณเข้ากับ $V_{sin}(ref)$ ทำให้ขนาดของ $V_{sin}(ref)$ เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามขนาดของสัญญาณออกของ signal amplifier เมื่อแรงดันออกต่ำกว่าแรงดันที่จะคงค่าไว้ V_{out} ก็จะต่ำกว่า V_{ref} ทำให้ขนาดของสัญญาณออกจาก signal amplifier มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นผลให้ขนาดของ

$V_{sin}(ref)$ มีขนาดใหญ่ขึ้น กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ก็จะมีค่ามากขึ้น แรงดันออกก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยจึงทำให้สามารถคงค่าแรงดันออกเอาไว้ได้ เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

จากที่กล่าวข้างต้นเมื่อสวิตช์ต่อวงจรและฟลิปฟลอปอยู่ในสภาวะค้างค่าแล้วนั้น กระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ L จะมีค่าตามสมการ

$$v_L = Ldi_L/dt$$

$$di_L/dt = v_L/L = |v_s|/L \qquad (2.11)$$

ค่ากระแส i_L จะมีความชันเป็นบวกและมีค่าคงที่ในช่วงเวลาสั้นๆ ของการสวิตช์ แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L จะเป็นบวกเท่ากับ $|v_s|$ แรงดันตกคร่อมทางด้านทุติยภูมิที่พันเชื่อมโยง (Coupling) ผ่านแกนเดียวกันจะมีแรงดันเป็นบวกด้วย มีผลทำให้สัญญาณที่ขา I_{det} อยู่ในสภาวะ "0" ขณะที่ฟลิปฟลอปยังคงอยู่ในสภาวะค้างค่าเหมือนเดิมและสวิตช์ยังคงต่อวงจร จนกระทั่งกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มถึงค่าๆหนึ่งบนรูปคลื่นไซน์อ้างอิง วงจรเปรียบเทียบ (comparator) จะส่งสัญญาณ "0" ทำให้ฟลิปฟลอปอยู่ในสภาวะรีเซท (reset) สวิตช์จะตัดวงจรเมื่อสวิตช์ตัดวงจรกระแสตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าตามสมการ

$$v_L = Ldi_L/dt$$

$$= |v_s| - \langle v_o \rangle$$

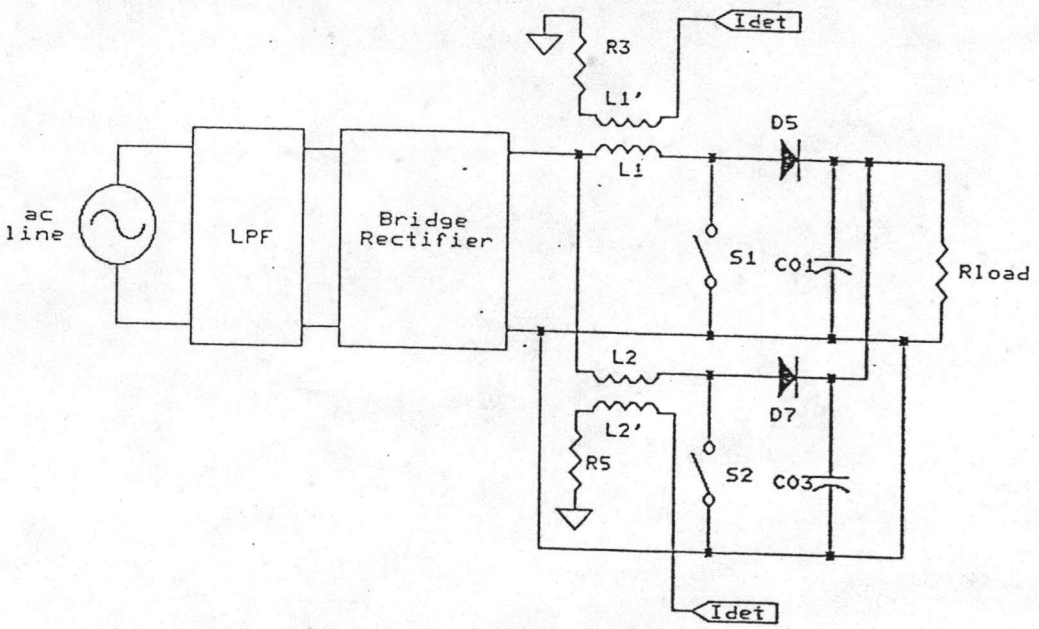
$$di_L/dt = ||v_s| - \langle v_o \rangle|/L \ ; \ \langle v_o \rangle \text{ ใหญ่กว่า } |v_s| \qquad (2.12)$$

กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงโดยค่าความชันที่เป็นลบ แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L จะเป็นลบ และแรงดันตกคร่อมทางด้านทุติยภูมิจะเป็นลบเป็นผลให้สัญญาณที่ขา Idet อยู่ในสภาวะ "1" ฟลิปฟลอปจะอยู่ในสภาวะเซท (set)แต่สวิตช์ยังคงตัดวงจรต่อไป อันเนื่องมาจากสัญญาณออกจากอินเวอร์เตอร์เป็น "0" เมื่อผ่าน AND GATE จึงได้สัญญาณออกเป็น "0" เมื่อกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำลดลงเป็นศูนย์จะทำให้แรงดันตกคร่อมทางด้านทุติยภูมิเป็นศูนย์ ส่งผลให้

สัญญาณ I_{det} เป็น "0" ทำให้สัญญาณออกของอินเวอร์เตอร์เป็น "1" และฟลิปฟลอปอยู่ในสภาวะค้างค่าอีกครั้ง เป็นผลให้สวิตช์ถูกต่อวงจรอีกครั้งหนึ่ง และการทำงานของวงจรก็จะเป็นเช่นนี้เรื่อยไป

2.4.1 หลักการขนานวงจร SMR

วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีวงจรกำลังเป็นวงจรเดียว เมื่อเกิดความบกพร่องหรือความเสียหายขึ้นในส่วนใดๆของวงจรกำลัง วงจรก็จะไม่สามารถจ่ายกำลังให้กับโหลดได้ และอาจทำให้เกิดความเสียหายกับวงจรในส่วนอื่นได้อีกด้วย ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายดังกล่าวและเพื่อเป็นการพิ่มความเชื่อถือได้ของวงจร จึงเลือกใช้การขนานวงจรกำลังสำหรับวงจร SMR ซึ่งจะทำให้วงจรรวมยังคงสามารถจ่ายกำลังให้กับโหลดได้ ถึงแม้วงจรกำลังบางวงจรเกิดความเสียหายขึ้นก็ตาม ซึ่งหลักการขนานวงจร SMR เป็นดังนี้



รูปที่ 2.20 การขนานวงจร SMR

จากวงจรในรูปที่ 2.20 จะได้ว่า

$$v_{L1} = L_1 di_{L1}/dt \qquad (2.13)$$

$$di_{L1}/dt = v_{L1}/L1 \qquad (2.14)$$

$$v_{L2} = L_2 di_{L2}/dt \qquad (2.15)$$

$$di_{L2}/dt = v_{L2}/L_2 \qquad (2.16)$$

เนื่องจากวงจรกำลังทั้งสองมีวงจรกรองเป็นวงจรเดียวกันดังนั้นจะได้ว่า

$$V_{L1} = V_{L2}$$

ดังนั้น

$$di_{L1}/dt = di_{L2}/dt \quad \text{ก็ต่อเมื่อ } L1 = L2 \qquad (2.17)$$

จากสมการ (2.17) จะเห็นได้ว่าการขนานวงจร SMR เพื่อให้แต่ละวงจรที่นำมาขนานกันจ่ายกำลังเท่ากันหรือมีกระแสไหลเท่ากันในแต่ละวงจรแล้ว ต้องใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำของแต่ละวงจรให้มีค่าเท่ากัน

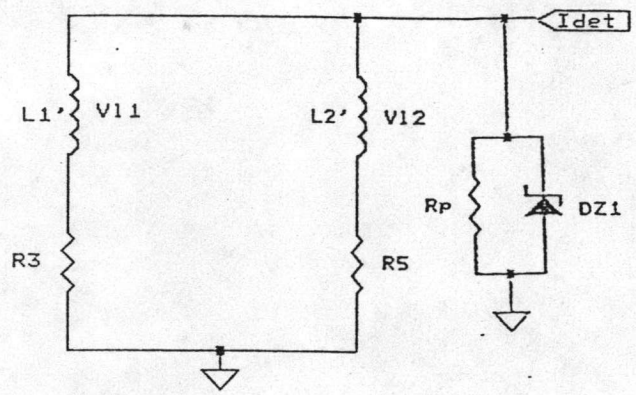
วงจรควบคุมการตัด-ต่อ ของสวิตช์ในแต่ละวงจรจะใช้ IC เบอร์ TDA 4814 เช่นเดียวกับการควบคุมวงจร SMR วงจรเดียวแต่ต้องอาศัยการดัดแปลงวงจรส่วนวัดค่ากระแส และวงจรส่วนขับนำสวิตช์เพิ่มขึ้น ถ้าค่าความเหนี่ยวนำ L2 มีค่ามากกว่า L1 จะได้ว่า

$$di_{L1}/dt > di_{L2}/dt \qquad (2.18)$$

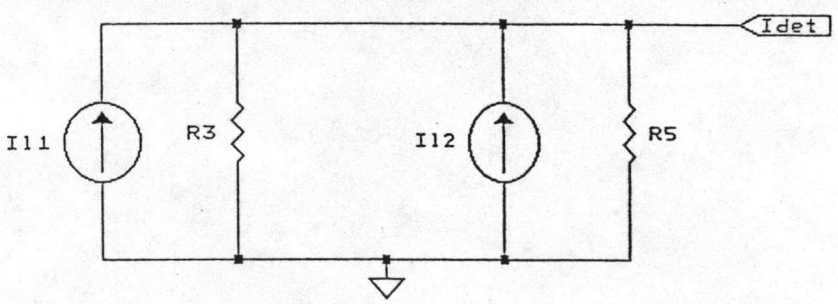
จากสมการ (2.18) ความชันของกระแสที่ผ่าน L1 จะมากกว่าของกระแสที่ผ่าน L2 จะทำให้กระแสเฉลี่ยเฉพาะที่ $\bar{i}_{L1}$ มีค่ามากกว่า $\bar{i}_{L2}$ ซึ่งจะทำให้วงจรที่ 1 จ่ายกำลังมากกว่าวงจรที่ 2

จากวงจรควบคุมวงจร SMR ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การควบคุมให้สวิตช์ต่อวงจรนั้น ได้รับสัญญาณมาจากแรงดันที่ตรวจจับจากขดทางทุติยภูมิของตัวเหนี่ยวนำ เราสามารถพิจารณาแรงดันที่ส่งมาจากขดทุติยภูมิผ่านความต้านทานจำกัดกระแส ให้เป็นแหล่งกำเนิดกระแสต่อขนานอยู่กับความต้านทานค่านั้นได้ตามทฤษฎีของ เทเวอนินและนอร์ตัน ดังนั้นการที่สวิตช์จะต่อวงจรของวงจรขนานพร้อมกัน จำเป็นที่จะต้องให้กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำลดลงเป็นศูนย์ทั้งหมดทุกวงจร มิเช่นนั้นแล้วถ้าสวิตช์ถูกสั่งต่อก่อนที่กระแสเหนี่ยวนำลดลงเป็นศูนย์ จะมีผลทำให้

ไดโอดของวงจรที่กระแสเหนี่ยวนำยังไม่เป็นศูนย์ ไม่สามารถหยุดกระแสได้ขณะที่สวิตช์ต่อวงจร และเกิดการทำงานผิดพลาดขึ้นได้ เราสามารถทำการตรวจจับกระแสที่ผ่านศูนย์ในตัวเหนี่ยวนำด้วยการใช้การขนานขดลวดทุติยภูมิที่พันเชื่อมโยง (coupling) บนแกนเดียวกับตัวเหนี่ยวนำของวงจรกำลังนั้นดังรูปที่ 2.21 เมื่อ L_1'และ L_2' คือขดลวดทุติยภูมิที่พันเชื่อมโยงกับ L_1 และ L_2



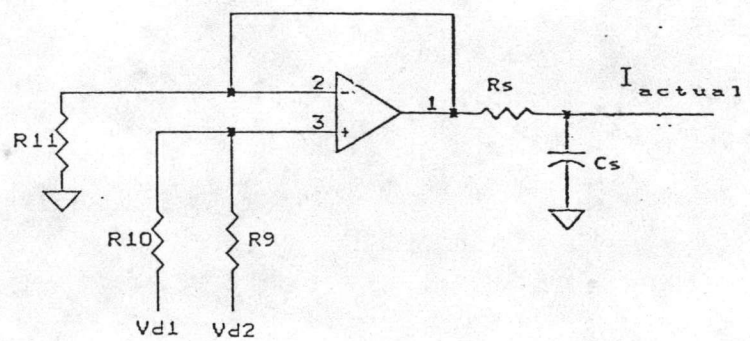
รูปที่ 2.21 วงจรตรวจจับกระแสผ่านศูนย์



รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลของวงจรตรวจจับกระแสผ่านศูนย์

จากรูปที่ 2.22 จะพบว่าถ้ากระแสของวงจรกำลังไม่เป็นศูนย์ทั้งหมด แรงดันออกไปสู่ขา 14 ก็จะยังไม่เป็นศูนย์และสวิตช์จะยังไม่ถูกสั่งให้ต่อวงจรจนกว่ากระแสในวงจรกำลังทุกวงจรมีค่าลดลงเป็นศูนย์ทุกวงจรก่อน สำหรับความต้านทาน R_P ใส่ไว้เพื่อหน่วงวงจรไม่ให้เกิดการแกว่ง อันอาจทำให้การตัด-ต่อวงจรผิดปกติได้ ส่วนซีเนอร์ไดโอดใส่ไว้เพื่อป้องกันความเสียหายแก่ไอซี

นอกจากวงจรตรวจจับกระแสผ่านศูนย์ในตัวเหนี่ยวนำแล้วยังต้องมีการปรับปรุงวงจรส่วนตรวจจับกระแสเพื่อตัดสวิตช์ จากที่กล่าวมาแล้วว่าเมื่อกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นถึงจุดๆ หนึ่งบนคลื่นรูปไซน์แล้วสวิตช์จะถูกสั่งให้ตัดวงจร ถ้าเราใช้วงจรบวกแรงดันที่ตรวจจับมาจากกระแสผ่านสวิตช์โดยใช้วงจรดังรูป 2.23



รูปที่ 2.23 วงจรบวกแรงดัน

เมื่อ

V_{d1} = แรงดันคร่อมความต้านทานตรวจจับกระแสผ่านสวิตช์ของวงจรที่ 1

V_{d2} = แรงดันคร่อมความต้านทานตรวจจับกระแสผ่านสวิตช์ของวงจรที่ 2

จากรูปที่ 2.23 จะได้

$$I_{actual} = [R_9/(R_{10}+R_9)]V_{d1} + [R_{10}/(R_{10}+R_9)]V_{d2} \quad (2.19)$$

$$= k_1V_{d1} + k_2V_{d2} \quad (2.20)$$

จากสมการ (2.20) จะพบว่าค่าคงที่ k_1 และ k_2 สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการปรับค่า R_{10} และ R_9 แต่การปรับค่า k_1 และค่า k_2 ต้องทำด้วยความระมัดระวัง เพราะอาจทำให้เกิดการผิดพลาดในวงจรได้ การปรับค่า k_1 และ k_2 นั่นยอมหมายถึงการพยายามควบคุมกระแสผ่านสวิตช์ด้วย ซึ่งกระแสผ่านสวิตช์นี้จะถูกควบคุมด้วยค่าความเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 อยู่แล้วดังนั้นวงจรจะพยายามปรับตัวเองให้สอดคล้องกับเงื่อนไขทั้งสอง ซึ่งจะทำให้รูปคลื่นกระแสผ่านเหนี่ยวนำผิดพลาดหรือเกิดการเพี้ยนขึ้นได้ ดังนั้นถ้าเราใช้สัญญาณไซน์อ้างอิงเท่าเดิมเหมือนวงจรเดียวควรใช้ค่า $k_1 = k_2$ นั่นคือใช้ $R_9 = R_{10}$ จากสมการ (2.19) จะได้

$$I_{actual} = (1/2)(V_{d1} + V_{d2}) \quad (2.21)$$

$$= V_d(av) \quad (2.22)$$

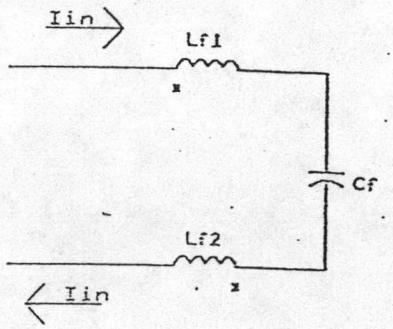
จากสมการที่ 2.22 สัญญาณที่ออกจากวงจรบวกแรงดันคือค่าเฉลี่ยของกระแสผ่านสวิตช์ของวงจรกำลังทั้งสอง ซึ่งจะมีผลดีในแง่ที่ไม่ทำให้กระแสผ่านสวิตช์ทั้งสองผิดเพี้ยนไปและยังสามารถขนานวงจรเพิ่มขึ้นได้ด้วยการเพิ่ม $V_{d1}..V_{dn}$ ผ่านค่าความต้านทานที่ขั้วเข้าไม่กลับขั้วของออปแอมป์ ซึ่งถ้าค่าความต้านทานเท่ากันจะได้ค่า $k_1 = k_2..k_n$ และจะได้แรงดันออกของออปแอมป์เป็นค่าเฉลี่ยของ $V_{d1}..V_{dn}$ ด้วย สำหรับความต้านทาน R_3 และตัวเก็บประจุ C_3 ใส่ไว้เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดการตัด-ต่อของวงจรที่ผิดปกติ

2.4.2 วงจรกรองผ่านต่ำ

กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะมีความถี่สูงประมาณ 25-100 kHz เมื่อมีการแปรโหลด ดังนั้นเพื่อให้กระแสขาเข้ามีรูปคลื่นเป็นสัญญาณใกล้เคียงไซน์

I16846338

ความถี่ 50 Hz และมีเฟส (phase) ตรงกับแรงดันขาเข้า จึงจำเป็นต้องกรองความถี่สูงเหล่านี้ออกด้วยวงจรกรองผ่านต่ำ นอกจากนี้แรงดันด้านเข้าที่มาจากแหล่งจ่ายกระแสสลับจะมีฮาร์มอนิกความถี่สูงปนออกมาด้วย จึงใช้วงจรกรองฮาร์มอนิกเหล่านี้ออกเสีย



รูปที่ 2.24 วงจรกรองผ่านต่ำ

จากรูป ความถี่หักมุมของวงจร f(3dB) มีค่าตามสมการ

$$f\ (3dB) = 1/(2\pi\sqrt{2LC}) \qquad (2.23)$$

โดยที่ $L = L_{f1} = L_{f2}$

เลือกความถี่หักมุมเท่ากับ 4 kHz ซึ่งจะไม่ลดทอนความถี่ช่วง 50 Hz ไปมาก

จากสมการที่ (2.23) จะได้

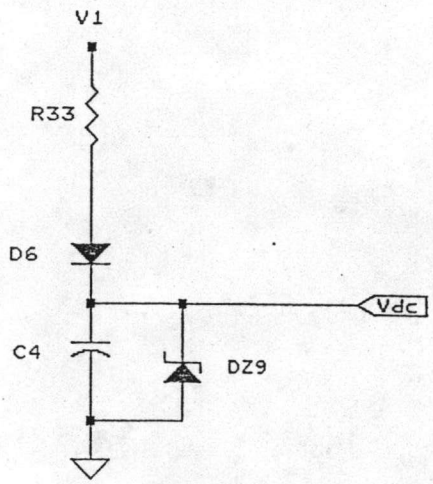
$$LC = 7.92 \times 10^{-10}$$

เลือก $C = 0.74$ uF จะได้

$L = 1.07$ mH

2.4.3 วงจรไฟเลี้ยงไอซี

วงจรที่จ่ายไฟเลี้ยงแก่ไอซีจะรับไฟจาก แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับมาทำการแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงดัน 12 โวลต์เพื่อจ่ายไฟให้แก่ไอซีเบอร์ TDA 4814

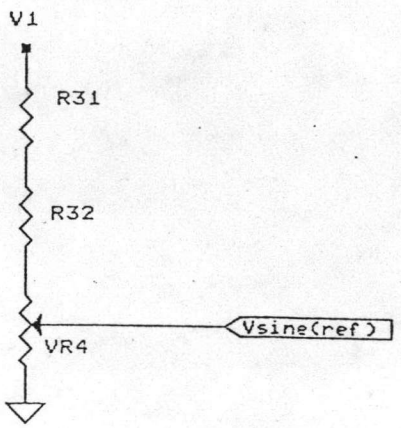


รูปที่ 2.25 วงจรไฟเลี้ยงไอซี

จากวงจรในรูปที่ 2.25 แรงดัน V_1 จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์แล้ว จะชาร์จตัวเก็บประจุผ่านทางความต้านทาน จำกัดกระแส และไดโอดทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสูงขึ้น จนถึงระดับ 12 โวลต์ แล้วจะถูกคงไว้ที่ 12 โวลต์ ด้วยซีเนอร์ไดโอด เพื่อจ่ายให้แก่ไอซี โดยค่าความต้านทาน จะต้องจำกัดกระแสผ่านซีเนอร์ไดโอดไม่ให้สูงเกินไป ส่วนค่าตัวเก็บประจุจะต้องมีค่าสูงพอ ที่จะจ่ายกระแสให้กับไอซีขณะที่แรงดัน V_1 ตกลงต่ำกว่า 12 โวลต์ได้ ไดโอดใช้ในการกันไม่ให้กระแสจาก C ไหลย้อนเข้าไปในแหล่งแรงดัน V_1 เมื่อ V_1 มีค่าต่ำกว่า 12 โวลต์

2.4.4 วงจรแบ่งแรงดันไซน์อ้างอิง

วงจรแบ่งแรงด้านไซน์อ้างอิง จะแบ่งแรงดันจากแหล่งดันรูปคลื่นไซน์ที่ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ เพื่อใช้เป็นสัญญาณไซน์ อ้างอิงในการควบคุมการตัดสวิตช์ เมื่อกระแสผ่านสวิตช์สูงถึงค่าหนึ่งบนรูปคลื่นไซน์อ้างอิง สัญญาณนี้จะถูกส่งไปที่ขา 11 ของไอซีเบอร์ TDA 4814

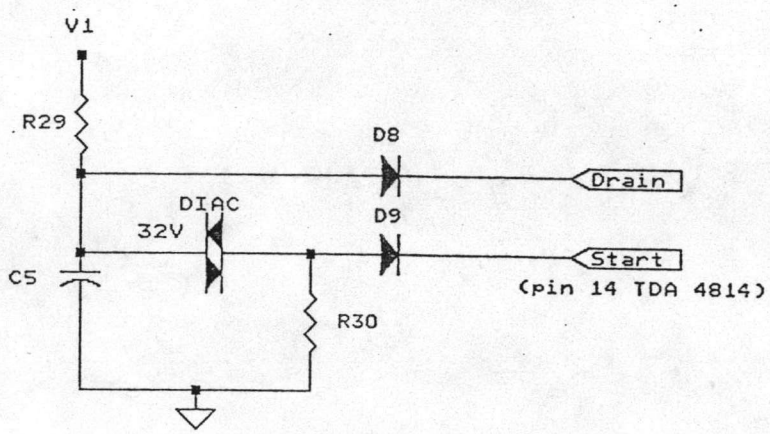


รูปที่ 2.26 วงจรแบ่งแรงดันไซน์อ้างอิง

สัญญาณไซน์นี้จะต้องมีค่าไฟมากเกินแรงดันไฟเลี้ยงไอซี และจำต้องไม่น้อยเกินไปเพราะถ้าแรงดันอ้างอิงต่ำมากๆ เมื่อจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นแรงดันทางด้านออกจะตกลงและสัญญาณจาก signal amplifier จะสูงขึ้นเมื่อสัญญาณสูงถึงค่าหนึ่งจะทำให้ multiplier เกิดการอิ่มตัวส่งสัญญาณออกคงที่โดยไม่ขึ้นกับสัญญาณจาก signal amplifier ต่อไป เมื่อจ่ายโหลดเพิ่มต่อไปแรงดันออกจะตกลงเรื่อย ๆ

2.4.5 วงจรจุดชนวน

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ในเรื่องการทำงานของวงจรควบคุมโดยใช้ไอซีเบอร์ TDA 4814 ซึ่งถ้าไม่มีพัลส์บวก (positive pulse)ไปจุดชนวนที่ขา 14 ของไอซีเพื่อรีเซทฟลิปฟลอปแล้ววงจรจะไม่สามารถทำงานได้เลยดังนั้นจึงต้องมีวงจรที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์บวกดังกล่าวดังวงจรในรูปที่ 2.27



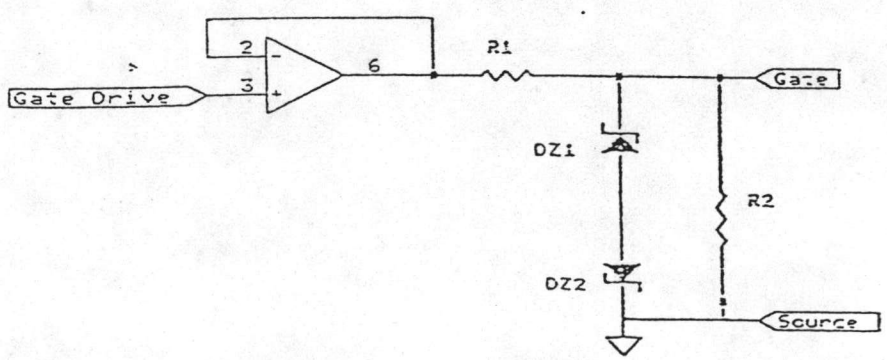
รูปที่ 2.27 วงจรจุดชนวน

จากรูปที่ 2.27 แรงดัน V1 จะชาร์จตัวเก็บประจุผ่านความต้านทานจำกัดค่ากระแสทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยค่าคงตัวเวลา RC ซึ่งมีค่าค่อนข้างจะยาวนาน ดังนั้นถ้าแรงดัน V_1 สูงถึงค่าที่ทำให้ไดแอคเริ่มนำกระแสประจุในตัวเก็บประจุ จะดีสชาร์จผ่านไดแอคไปที่ขา 14 ของไอซีมีลักษณะคล้ายพัลส์บวก (positive pulse) ไปจุดชนวนการทำงานเพื่อทำให้ฟลิปฟลอปหยุดการค้างค่า เมื่อวงจรการทำงานตามปกติแล้วจำเป็นต้องหยุดการจุดชนวนหรือตัดวงจรชุดนี้ออกไป ซึ่งทำได้ดังนี้ ขณะที่ทำงานปกติ D_1 จะเป็นตัวดีสชาร์จประจุจากตัวเก็บประจุ ไปยังขาเดรนหรือคอลเลคเตอร์ของสวิตช์ซึ่งขณะสวิตช์ต่อวงจรอยู่ แรงดันที่ขาเดรนจะมีค่าประมาณศูนย์โวลต์ ทำให้ประจุดีสชาร์จผ่านได้โอด ไปยังขาเดรนแทนที่จะไปผ่านไดแอค ขณะที่สวิตช์เปิดวงจรแรงดันที่ขาคาโทดของไดโอด จะสูงกว่าที่ขาอาโนดทำให้ไดโอดไม่นำกระแสอันเนื่องมาจากแรงดันทางด้านทุติยภูมิของตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ประจุจากตัวเก็บประจุ

ดีชชาร์จผ่านค่าความต้านทานแทน ถ้าไม่มีค่าความต้านทาน จะพบว่าขณะที่ไดแอคไม่นำกระแสไดโอดจะเหมือนลอยอยู่ไม่ต่อกับวงจร จึงควรมีความต้านทานต่ออยู่ด้วยเพื่อให้การทำงานมีความเชื่อถือได้ การออกแบบจะต้องใช้ค่าความต้านทานที่มีค่าใหญ่มาก ๆ เพื่อจะทำให้ไดแอคสามารถหยุดนำกระแสได้หลังจากนำกระแสแล้ว

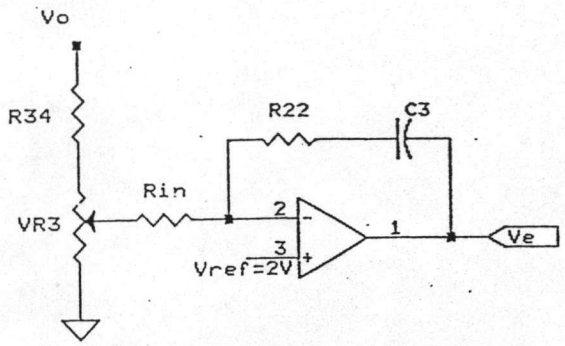
2.4.6 วงจรขับนำสวิตช์

การที่จะใช้สัญญาณออกจากไอซี เพื่อใช้ขับสวิตช์ของวงจรกำลังที่นำมา ต่อขนานกันนั้น อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ไอซีได้ จึงใช้ออปแอมป์ต่อเป็นวงจรตามแรงดัน (voltage follower) เพื่อเป็นกันชน (buffer) ให้กับไอซี และออปแอมป์ที่ใช้ต้องมี slew rate สูง ๆ เพื่อที่จะทำให้สัญญาณขับเกตมีความเพี้ยนน้อยที่สุด ค่า R1 จะต้องไม่เล็กหรือมากเกินไปเพราะถ้าค่า R1 เล็กไปจะทำให้กระแสที่ส่งไปนั้นสูงขึ้นด้วย เนื่องมาจากช่วงการเปลี่ยนระดับของสัญญาณขับนั้นจะต้องใช้กระแสไฟประจุในตัวเก็บประจุที่อยู่ในสวิตช์ ถ้าระดับการเปลี่ยนสัญญาณคร่อมตัวเก็บประจุสูงมาก จะทำให้เกิดการกระชากกระแสอัดประจุนี้จากออปแอมป์สูงขึ้นด้วย แต่ถ้าค่า R1 นี้มีค่ามากเกินไปจะทำให้รูปคลื่นพัลส์ที่ไปตกคร่อมขาเกตของสวิตช์เพี้ยนไปได้ ซีเนอร์ไดโอดต่อไว้เพื่อป้องกันไม่ให้แรงดันเกต-ซอร์ส มีค่ามากเกินไปซึ่งอาจทำให้สวิตช์เกิดความเสียหายได้



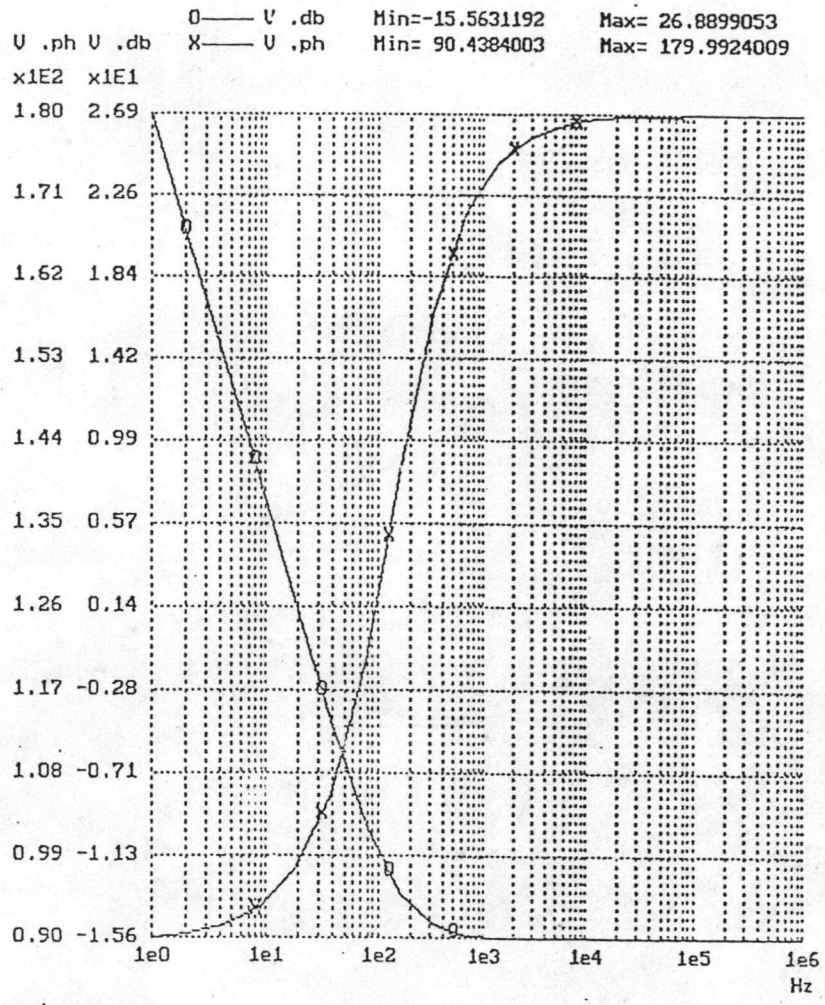
รูปที่ 2.28 วงจรขับนำสวิตช์

2.4.7 วงจรคุมค่าแรงดัน



รูปที่ 2.29 วงจรคุมค่าแรงดัน (regulator)

เนื่องจากเราต้องคุมค่าแรงดันขาออกเอาไว้ในขณะที่จ่ายโหลดในช่วงกว้างจากสภาวะใช้โหลดถึงสภาวะโหลดเต็ม เราจึงต้องมีวงจรคุมค่าแรงดันออกโดยการวัดค่าแรงดันด้านออกมาทำการเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง ซึ่งจากการเปรียบเทียบ จะได้ค่าความคลาดเคลื่อน เพื่อเป็นสัญญาณให้กับวงจรคูณเพื่อจะทำให้วงจรสามารถคงค่าแรงดันออกให้ได้ความต้องการ ซึ่งวงจรคุมค่าแรงดันนี้จะต้องมีอัตราขยายไฟตรงที่มีค่าสูง แต่จะต้องมีอัตราขยายต่ำที่ความถี่สูงเพื่อลดผลของแรงดันระลอกทางด้านขาเข้าของออปแอมป์ เราจึงเลือกใช้วงจรคุมค่าแบบ PI ดังในรูปที่ 2.29 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรคุมค่าแบบเป็น PI ดังรูปที่ 2.30 ซึ่งจากการชีมูเลตจะเห็นว่า วงจรขยายมีหนึ่งขั้วที่ความถี่ศูนย์ มีหนึ่งศูนย์ที่ความถี่ประมาณ 200 เฮิรตซ์ (เท่ากับ $2/R_{22}C_3$)

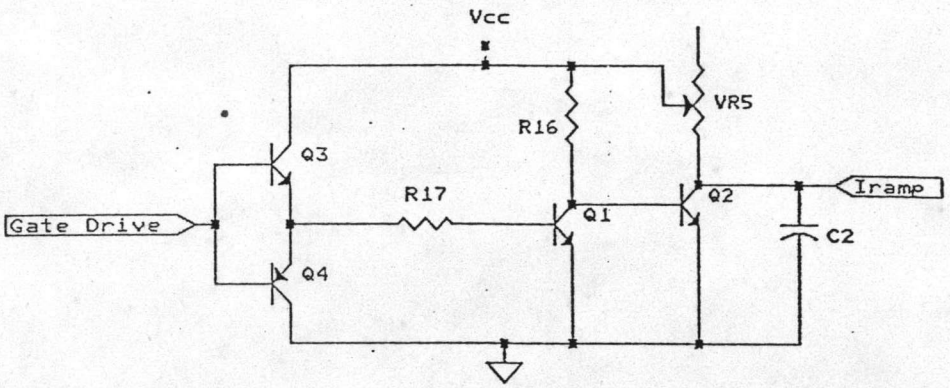


รูปที่ 2.30 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรคุมค่า (ซีมูเลต)

2.4.8 วงจรเพิ่มเสถียรภาพของวงจร SMR

เนื่องจากตำแหน่ง ขั้ว และ ศูนย์ (C.Zhuo and M.M. Jovanovic , 1992) ของวงจร SMR จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้าที่มีค่าเปลี่ยนแปลงจากศูนย์โวลต์จนถึงแรงดันค่ายอด ดังนั้นการใช้วงจรควบคุมที่มีอัตราการขยายป้อนกลับที่มีค่าคงที่ จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพต่ำ (เกิดการแกว่งของกระแสและแรงดันที่กระแสโหลดบางค่า) ซึ่งการใช้วงจรคุมค่าที่มีอัตราการขยายป้อนกลับแปรค่าตามเวลา จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้แต่ในทางปฏิบัติแล้ววงจรคุมค่าแบบนี้จะมีความยุ่งยาก และสลับซับซ้อนมาก ดังนั้นการใช้วงจรควบคุมที่มีอัตราการขยายป้อนกลับที่มีค่าคงที่ แล้วใช้การชดเชย (compensate) กรณีที่จะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพจึงเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมมากกว่า

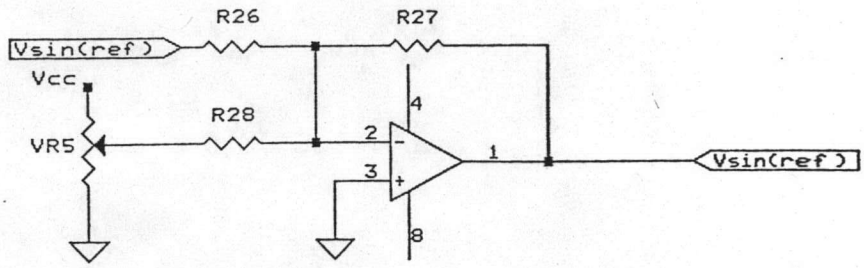
การชดเชยด้วยความชัน (slope compensation) กับกระแสที่ผ่านสวิตช์ (C.Zhuo and M.M. Jovanovic , 1992) จะทำให้เสถียรภาพของระบบดีขึ้น ซึ่งวงจรในส่วนนี้เป็นดังรูปที่ 2.31



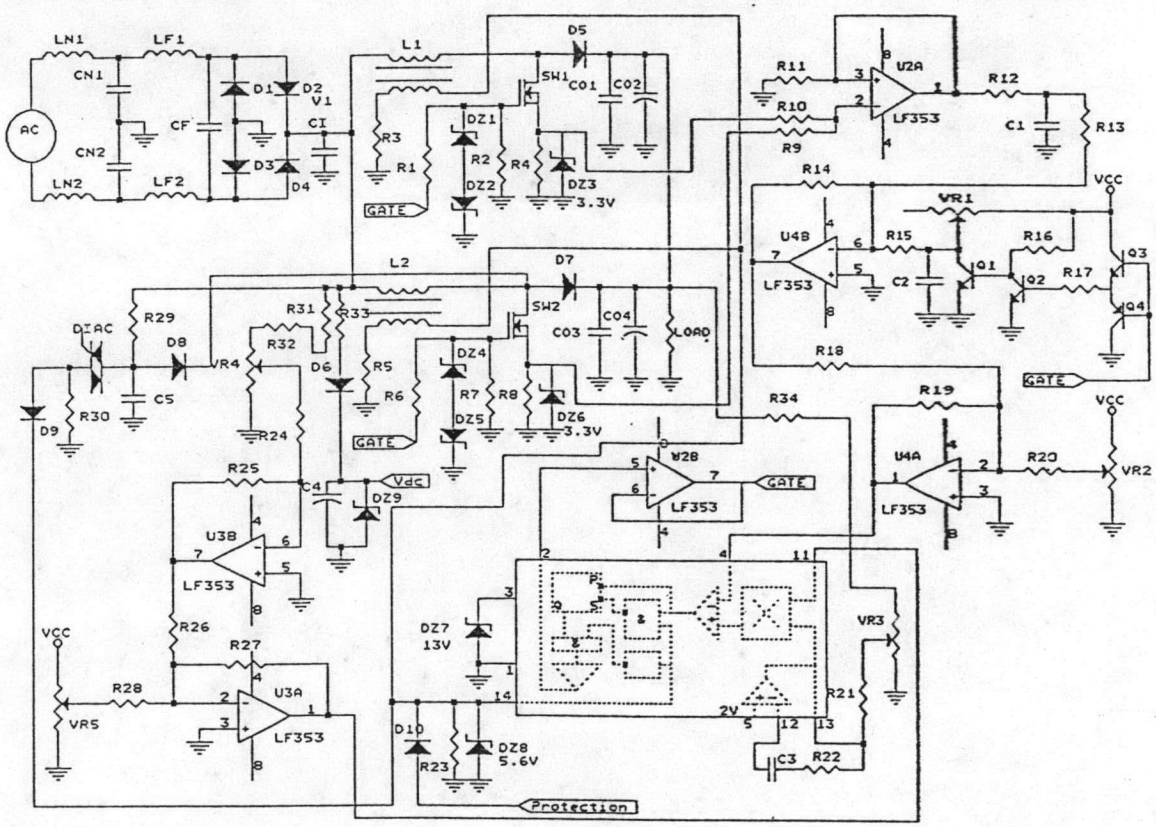
รูปที่ 2.31 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย (ramp) สำหรับการชดเชยด้วยความชัน

จากรูปที่ 2.31 สัญญาณที่สร้างขึ้นจะมีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ และมีค่าความชันที่ถูกกำหนดโดยค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุ จากสัญญาณ ramp ที่สร้างขึ้นนี้จะทำไปบวกกับสัญญาณกระแสผ่านสวิตช์ เพื่อใช้เป็นสัญญาณที่จะนำไปควบคุมการตัดวงจรของสวิตช์ต่อไปในส่วนควบคุม

นอกจากการใช้การชดเชยด้วนความชัน (slope compensation) แล้วการเพิ่มแรงดันออฟเซ็ทให้กับแรงดันอ้างอิงรูปไซน์ จะช่วยแก้ปัญหาความไม่ต่อเนื่องของกระแสในช่วงกระแสตัดศูนย์ (C.Zhuo and M.M. Jovanovic , 1992) ซึ่งจะทำให้กระแสด้านเข้ามีลักษณะใกล้ไซน์มากขึ้นอีกด้วย และวงจรสำหรับเพิ่มแรงดันออฟเซ็ทนี้เป็นดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 วงจรเพิ่มแรงดันออฟเซ็ท



รูปที่ 2.33 วงจรรวมของวงจรขนาน SMR