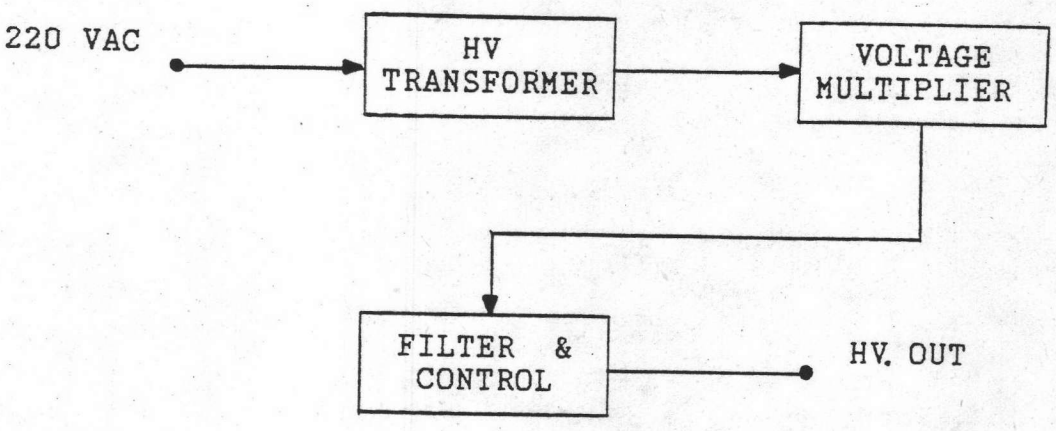
บทที่ 2
แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง

มาตรฐานของระบบไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในชีวิตประจำวันเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดความต่างศักย์ 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ แต่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ขนาดความต่างศักย์ต่างๆกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวงจรและอุปกรณ์เหล่านั้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นจะต้องมีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม

หลักการของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เริ่มจากการแปลงศักดาไฟฟ้ากระแสสลับ เรียงกระแส กรองกระแสและควบคุมระดับศักดาให้คงที่ โดยทั่วไปแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงต่ำ มีอุปกรณ์บางชนิดต้องการความต่างศักย์มากกว่า 500 โวลต์ แหล่งจ่ายไฟฟ้าประเภทนี้เรียกว่า แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง

2.1 หลักการของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง

ไฟฟ้ากระแสสลับขนาดความต่างศักย์ 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความต่างศักย์สูงขึ้นด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแปลงขึ้น เพิ่มความต่างศักย์ให้สูงขึ้นอีกด้วยวงจรทวีความต่างศักย์ ไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงที่ได้ทำให้เป็นไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสและกรองกระแสให้เรียบ รักษาระดับแรงดันให้คงที่ด้วยวงจรควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2.1

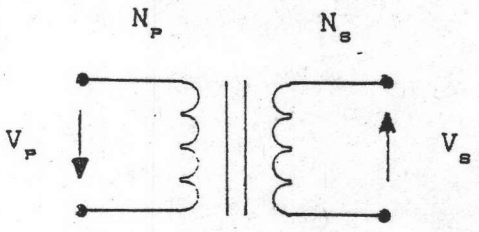


รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงเบื้องต้น

2.2 ชนิดของวงจรทวีความต่างศักย์

2.2.1 การทวีความต่างศักย์ด้วยหม้อแปลง อาศัยหลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กระหว่างระหว่างขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิ โดยอัตรารอบ

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} \qquad .....(2.1)$$



รูปที่ 2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

ความต่างศักย์ทางออกเป็น n เท่าของความต่างศักย์ทางเข้า

โดย

$$n = \frac{N_s}{N_p} \qquad .....(2.2)$$

n = turn ratio

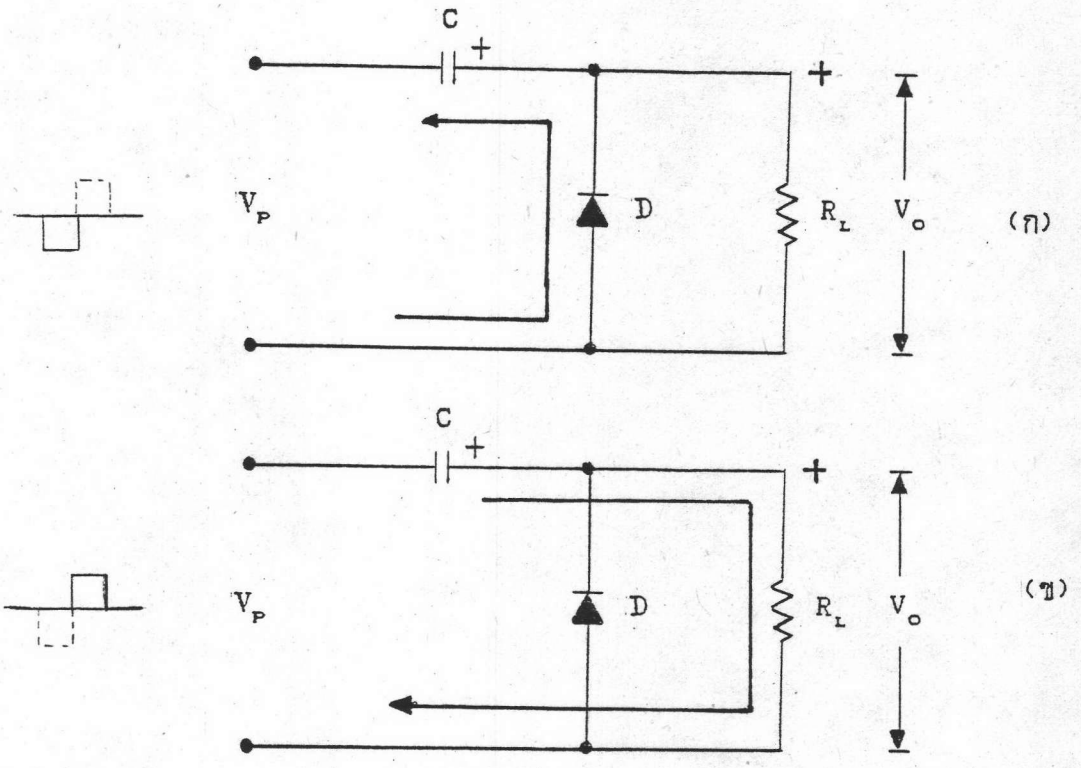
N_p = จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

N_s = จำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

ความต่างศักย์ทางเข้าต้องเป็นชนิดกระแสสลับ การทวีความต่างศักย์ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้ามีขีดจำกัดอยู่ที่ฉนวนที่ใช้เคลือบเส้นลวดทองแดง และโครงที่ใช้ (bobbin) ถ้า turn ratio สูงจะทำให้เกิดการอาร์ค เนื่องจากฉนวนไม่สามารถป้องกันได้ถ้าความต่างศักย์เกิน 500 V_{PP} เมื่อต้องการความต่างศักย์สูงกว่านี้ต้องใช้วงจรทวีความต่างศักย์ร่วมด้วย เพื่อแก้ปัญหาการอาร์คที่จะเกิดขึ้น

2.2.2 การทวีความต่างศักย์ด้วยวงจรทวีความต่างศักย์ (voltage multiplier)

วงจรทวีความต่างศักย์มีอยู่หลายแบบด้วยกัน รูปที่ 2.3 เป็นวงจรทวีความต่างศักย์เบื้องต้น ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและไดโอด ต่ออนุกรมกับไฟฟ้าสลับ นิยมใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง กระแสที่ป้อนให้โหลดมีขนาดต่ำและไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์และกระแสที่ทางออก



รูปที่ 2.3 วงจรทวีความต่างศักย์เบื้องต้น

(ก) แสดงทิศทางของกระแสในครึ่งไซเคิลลบ

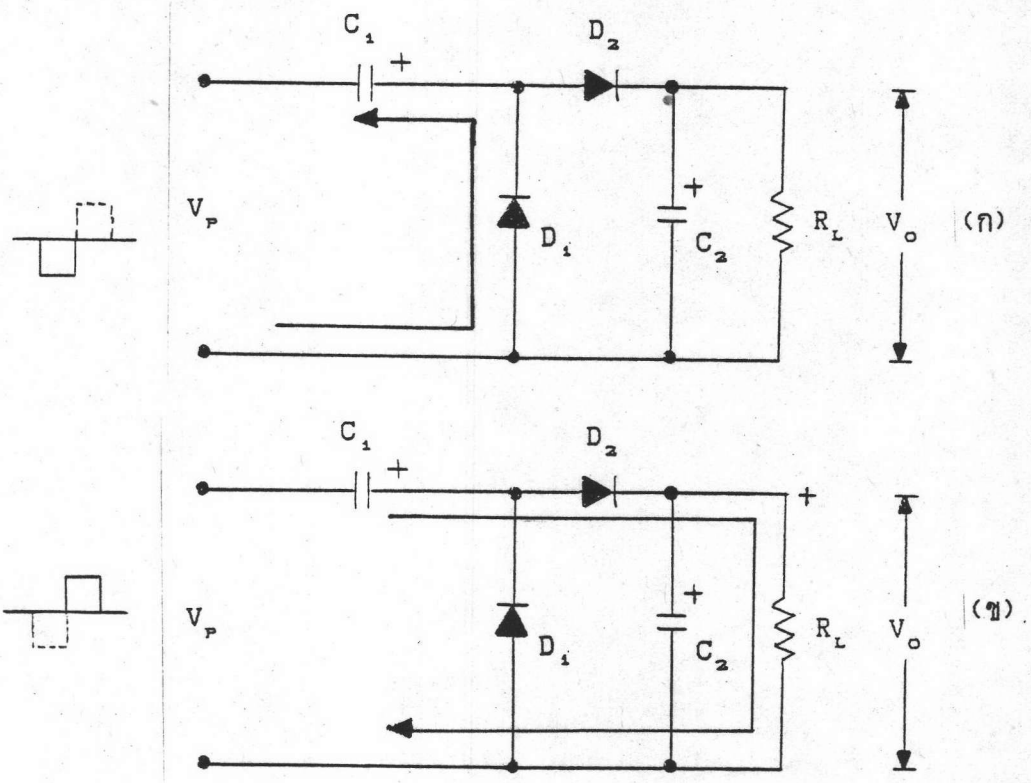
(ข) แสดงทิศทางของกระแสในครึ่งไซเคิลบวก

หลักการทำงาน ไฟฟ้าสลับครึ่งไซเคิลที่เป็นลบ ไดโอด D จะนำกระแสทำให้กระแสไหลผ่านไดโอด กระแสส่วนนี้จะประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุตามขั้วที่ต่อไว้ตามรูป 2.3 (ก) ความต่างศักย์ทางออกมีค่าประมาณศูนย์โวลต์ ไฟฟ้าสลับครึ่งไซเคิลที่เป็นบวกตามรูป 2.3 (ข) กระแสไม่ไหลผ่านไดโอดจะไหลผ่านตัวความต้านทานไปยังตัวเก็บประจุและตัวเก็บประจุ คายประจุในทิศทางของกระแสที่ไหลทำให้ความต่างศักย์ทางออกมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ทางเข้าบวกกับความต่างศักย์ที่คร่อมตัวเก็บประจุ ความต่างศักย์ทางออกจะมีค่าเท่ากับ 2 V_p วงจรเพิ่มความต่างศักย์แบบนี้ไม่นิยมนำไปใช้งานเพราะไม่มีเสถียรภาพ เนื่องจากตัวเก็บประจุคายประจุให้กับโหลดทำให้ความต่างศักย์คร่อมตัว

เก็บประจุค่อยๆ ลดลง

2.3 วงจรทวีความต่างศักย์ สองเท่าแบบฮาล์ฟเวฟ (Half wave)

วงจรนี้ได้เพิ่มตัวเก็บประจุที่ทางออกเพื่อเก็บประจุที่ทางออกและคายประจุให้กับโหลด เพิ่มไดโอดอีกหนึ่งตัวเพื่อเป็นการแยกวงจรทางเข้า ทำให้ความต่างศักย์ที่เพิ่มเป็นสองเท่าที่ทางออกแยกกับความต่างศักย์ทางเข้า ดังรูปที่ 2.4



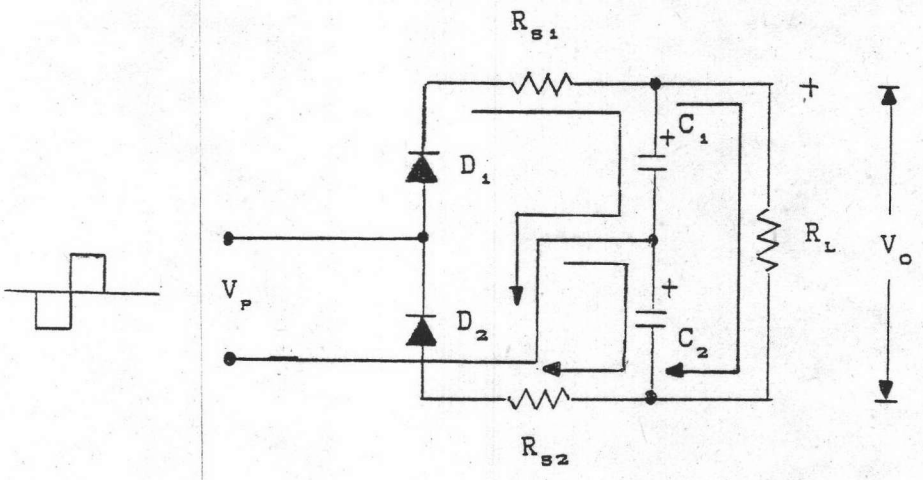
รูปที่ 2.4 วงจรทวีความต่างศักย์ สองเท่าแบบฮาล์ฟเวฟ
(ก) แสดงทิศทางของกระแสในครึ่งไซเคิลลบ
(ข) แสดงทิศทางของกระแสในครึ่งไซเคิลบวก

หลักการทำงานตัวเก็บประจุ C_1 และไดโอด D_1 ทำหน้าที่แบบเดียวกับวงจรเบื้องต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว ตัวเก็บประจุ C_2 ถูกประจุจนมีความต่างศักย์คร่อมตัวมีค่าเป็น 2 เท่าของความต่างศักย์ทางเข้าไดโอด D_2 เป็นตัวแยกตัวเก็บประจุ C_2 ออกจากความต่างศักย์ทางเข้าในขณะที่ตัวเก็บประจุ C_1 ถูกประจุ ในระหว่างครึ่งไซเคิลที่เป็นลบดังรูป ก. กระแสจะไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 และไดโอด D_1 ตัวเก็บประจุ C_1 จะถูกประจุจนมีค่าสูงสุดเท่ากับความต่างศักย์ทางเข้า ระหว่างครึ่งไซเคิลที่เป็นบวก D_1 ถูกไบอัส

กลับดังรูป ข. กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_2 ,D_2 ,และC_1 ดังนั้นตัวเก็บประจุ C_2 ถูกประจุจนมีความต่างศักย์เท่ากับความต่างศักย์ทางเข้าบวกกับความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุ C_1 คือจะมีค่าสูงสุดเป็น 2 เท่าของความต่างศักย์ทางเข้า วงจรนี้จะมีข้อเสียคือไม่สามารถจ่ายกระแสได้มากเพราะว่า ตัวเก็บประจุ C_2 จะถูกประจุเพียงครึ่งไซเคิลเท่านั้น

2.4 วงจรทวีความต่างศักย์สองเท่าแบบฟูลเวฟ (full wave)

วงจรทวีความต่างศักย์แบบนี้มีตัวเก็บประจุอยู่ที่ทางออก 2 ตัวเพื่อรับประจุจากทางเข้าตัวละครึ่งไซเคิล ทำให้วงจรทวีความต่างศักย์แบบฟูลเวฟนี้สามารถเพิ่มความต่างศักย์ได้ทั้ง 2 ไซเคิลของไฟฟ้าสลับ ดังรูปที่ 2.5

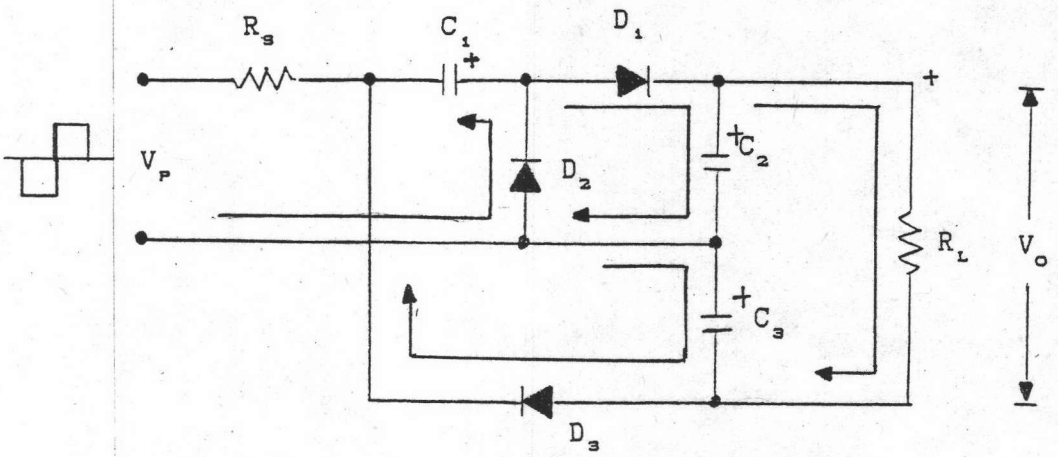


รูปที่ 2.5 วงจรทวีความต่างศักย์สองเท่าแบบฟูลเวฟ

หลักการทำงาน ตัวเก็บประจุ C_2 ถูกประจุจนกระทั่งมีค่าความต่างศักย์คร่อมตัวเท่ากับความต่างศักย์ทางเข้าผ่านไดโอด D_2 และความต้านทาน R_{S2} ในช่วงครึ่งไซเคิลที่เป็นลบของไฟฟ้าสลับ ในครึ่งไซเคิลของไฟฟ้าสลับที่เป็นบวก จะประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 ผ่านไดโอด D_1 และความต้านทาน R_{S1} และ R_{S2} เป็นตัวจำกัดกระแสที่จะประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 เพื่อป้องกันไม่ให้มีกระแสไหลผ่านไดโอด D_1 และ D_2 มากเกินไปในขณะประจุ ความต่างศักย์ทางออกจะมีค่าเท่ากับผลรวมของความต่างศักย์คร่อม C_1 และ C_2

2.5 วงจรทวีความต่างศักย์สามเท่าแบบฟูลเวฟ

วงจรนี้ได้เพิ่มไดโอดและตัวเก็บประจุมากขึ้นแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรทวีความต่างศักย์สามเท่าแบบฟูลเวฟ

หลักการทำงานของวงจรนี้ ในขณะที่ไฟฟ้าสลับ V_p ครึ่งไซเคิลลบผ่าน R_s เข้ามา ไดโอด D_2 และ D_3 จะนำกระแสเกิดการประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 และ C_3 ทำให้ความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองเป็น V_p ต่อมาเมื่อไฟฟ้าสลับ V_p ครึ่งไซเคิลบวกไดโอด D_1 จะนำกระแส ส่วนไดโอด D_2 และ D_3 ไม่นำกระแส กระแสจากครึ่งไซเคิลบวกนี้ไหลผ่าน R_s , C_1 , D_1 , C_2 ทำให้ความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุ C_2 เท่ากับ $2V_p$ ความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุ C_3 เท่ากับ V_p ทำให้ได้ความต่างศักย์ทางออกเท่ากับ $3V_p$ เนื่องจาก C_2 และ C_3 ต่อแบบอนุกรมกัน

โดยการจัดวงจรด้วยการเพิ่มไดโอด และตัวเก็บประจุเพิ่มเข้าไป ตามทฤษฎีสามารถทวีความต่างศักย์ได้เป็น n เท่า ถ้าใช้ไดโอด n ตัว และตัวเก็บประจุ n ตัว แต่ในทางปฏิบัติจะมีขีดจำกัดอยู่ที่ความจุของตัวเก็บประจุ ทำให้ไม่สามารถจ่ายกระแสปริมาณสูงได้

2.6 การกรองกระแสทางออกให้เรียบ

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ราบเรียบ จะต้องมีการชดเชยระดับทางออกของกระแสไฟฟ้าทางออกในครึ่งไซเคิลของกระแสไฟฟ้าสลับได้เพียงพอกับขนาด

ของโหลด ซึ่งหมายความว่าตัวเก็บประจุจะต้องมีขนาดความมากพอตามความสัมพันธ์ในสมการ (2.3) ในแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง ถ้าทวีคักดาไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ ช่วงเวลาที่ชดเชยปริมาณกระแสจะมีเวลานานตัวเก็บประจุจะมีขนาดใหญ่และหายาก

$$C = I\,t\,/\,V_r \qquad .....(2.3)$$

เมื่อ

V_r = แรงดันระลอกคลื่น

C = ค่าความจุของตัวเก็บประจุ

I = กระแส

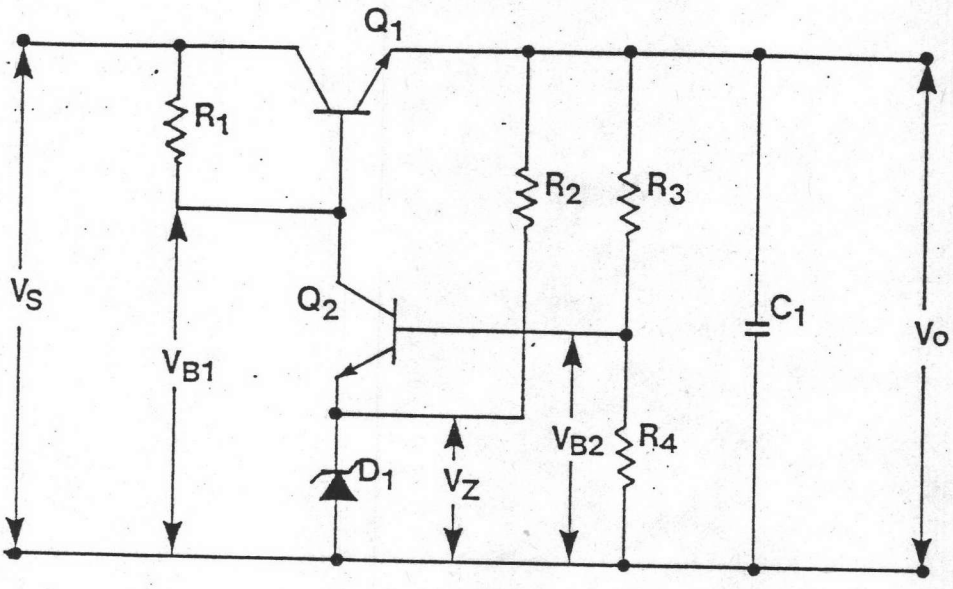
t = เวลา

การที่จะลดขนาดของตัวเก็บประจุกรองกระแส ทำได้โดยลดช่วงเวลาชดเชยประจุจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ ในช่วงไซเคิลไบอัสกลับทาง การลดช่วงเวลาคือการเพิ่มความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่จะนำไปทวีความต่างศักย์ จึงจำเป็นจะต้องทำการกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (5 kHz - 25 kHz) จากไฟฟ้ากระแสตรงเรียกว่า ดีซี-ทู-เอซี คอนเวอเตอร์(DC to AC converter)

เสถียรภาพของการกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงจะต้องมีการควบคุม แบบวงจรปิดเพื่อชดเชยระดับศักดาทางออกให้คงที่ ด้วยการควบคุมศักดาไฟฟ้าที่เป็นต้นกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง จากการประเมินศักดาไฟฟ้าทางออก

2.7 <u>วงจรควบคุมแบบอนุกรมและวงจรขยายความผิดพลาด</u> (3)

เพื่อให้การควบคุมศักดาทางออกคงที่และมีประสิทธิภาพในการใช้งานสูง จะต้องจัดระบบควบคุมวงจรปิดซึ่งประกอบด้วย วงจรสุ่มศักดา (sampling network) และวงจรขยายความผิดพลาดเพิ่มเข้าไปในแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง รูปที่ 2.7 แสดงวงจรควบคุมแบบอนุกรมโดยมีทรานซิสเตอร์เป็นตัวให้กระแสผ่านและมีทรานซิสเตอร์อีก 1 ตัวเป็นตัวขยายความผิดพลาดทำหน้าที่ตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดจากความต่างศักย์ทางออก หรือจากการใช้โหลด จากการสุ่มศักดาไฟฟ้าบน R_4 ซึ่งจัดเป็นวงจรแบ่งศักดาไฟฟ้ากับ R_s



รูปที่ 2.7 วงจรควบคุมแบบอนุกรมและวงจรขยายความผิดพลาด

หลักการทำงานของวงจรนี้ วงจรประกอบด้วยตัวต้านทาน R_2 และ ซีเนอร์ไดโอด D_1 เป็นตัวสร้างความต่างศักย์อ้างอิง ทรานซิสเตอร์ Q_2 เป็นตัวขยายความผิดพลาด Q_1 เป็น ซีรี-พาส ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน R_3 และ R_4 จะเป็นตัวแบ่งความต่างศักย์ทางออกเพื่อใช้เทียบกับความต่างศักย์อ้างอิง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ทางออก การเปลี่ยนแปลงนี้จะถูกขยายโดยทรานซิสเตอร์ Q_2 และป้อนไปยังเบสของทรานซิสเตอร์ Q_1 เพื่อที่จะแก้ไขให้ความต่างศักย์ทางออกมีขนาดเท่าที่ต้องการ

ตัวอย่าง เช่น ความต่างศักย์ทางออกลดลงด้วยเหตุผลใดก็ตามเมื่อ V_o ลดลง ก็จะทำให้ V_{B2} ลดลงด้วยแต่ความต่างศักย์ที่อิมิตเตอร์ของ Q_2 ยังคงมีค่าคงที่เท่ากับ V_Z เมื่อ V_{B2} ลดลงทำให้ V_{BE2} ลดลงด้วย การลดลงของ V_{BE2} นี้จะทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ I_{C2} ลดลงด้วย เมื่อ I_{C2} ลดลง V_{R1} ก็ลดลงด้วยก็ทำให้ V_{BE2} ลดลงด้วยทำให้ความต่างศักย์ที่เบสของ Q_1 เพิ่มขึ้นเนื่องจาก $V_{B1} = V_S - V_{R1}$ จึงทำให้ความต่างศักย์ทางออกเพิ่มขึ้น $V_o = V_{B1} - V_{BE1}$ จะเห็นว่าเมื่อความต่างศักย์ทางออกลดลงจะมีผลป้อนกลับมาทำให้ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นกลับสู่สภาพปกติ ถ้าในกรณีที่ความต่างศักย์ทางออก

เพิ่มขึ้นก็จะมีผลในทางตรงข้ามคือสุดท้ายจะมีผลทำให้ความต่างศักย์ทางออก ลดลงสู่สภาพปกติตามที่ต้องการ

วงจรควบคุมในรูปที่ 2.7 จะรักษาระดับความต่างศักย์ทางออกให้คงที่ตลอดเวลาโดยปกติจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามโหลดที่ใช้ เรกกูเลชัน (Regulation) ของวงจรควบคุมนิยามได้ดังนี้

$$V_R = \frac{(V_{NL} - V_{FL}) \times 100}{V_{FL}} \quad .....(2.3)$$

โดย V_R คือ เรกกูเลชันของความต่างศักย์

V_{NL} คือ ความต่างศักย์ขณะไม่มีโหลด

V_{FL} คือ ความต่างศักย์ขณะมีโหลดสูงสุด

ในวงจรควบคุม อุดมคติ (ideal) นั้นเรกกูเลชันจะมีค่าเป็นศูนย์จากวงจรควบคุมดังรูปที่ 2.7 จะมีการสูญเสียกำลังงานบางส่วนในรูปของความร้อน เนื่องจากความต่างศักย์ทางเข้ามีค่าสูงกว่าความต่างศักย์ทางออกเสมอ ทำให้ตัวทรานซิสเตอร์ที่ต่อแบบอนุกรมอยู่กับวงจรต้องทำงานตลอดเวลาเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง นิยามของประสิทธิภาพของวงจรควบคุมมีดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพของวงจรควบคุม} = \frac{\text{ความต่างศักย์ทางออก} \times 100}{\text{ความต่างศักย์ทางเข้า}} \quad .....(2.4)$$

เพื่อให้ได้เรกกูเลชันที่ดี โดยปกติจะกำหนดสัดส่วนของความต่างศักย์ทางเข้าเป็น 1.5 เท่าของความต่างศักย์ทางออก เมื่อเป็นเช่นนี้จะได้ประสิทธิภาพของวงจรควบคุมแบบอนุกรมเท่ากับ ร้อยละ 67

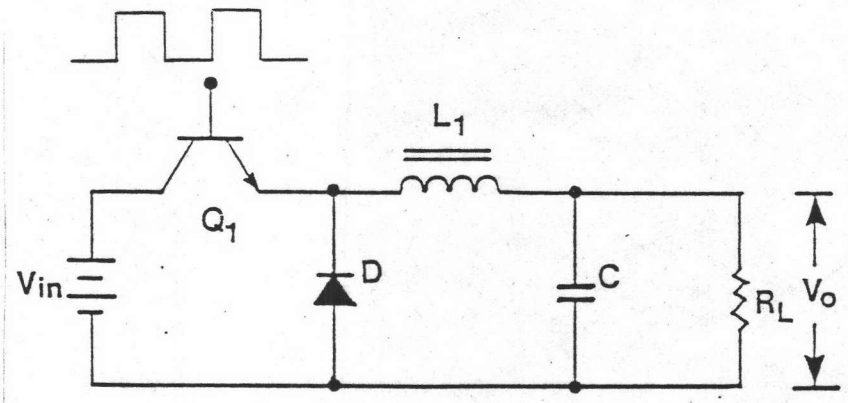
2.8 ผลเสียของวงจรควบคุมแบบอนุกรม

วงจรควบคุมเพื่อรักษาระดับความต่างศักย์ทางออกให้คงที่ใช้วงจรควบคุมความต่างศักย์ให้คงที่แบบอนุกรม จะเกิดการสูญเสียพลังงานบางส่วนไปเป็นความร้อนเนื่องจากตัวทรานซิสเตอร์ที่ใช้ต่อเป็นแบบอนุกรมกับทางออก จะมีกระแสไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์

ตลอดเวลาที่ใช้งาน และตัวทรานซิสเตอร์ทำงานในลักษณะเป็นตัวต้านทานกระแสให้ผ่านมากหรือน้อยตามกระแสเบส ถ้ากระแสเบสมากก็ยอมให้กระแสผ่านตัวทรานซิสเตอร์มาก ถ้ากระแสเบสน้อยตัวทรานซิสเตอร์ยอมให้กระแสผ่านน้อย เมื่อต้องจ่ายกระแสให้กับโหลดมากจะมีกระแสไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์ที่ต่อแบบอนุกรมนี้มาก ทำให้เกิดความร้อนขึ้นมาก จึงจำเป็นต้องมีแผ่นระบายความร้อนใหญ่พอที่จะระบายความร้อนได้ทัน เพื่อไม่ให้ทรานซิสเตอร์เสียหายเนื่องจากความร้อนสูงกว่าที่จะทนทานได้ ในกรณีที่ต้องการจ่ายกระแสมากจะต้องนำทรานซิสเตอร์หลายตัวมาต่อขนานกันเพื่อให้สามารถจ่ายกระแสได้มากโดยที่ไม่เกิดความร้อนมากเกินไป ซึ่งการทำในลักษณะนี้เป็นการสิ้นเปลือง และยุ่งยากต่อการจัดวงจร ประสิทธิภาพในการรักษาระดับความต่างศักย์ย่อมน้อยลงด้วย

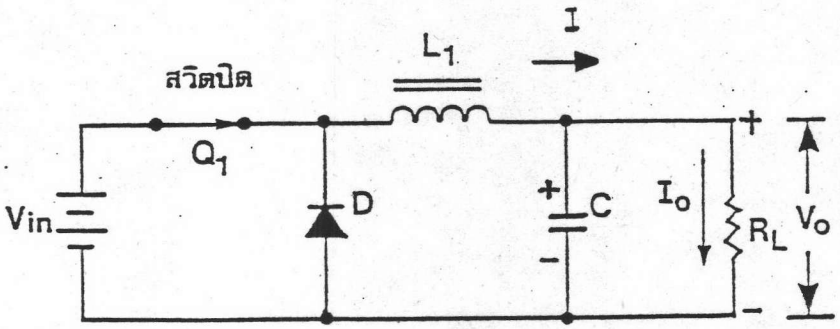
2.9 วงจรควบคุมแบบสวิตชิง (Switching regulator)(4)

วงจรควบคุมแบบสวิตชิงกำลังเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการควบคุมความต่างศักย์และกระแสโดยมีวงจรเบื้องต้นดังรูปที่ (2.8)

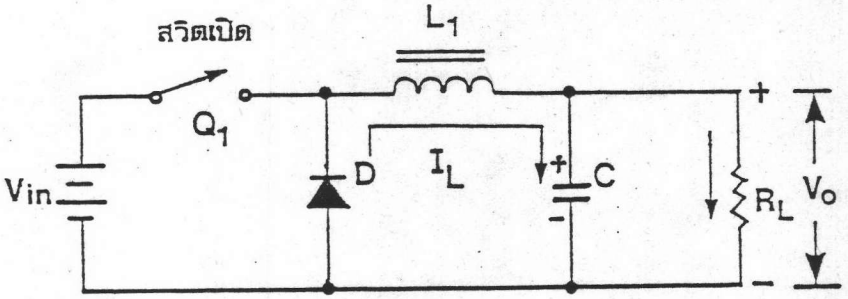


(ก)

การควบคุมแบบนี้ จะจัดการทำงานของทรานซิสเตอร์อันดับ ต่างไปจากวงจรควบคุมแบบอันดับซึ่งทำงานเป็นวงจรขยายแบบอิมิเตอร์ฟอลโลเวอร์ มาเป็นแบบเปิดและปิด ดังนั้นขณะทรานซิสเตอร์ถูกบังคับให้มีกระแสไหลผ่านไปยังโหลด ศักดาไฟฟ้าตกคร่อมตัวมันจะมีน้อย เนื่องจากการทำงานที่จุดอิ่มตัว จึงเกิดความร้อนที่ตัวทรานซิสเตอร์น้อย การสูญเสียก็ลดน้อยลง ขณะที่ทรานซิสเตอร์ถูกบังคับให้ปิด ก็จะไม่มีกระแสไหล พลังงานสะสมในขดลวดและประจุในตัวเก็บประจุจะชดเชยให้โหลด ทำให้ประสิทธิภาพของการทำงานแบบสวิตชิงสูงกว่า



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.8 (ก) แสดงวงจรสวิตชิงเบื้องต้น

(ข) แสดงวงจรขณะทรานซิสเตอร์ช่วงนำกระแส

(ค) แสดงวงจรขณะทรานซิสเตอร์ช่วงหยุดนำกระแส

หลักการทำงานของวงจรรูปที่ 2.8 (ก) ทรานซิสเตอร์ Q_1 ซึ่งเป็นแบบ N-P-N จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม V_{in} ซึ่งเป็น ไฟฟ้ากระแสตรง โดยทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำตัวคล้ายกับเป็นสวิตช์ปิด-เปิด ให้กระแสไหลผ่านออกไปตามจังหวะของสัญญาณควบคุมเบสซึ่งเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม ในช่วงที่เบสได้รับสัญญาณบวกทรานซิสเตอร์จะนำกระแสช่วงเวลา T_c รูป (ข) ทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L เกิดความต่างศักย์คร่อมโหลด R_L โดยมีขั้วตามรูป (ก) ส่วนไดโอด D นั้นต่อเป็นแบบไบอัสกลับ เมื่อเปิดในช่วง T_o

รูป (ค)สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นขณะสวิตช์เปิดจะเกิดการยุบตัว ทำให้มีกระแสไหลย้อนกลับ ทำให้ไดโอด D ที่ต่อไว้ถูกไบอัสตามเนื่องจากความต่างศักย์นี้กลับขั้ว ทำให้กระแส I_L ไหลไปประจุให้กับตัวเก็บประจุ C ทำให้เกิดความต่างศักย์คร่อมโหลด R_L ในช่วงที่ปิด และช่วงที่เปิด ตัวเหนี่ยวนำ L และตัวเก็บประจุนี้ยังทำหน้าที่คล้ายกับวงจรฟิลเตอร์ทำให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่คร่อม R_L ราบเรียบยิ่งขึ้น

จากลักษณะการทำงานที่เป็นสวิตของทรานซิสเตอร์จะมีการสูญเสียกำลังงานไปเป็นความร้อนในขณะที่อยู่ในช่วง T_c คือช่วงที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสเท่านั้น

ความต่างศักย์ทางออกถูกกำหนดด้วยสมการ

$$\text{ความต่างศักย์ทางออก } (V_{out}) = \frac{V_{in}\ T_c}{T} \qquad .....(2.5)$$

เมื่อ

T คือ คาบเวลาของพัลส์สี่เหลี่ยมที่ใช้ในการปิด-เปิด

V_{in} คือ ความต่างศักย์ทางเข้า

จากสมการ (2.5) ไฟฟ้ากระแสตรงทางออก จะถูกกำหนดด้วยช่วงเวลาในการทำงานของทรานซิสเตอร์ T_c ถ้าช่วงเวลา T_c มากขึ้นความต่างศักย์ ทางออกจะสูงขึ้น

ขณะที่ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแสในช่วงเวลา T_c กระแสไฟฟ้าทางเข้า I_{in} เฉลี่ยเป็น $I_o(T_c/T)$ เมื่อ I_o คือกระแสไฟฟ้าทางออก

กำลังไฟฟ้าที่เข้ามาคือ

$$P_{in} = \frac{V_{in}\ I_o\ T_c}{T} \qquad .....(2.6)$$

กำลังไฟฟ้าทางออกคือ

$$P_{out} = \frac{V_{in}\ T_c\ I_o}{T} \qquad .....(2.7)$$

015975

1030A186

เพราะฉะนั้น ประสิทธิภาพของวงจร $= \dfrac{P_{out}}{P_{in}}$ .....(2.8)

$$= \frac{V_{in}\, T_c\, I_o / T}{V_{in}\, T_c\, I_o / T} \quad .....(2.9)$$

ผลจากสมการ (2.9) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการทำงานแบบสวิตชิง จะไม่เกิดขึ้นกับความต่างศักย์ทางเข้าและความต่างศักย์ทางออก

ความต่างศักย์ทางออกจะถูกกำหนดได้โดยการเลือกอัตราส่วนของ T_c:T ส่วนการสูญเสียที่เกิดกับทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ต่ออนุกรมกับวงจรจะมีการสูญเสียเฉพาะช่วงเวลา T_c เท่านั้น การสูญเสียที่เกิดจากการนำกระแสของทรานซิสเตอร์ Q_1 คือ

$$P_{Qloss} = V_{CE}\, I_{CE} \quad .....(2.10)$$

เมื่อ

P_{Qloss} คือ กำลังที่สูญเสียในทรานซิสเตอร์

V_{CE} คือ ความต่างศักย์ คร่อมคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ขณะนำกระแส

I_{CE} คือ กระแสตรงที่ไหลจากคอลเลคเตอร์ไปอิมิตเตอร์ เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 ไม่นำกระแส ไดโอด D จะนำกระแส กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวไดโอด D ขณะนำกระแสคือ

$$P_{Dloss} = I_D\, V_D \quad .....(2.11)$$

เมื่อ

P_{Dloss} คือ กำลังสูญเสียที่ตัวไดโอด

I_D คือ กระแสตรงที่ไหลผ่านตัวไดโอด

V_D คือ ความต่างศักย์คร่อมตัวไดโอดขณะนำกระแส

จากสมการ (2.8)

ประสิทธิภาพ $= \dfrac{P_{out}}{P_{in}}$

เมื่อ

$$P_{in} = P_{out} + P_{loss}$$

จะได้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}}$$

$$= \frac{V_o I_o}{V_o I_o + V_{CE} + V_D I_D} \qquad .....(2.12)$$

จากสมการ (2.12)

ประสิทธิภาพของการทำงานแบบสวิตชิงจะลดลงตามการสูญเสียที่เกิดขึ้น ในตัวทรานซิสเตอร์ Q_1 และตัวไดโอด D ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว การทำงานของทรานซิสเตอร์จะนำกระแสในสภาวะอิ่มตัว (saturation) ความต่างศักย์คร่อมคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ของ Q_1 ประมาณ 0.1 โวลต์การสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวไดโอด D จะเกิดขณะไดโอดได้รับไบอัสตรงความต่างศักย์คร่อมไดโอดขณะนำกระแสนี้มีค่าประมาณ 0.6 โวลต์เมื่อไดโอดเป็นแบบซิลิคอน จะเห็นว่าการสูญเสียในวงจรควบคุมแบบสวิตชิงน้อยกว่าการสูญเสียที่เกิดขึ้น กับวงจรควบคุมแบบอนุกรมในขณะจ่ายกระแสให้กับโหลดเท่ากัน