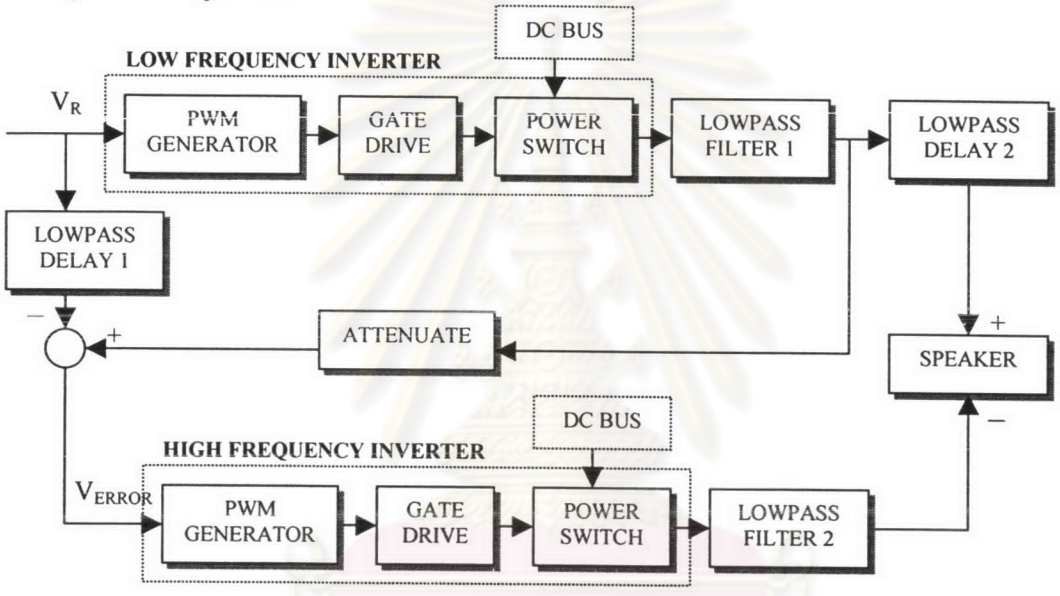
บทที่ 2

โครงสร้างและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เราจะนำเสนอโครงสร้างใหม่ของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ และ ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์

โครงสร้างของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ ที่ใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ ร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์

หลักการทำงานของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ในรูปที่ 2.1 นั้น เราจะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำทำงานร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง โดยที่วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำใช้แหล่งจ่ายไฟตรงค่าสูงและวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงใช้แหล่งจ่ายไฟตรงค่าต่ำ เพื่อลดความสูญเสียในวงจรและลดความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม ในวงจรขยายนี้เราใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำเป็นหลักในการขยาย โดยนำสัญญาณที่ได้จากการขยายโดยวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ มาทำการลดทอนเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับ สัญญาณอ้างอิงที่ได้รับการชดเชยเฟสแล้ว สัญญาณผิดเพี้ยนที่ได้จะนำไปทำการขยาย โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง หลังจากนั้นเราจะนำสัญญาณที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ และ สัญญาณผิดเพี้ยนที่ได้จากวงจรขยายคลาสดีความถี่สูงมาทำการหักล้างกัน เพื่อชดเชยความเพี้ยนของสัญญาณที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ โดยการนำไปต่อเข้ากับลำโพง

เนื่องจากโครงสร้างของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์นั้น เราใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ และอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงแบบกึ่งบริดจ์ทั้งคู่ เมื่อนำอินเวอร์เตอร์ทั้งสองมาทำงานร่วมกันทำให้เราสามารถมองโครงสร้างของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่ใช้เป็นอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ ซึ่งจะขอกล่าวถึงหลักการทำงานพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์และแบบบริดจ์ ดังต่อไปนี้

2.2 หลักการทำงานของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์

วงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ ส่วนใหญ่ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ซึ่งวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ PWM จะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบกึ่งบริดจ์ (Half Bridge) และ แบบบริดจ์ (Full Bridge) วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นวงจรแปลงผันไฟตรง –ไฟตรง ที่แรงดันด้านออก V_O สามารถแปรค่าได้ระหว่าง $-\frac{V_S}{2}$ ถึง $+\frac{V_S}{2}$ เมื่อวัฏจักรงานแปรค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้าเราให้วัฏจักรงานเป็นฟังก์ชันของเวลา d(t) โดยที่ d(t) แปรค่าอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับคาบของการสวิตช์ เราสามารถสังเคราะห์แรงดันด้านออกซึ่งค่าเฉลี่ยจะเป็นฟังก์ชันของเวลาได้ดังสมการที่ 2.1

$$\langle V_O \rangle = (2D-1)\frac{V_S}{2} \tag{2.1}$$

ถ้าต้องการแรงดัน V_O เป็นรูปคลื่นไซน์ เราจะให้ฟังก์ชันของวัฏจักรงานเป็นดังสมการที่ 2.2

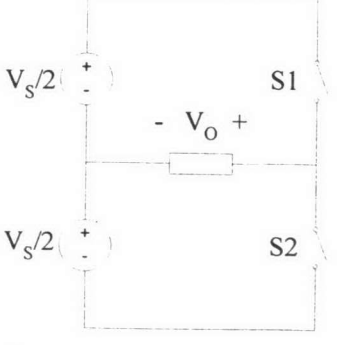
$$d(t) = 0.5 + m_a \sin\omega_a t \;;\; m_a \le 0.5 \tag{2.2}$$

โดยที่ m_a คือ อัตราการมอดูเลตแอมพลิจูด

ω_a คือ ความถี่ในการมอดูเลต (Modulating Frequency)

เมื่อแทนค่า $d(t)$ ลงในสมการที่ 2.1 จะได้ค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของ V_O ดังสมการที่ 2.3

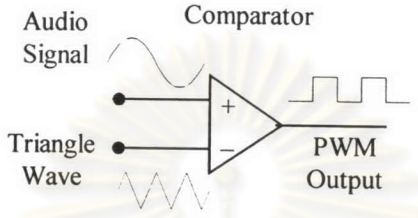
$$\bar{V}_o = \frac{V_s}{2} m_a \sin\omega_a t \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.2 อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

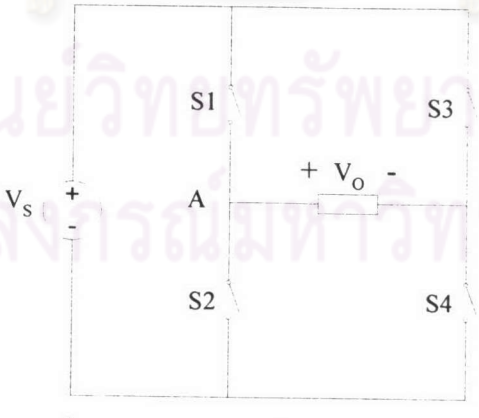
โดยทั่วไปสัญญาณ PWM สามารถสร้างได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการขยายซึ่งก็คือสัญญาณเสียงกับสัญญาณสามเหลี่ยมความถี่คงตัว แสดงดังรูปที่ 2.3 สัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบจะใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง (S1, S2) ซึ่งค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของแรงดันด้านออกจากอินเวอร์เตอร์จะสอดคล้องกับสัญญาณอ้างอิง แต่เนื่องจากแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยองค์ประกอบความถี่การสวิตช์ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการกำจัดองค์ประกอบความถี่สูงนี้ออกด้วยวงจรกรองผ่านต่ำ (Sherman, 1995)



รูปที่ 2.3 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์

2.3 หลักการทำงานของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์

โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ (Full Bridge) แสดงดังรูปที่ 2.4 การขับนำสวิตช์มี 2 แบบคือการขับนำสวิตช์ที่ใช้การสวิตช์แรงดันแบบขั้วเดียว(Unipolar Voltage Switching) และการขับนำสวิตช์ที่ใช้การสวิตช์แรงดันแบบ 2 ขั้ว (Bipolar Voltage Switching) ซึ่งการขับนำสวิตช์ทั้ง2แบบจะทำให้แรงดันออกแปรค่าอยู่ระหว่าง $-V_s$ ถึง $+V_s$ โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันเพียงชุดเดียว ถ้าใช้เทคนิคการสวิตช์แรงดันแบบขั้วเดียว ซึ่งมีข้อดีคือทำให้ความถี่การสวิตช์ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์มีค่าเป็นสองเท่าของความถี่การสวิตช์ ช่วยให้การกรองความถี่การสวิตช์ทำได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 2.4 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์

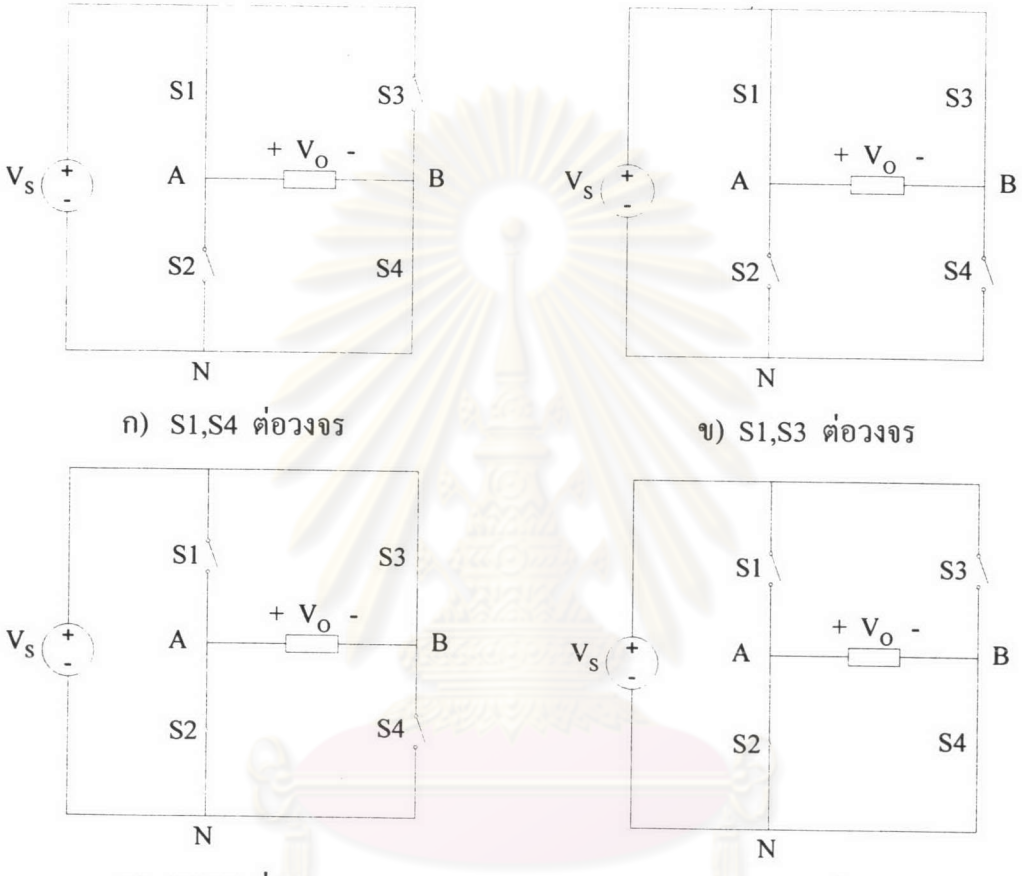
อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์สามารถขับนำให้สวิตช์ตัดต่อวงจรได้หลายรูปลักษณ์ ดังรูปที่ 2.5 จากรูปลักษณ์ต่างๆของวงจร เราสามารถหาความสัมพันธ์ของแรงดันด้านออก V_O กับ การตัดต่อสวิตช์ได้ดังนี้

ก) S1,S4 ต่อวงจร จะได้ $V_O = V_S$

ข) S1,S3 ต่อวงจร จะได้ $V_O = 0$

ค) S2,S3 ต่อวงจร จะได้ $V_O = -V_S$

ง) S2,S4 ต่อวงจร จะได้ $V_O = 0$



รูปที่ 2.5 รูปลักษณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์

จากรูปลักษณ์ของวงจร เมื่อให้สวิตช์ S1,S4 ตัดต่อวงจรพร้อมกันและทำงานเป็นคู่ประกอบกับสวิตช์ S2,S3 จะได้แรงดันด้านออกเหมือนกับกรณีอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ ซึ่งเรียกว่าการสวิตช์แรงดันแบบสองขั้ว แต่ถ้าให้สวิตช์ S1,S3 ทำงานเป็นอิสระต่อกัน (กิ่ง A และ B ทำงานเป็นอิสระต่อกัน) ที่สวิตช์ S1 กับ S2 และ S3 กับ S4 ทำงานเป็นคู่ประกอบกัน เราสามารถสร้างแรงดันด้านออกที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ซึ่งเรียกการสวิตช์แบบนี้ว่า การสวิตช์แรงดันแบบขั้วเดียว แสดงดังรูปที่ 2.6 สัญญาณขับนำสวิตช์ ในกิ่ง A และ B สามารถสร้างได้ โดยการเปรียบเทียบสัญญาณสามเหลี่ยม V_{TRI} กับ สัญญาณอ้างอิง V_R^+ และ V_R^- เมื่อกำหนดให้ขั้วลบของแหล่งจ่ายแรงดันเป็นจุดอ้างอิง N เราสามารถพิจารณาแรงดันที่กิ่งอินเวอร์เตอร์ A ได้ดังนี้

เมื่อ $V_R^+ > V_{TRI}$: S1 ON และ $V_{AN} = V_S$

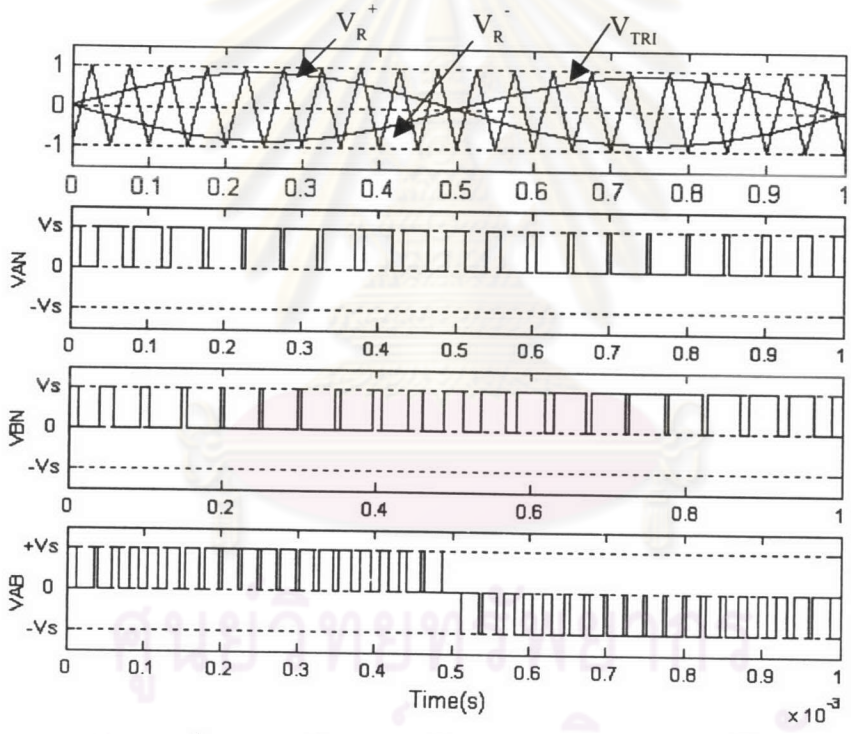
$V_R^+ < V_{TRI}$: S2 ON และ $V_{AN} = 0$

เช่นเดียวกันสัญญาณควบคุมสวิตช์ในกิ่ง B ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิง V_R^- กับสัญญาณสามเหลี่ยม V_{TRI} เดียวกัน

เมื่อ $V_R^- > V_{TRI}$: S3 ON และ $V_{BN} = V_S$

$V_R^- < V_{TRI}$: S4 ON และ $V_{BN} = 0$

สัญญาณ PWM ที่เกิดขึ้น V_{AB} จะมีระดับแรงดันด้านออกอยู่ระหว่าง 0 กับ $+V_S$ และ 0 กับ $-V_S$ และความถี่ของสัญญาณ PWM มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยมที่ใช้ในการมอดูเลต



รูปที่ 2.6 รูปคลื่น PWM ที่ใช้การสวิตช์แรงดันแบบขั้วเดียว

เราพบว่าค่าเฉลี่ย V_{AN} และ V_{BN} มีค่าขึ้นอยู่กับวัฏจักรงานของสวิตช์ S1 และ S3 เท่านั้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\frac{\langle V_{AN} \rangle}{V_S} = D_1 \qquad \text{และ} \qquad \frac{\langle V_{BN} \rangle}{V_S} = D_3 \tag{2.4}$$

โดยที่ $\langle V_{AN} \rangle$ และ $\langle V_{BN} \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยของแรงดันที่กิ่ง A และ B ตามลำดับ

D1 และ D3 คือ วัฏจักรงานของ S1 และ S3 ตามลำดับ

เมื่อ V_{TRI}^{PEAK} คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยมและ V_R^{PEAK} คือค่ายอดของสัญญาณอ้างอิง เราจะนิยามอัตราการมอดูเลต m_a ดังนี้

$$m_a = \frac{V_R^{PEAK}}{2V_{TRI}^{PEAK}} \tag{2.5}$$

ถ้าเรากำหนดให้ d_1 และ d_3 เป็นฟังก์ชันของเวลา จะได้

$$d_1(t) = 0.5 + m_a \sin\omega_a t \qquad \text{และ} \qquad d_3(t) = 0.5 - m_a \sin\omega_a t \tag{2.6}$$

โดยที่ อัตราการมอดูเลต m_a มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.5

ω_a คือ ความถี่การมอดูเลต (ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง)

เมื่อแทนสมการที่ 2.6 ลงในสมการที่ 2.4 จะได้

$$\frac{\bar{V}_{AN}}{V_S} = 0.5 + m_a \sin\omega_a t \qquad \text{และ} \qquad \frac{\bar{V}_{BN}}{V_S} = 0.5 - m_a \sin\omega_a t \tag{2.7}$$

โดยที่ $\bar{V}_{AN}$ และ $\bar{V}_{BN}$ คือค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของแรงดัน V_{AN} และ V_{BN} ตามลำดับ นั่นคือ

$$\frac{\bar{V}_O}{V_S} = \frac{\bar{V}_{AB}}{V_S} = 2m_a \sin\omega_a t = \frac{V_R^{PEAK}}{V_{TRI}^{PEAK}} \sin\omega_a t \tag{2.8}$$

หรือ

$$\frac{\bar{V}_O}{V_S} = m_{a1} \sin\omega_a t \tag{2.9}$$

โดยที่ อัตราการมอดูเลต m_{a1} ในสมการที่ (2.9) มีค่าเท่ากับ $V_R^{PEAK} / V_{TRI}^{PEAK}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจาก สมการที่ 2.5 เนื่องจากสมการที่ 2.9 มองความสัมพันธ์โดยรวมของอินเวอร์เตอร์ แต่สมการที่ 2.5 จะวิเคราะห์แต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 ความเพี้ยนของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์เนื่องจากผลของเวลาพัก

เวลาพัก (Dead Time หรือ Blanking Time) t_d หมายถึง เวลาที่ประวิงการนำกระแสของสวิตช์ โดยปกติสวิตช์ในกิ่งเดียวกันของบริดจ์จะทำงานแบบคู่ประกอบ คือ เมื่อมีคำสั่งให้สวิตช์ตัวหนึ่งนำกระแส สวิตช์อีกตัวหนึ่งจะได้รับคำสั่งให้หยุดนำกระแส อย่างไรก็ดี เนื่องจากความไม่อุดมคติของสวิตช์ สวิตช์ตัวที่ได้รับคำสั่งให้หยุดนำกระแสอาจใช้เวลาหลายไมโครวินาทีกว่าจะหยุดนำกระแสได้จริง ถ้าช่วงเวลาสั้นๆนี้สวิตช์อีกตัวเริ่มนำกระแสแล้ว ก็จะเกิดการทะลุผ่าน (Shoot Through) คือ จะมีกระแสค่าสูงไหลผ่านสวิตช์ทั้งสอง เราจึงต้องประวิงเวลาการนำกระแสไว้เท่ากับ t_d เพื่อป้องกันปัญหานี้

อย่างไรก็ดี เวลาพัก t_d ทำให้เกิดการเพี้ยนต่อรูปคลื่นที่เป็นค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ (หรือองค์ประกอบหลักมูล) ของแรงดันด้านออกซึ่งจะอธิบายได้ดังนี้ รูปที่ 2.7 (ก) แสดงวงจรบริดจ์ที่ใช้เป็นอินเวอร์เตอร์แบบ PWM สัญญาณขับนำสวิตช์ Q_1 และ Q_4 ได้จากเทคนิคไซน์ตัดสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ข)

แต่เมื่อมีเวลาพัก t_d สัญญาณขับนำสวิตช์จะเป็นดังในรูปที่ 2.7 (ค) ในช่วงเวลา t_d สวิตช์ไวงานไม่นำกระแสทั้งคู่ แต่ไดโอดที่ต่อขนานสวิตช์ไวงานจะนำกระแส โดยที่ D_4 นำกระแสเมื่อ $i_o > 0$ และ D_1 นำกระแสเมื่อ $i_o < 0$ รูปคลื่น v_{AN} จึงเป็นดังในรูปที่ 2.7 (ง) คือ เมื่อ $i_o > 0$, $v_{AN} = 0$ ในช่วงเวลา t_d ดังนั้นค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของ v_{AN} ซึ่งเท่ากับวัฏจักรงานของ Q_1 หรือ D_1 คูณด้วย V_s จะต่างไปจากค่าอุดมคติดังสมการที่ 2.10

$$\Delta v_{AN} = \pm\Delta\,(\text{วัฏจักรงาน})\,V_s = \pm\left(\frac{t_d}{T}\right)V_s \tag{2.10}$$

โดยที่เครื่องหมาย + ในสมการที่ 2.10 ตรงกับ $i_o < 0$ ในทำนองเดียวกันค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของ v_{BN} จะต่างไปจากอุดมคติเท่ากับ

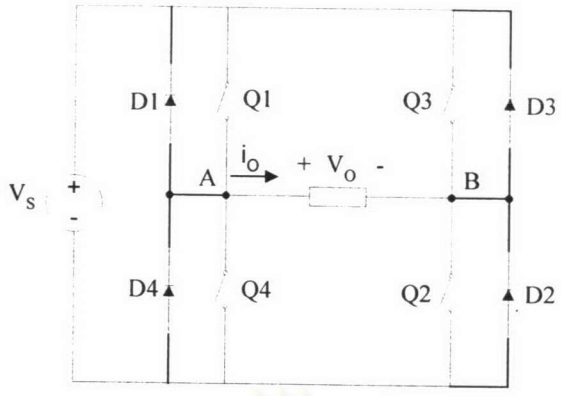
$$\Delta v_{BN} = \pm\left(\frac{t_d}{T}\right)V_s \tag{2.11}$$

โดยที่เครื่องหมาย + ในสมการที่ 2.11 ตรงกับ $i_o > 0$ ดังนั้นค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของ v_o จะต่างไปจากค่าอุดมคติเท่ากับ

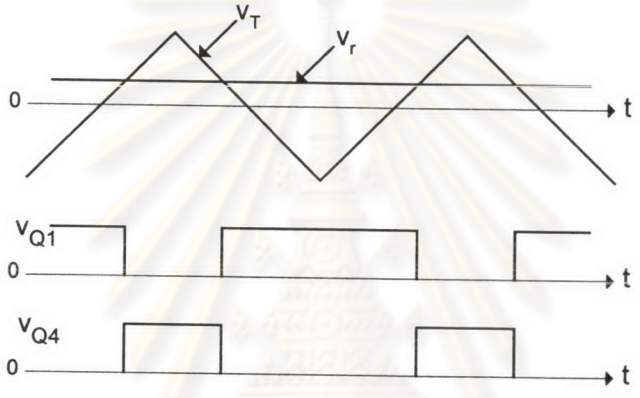
$$\Delta v_o = \Delta v_{AN} - \Delta v_{BN} = \pm\frac{2t_d}{T}V_s \tag{2.12}$$

โดยที่เครื่องหมาย + ในสมการที่ 2.12 ตรงกับ $i_o < 0$ รูปคลื่นของ v_o จะเพี้ยนไปจากรูปอุดมคติคือมีการเปลี่ยนระดับเล็กน้อยทุกครั้งที่ i_o เปลี่ยนเครื่องหมาย

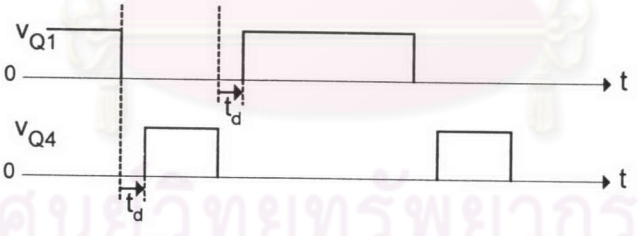
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



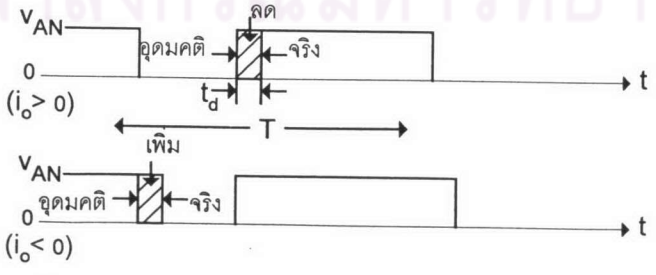
(ก) วงจรบริดจ์



(ข) การกำเนิดสัญญาณขับนำสวิตช์ Q_1, Q_4 กรณีอุดมคติ



(ค) การกำเนิดสัญญาณขับนำสวิตช์ Q_1, Q_4 เมื่อมีเวลาพัก t_d



(ง) รูปคลื่น v_{AN} แสดงการลดหรือเพิ่มค่าเฉลี่ยเฉพาะที่เมื่อ $i_o > 0$ หรือ $i_o < 0$

รูปที่ 2.7 ผลของเวลาพัก t_d ต่อรูปคลื่น v_{AN} ของวงจรบริดจ์

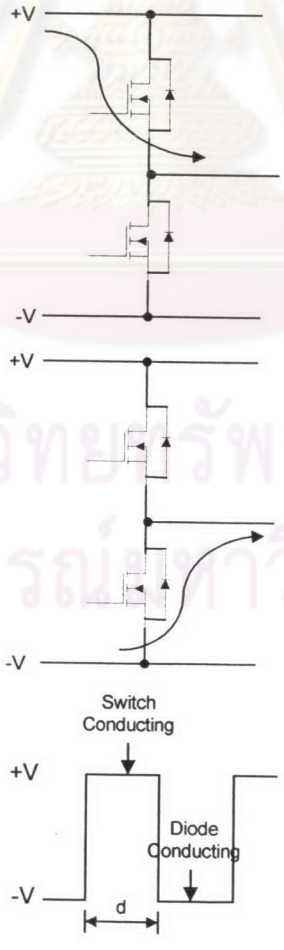
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 ความสูญเสียเมื่อเกิดการสวิตช์ของวงจรขยาย

ความแตกต่างของวงจรขยายแบบเชิงเส้น คลาสเอ, บี และ ซี กับ วงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ ในทางทฤษฎี วงจรขยายแบบวิธีสวิตช์มีประสิทธิภาพ (Efficiency) 100% ถ้าสวิตช์ทำงานแบบอุดมคติ (ความต้านทานเป็นศูนย์ขณะสวิตช์ON, ความต้านทานเป็นอนันต์ขณะสวิตช์OFF, ไม่มีความเหนี่ยวนำเบียดเบียน และ ความจุไฟฟ้าเบียดเบียน และ เวลาในการ ON และ OFF เป็นศูนย์) นั่นคือ ความสูญเสีย(Loss)ในวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์จะเป็นศูนย์ ส่วนวงจรขยายแบบเชิงเส้นนั้น ความสูญเสียเป็นสาเหตุมาจากการทำงานในย่านที่เป็นเชิงเส้นของสวิตช์ ทำให้ประสิทธิภาพในทางทฤษฎีต่ำกว่า 100% มาก อย่างไรก็ตาม สวิตช์และส่วนประกอบ (Component) ต่างๆ ไม่สามารถทำงานแบบอุดมคติได้ ดังนั้นวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์จึงเกิดความสูญเสียในสวิตช์ขึ้น ซึ่งความสูญเสียในสวิตช์นั้นมีอยู่ 2 แบบ ดังนี้

2.5.1 ความสูญเสียจากการนำกระแส

เส้นทางของกระแส ระหว่างการสับเปลี่ยนการนำกระแสของสวิตช์ และ ไดโอดในวงจรอินเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เส้นทางการนำกระแสของสวิตช์และไดโอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.8 แสดงเส้นทางของกระแส ระหว่างการสับเปลี่ยนการนำกระแสของสวิตช์ และไดโอด ซึ่งสัดส่วนของเวลาที่ใช้ขณะสวิตช์นำกระแสหรือไดโอดนำกระแสขึ้นอยู่กับวัฏจักรงาน d ดังนั้น สัญญาณด้านออกที่เป็นรูปคลื่นไซน์ จะเกิดความสูญเสียตลอดเวลาขณะสวิตช์นำกระแสหรือไดโอดนำกระแส ซึ่งความสูญเสียสามารถคำนวณได้ดังนี้

ความสูญเสียจากการนำกระแสของสวิตช์แสดงดังสมการ

$$P_c = I^2_{D(rms)} R_{DS(on)} \tag{2.13}$$

เมื่อไดโอดนำกระแสค่าความสูญเสียแสดงดังสมการ

$$P_C = I_{D(rms)} V_{SD} \tag{2.14}$$

โดยที่ V_{SD} แรงดันไปหน้า (Forward Drop Voltage) ของไดโอด

2.5.2 ความสูญเสียจากการสวิตช์

เมื่อสวิตช์อยู่ในช่วงการเปลี่ยนสถานะหรือที่เรียกว่าช่วงเวลาการสวิตช์ ผลคูณของกระแสและแรงดันของสวิตช์ $i_{sw}v_{sw}$ จะมีค่าสูง ซึ่งหมายถึงความสูญเสียจะมีค่าสูงนั่นเอง ความสูญเสียจากการสวิตช์นอกจากจะขึ้นอยู่กับความถี่ในการสวิตช์ f_{sw} แล้ว ยังขึ้นอยู่กับลักษณะการไขว้กันของกระแส และ แรงดันในช่วงการเปลี่ยนสถานะด้วย รูปที่ 2.9 (ก) แสดงการไขว้กัน ซึ่งสมมติการแปรผันแบบเชิงเส้นที่มีการเหลื่อมกันเฉพาะในช่วงการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งถือว่าเป็นการไขว้กันเล็กน้อยในกรณีนี้เราคำนวณได้ว่าความสูญเสียจากการสวิตช์มีค่าเท่ากับ

ความสูญเสียจากการสวิตช์

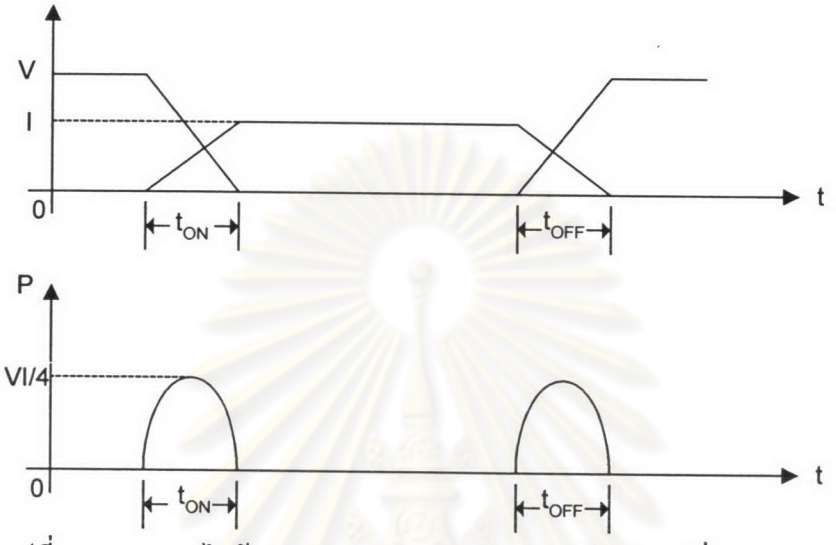
$$= f_{sw} VI \left[\int_0^{t_{ON}} \left\{ 1 - \left(\frac{t}{t_{ON}} \right) \right\} \left(\frac{t}{t_{ON}} \right) dt + \int_0^{t_{OFF}} \left\{ 1 - \left(\frac{t}{t_{OFF}} \right) \right\} \left(\frac{t}{t_{OFF}} \right) \right] dt$$

$$= f_{sw} VI \left(\frac{t_{ON} + t_{OFF}}{6} \right) \tag{2.15}$$

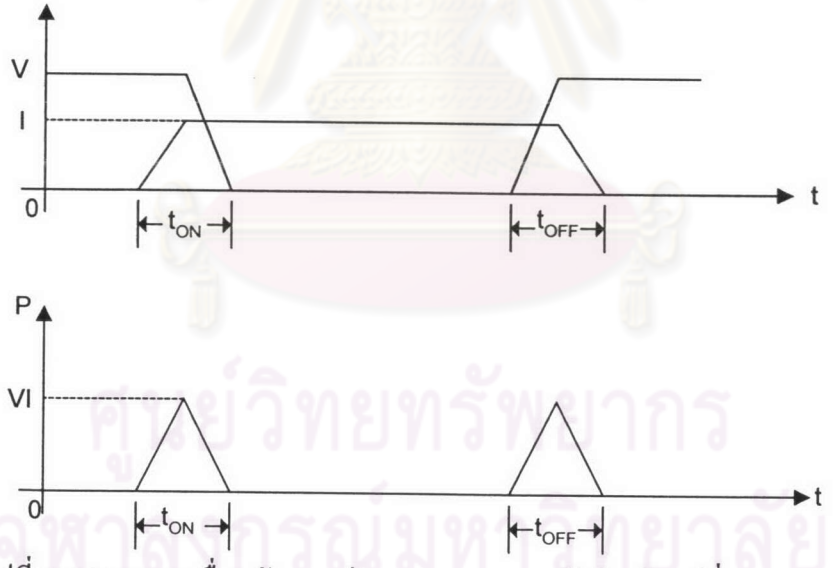
ถ้าเราสมมติว่าการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของกระแส และ แรงดันในช่วงเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้นแบบเหลื่อมกัน คือ ปริมาณหนึ่งเพิ่มขึ้นจากศูนย์ อีกปริมาณหนึ่งจะยังไม่ลดจนกว่าการเพิ่มจะแล้วเสร็จ ลักษณะการไขว้และเหลื่อมกันในทำนองนี้ตรงกับกรณีที่สวิตช์ต่ออยู่กับตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 2.9 (ข) เราคำนวณได้ว่าความสูญเสียจากการสวิตช์มีค่าเท่ากับ

$$\text{ความสูญเสียจากการสวิตช์} = f_{sw} VI\left(\frac{t_{ON} + t_{OFF}}{2}\right) \quad (2.16)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ 2.15 และ 2.16 จะเห็นได้ว่า การเหลื่อมกันทำให้ความสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นสามเท่า



รูปที่ 2.9 (ก) การไขว้ของกระแสและแรงดันเฉพาะในช่วงเปลี่ยนสถานะ



รูปที่ 2.9 (ข) การเหลื่อมกันระหว่างกระแสและแรงดันในช่วงเปลี่ยนสถานะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย