



การควบคุมมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นสามารถควบคุมได้ทั้งด้านอาร์เมเจอร์และด้านขดลวดสนามแม่เหล็ก ซึ่งแต่ละวิธีต่างก็มีข้อดีและข้อเสียและมีความเหมาะสมกับงานที่แตกต่างกันดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 สำหรับมอเตอร์กระแสตรงแบบเซอร์โวนั้นมักจะควบคุมทางด้านอาร์เมเจอร์ เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงแบบเซอร์โวนั้นจะใช้กับงานที่ต้องการการตอบสนองที่รวดเร็ว การควบคุมทางด้านขดลวดสนามแม่เหล็กจึงไม่เหมาะสมกับมอเตอร์แบบเซอร์โว เนื่องจากการตอบสนองช้าเมื่อเทียบกับการควบคุมด้านอาร์เมเจอร์ ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจถึงวิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบเซอร์โว จึงจำต้องกล่าวถึงคุณสมบัติของมอเตอร์เซอร์โวที่ควบคุมด้านอาร์เมเจอร์ โดยมีการต่อวงจรทางด้านขดลวดสนามแบบแยกหรือประเภทที่เป็นแม่เหล็กถาวร ตลอดจนกล่าวถึงเครื่องควบคุมมอเตอร์กระแสตรงเซอร์โวที่ใช้หลักการทำงานแบบสวิตชิงซึ่งมีประสิทธิภาพสูง

2.1 ลักษณะสมบัติของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงที่ควบคุมด้านอาร์เมเจอร์ [Dewan, Slemon, Straughen, 1984; Leonhard, 1985]

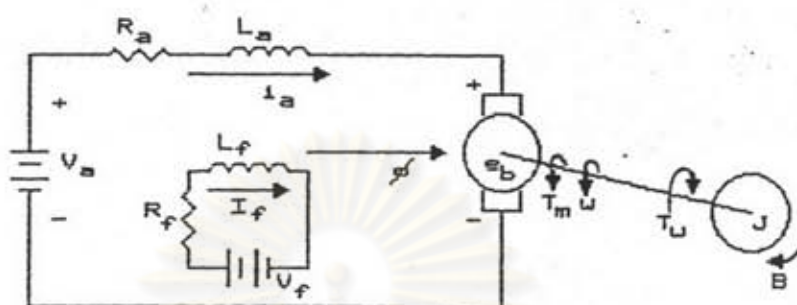
ลักษณะสมบัติของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงที่ควบคุมด้านอาร์เมเจอร์จะศึกษาได้จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและระบบเชิงกลดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's voltage law) กับวงจรอาร์เมเจอร์จะได้

$$v_a = e_b + L_a (di_a/dt) + R_a \cdot i_a \quad (2.1)$$

เนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำ (back emf) e_b มีค่าแปรผันตรงกับความเร็วของการหมุน ω (เรเดียน/วินาที) ของอาร์เมเจอร์ และ

ฟลักซ์แม่เหล็ก ϕ (เวเบอร์) ของขั้วแม่เหล็ก ดังนั้นจะได้

$$e_b = K \cdot \phi \cdot \omega \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าและลักษณะเชิงกลของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง

ส่วนแรงบิดมอเตอร์ (T_m) มีค่าแปรผันตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ (i_a) และฟลักซ์แม่เหล็ก (ϕ) ของขั้วแม่เหล็ก ดังนั้นแรงบิดของมอเตอร์จะคำนวณได้จากสมการ 2.3

$$T_m = K \cdot \phi \cdot i_a \quad (2.3)$$

โดยที่ K คือ ค่าคงที่

เมื่อพิจารณาระบบเชิงกล ในรูปที่ 2.1 จะได้ว่า

$$T_m = T_L = J \cdot (d\omega/dt) + B \cdot \omega + T_w \quad (2.4)$$

โดยที่ J คือ ค่าคงที่เนื่องจากความเฉื่อยของทั้งมอเตอร์และโหลด

B คือ ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดของทั้งมอเตอร์และโหลด

T_w คือ แรงบิดของโหลด

T_L คือ แรงบิดรวมของโหลด

จากสมการที่กำหนดลักษณะสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

แบบเซอร์โว (2.1-2.4) จะสามารถแยกพิจารณาการทำงานของมอเตอร์ได้ 2 ลักษณะ คือ สถานะอยู่ตัว (steady state) และ สถานะพลวัต (dynamic state)

2.1.1 สถานะอยู่ตัว (steady state) ในสถานะอยู่ตัวการเปลี่ยนแปลงของกระแส (di/dt) และ ความเร็ว (dw/dt) จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นเมื่อแทนค่าสมการที่ 2.2 และ 2.3 ลงในสมการที่ 2.1 และ 2.4 จะได้

$$v_a = K \cdot \phi \cdot w + i_a \cdot R_a \quad (2.5)$$

$$T_m = K \cdot \phi \cdot i_a = T_L = B \cdot w + T_w \quad (2.6)$$

จากสมการ 2.5 จะได้

$$w = (v_a - i_a \cdot R_a) / (K \cdot \phi) \quad (2.7)$$

โดยทั่วไปแล้วแรงดันตกคร่อมความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ (R_a) จะมีค่าต่ำกว่าแรงดันพิกัดของมอเตอร์มาก ดังนั้นจากสมการ 2.7 อาจจะสามารถกล่าวได้ว่า ความเร็วของมอเตอร์จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันของวงจรวอร์มเจอร์โดยประมาณและจากสมการ 2.6 จะเห็นได้ว่าแรงบิดของมอเตอร์จะแปรผันโดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงแบบเซอร์โวได้โดยการควบคุมแรงดันและกระแสอาร์เมเจอร์ตามลำดับ เมื่อแทนค่า i_a จากสมการที่ 2.6 ลงในสมการที่ 2.7 จะได้ว่า

$$w = \frac{v_a}{K \cdot \phi} - \frac{R_a \cdot T_L}{(K \cdot \phi)^2} = \frac{K \cdot \phi \cdot v_a - R_a \cdot T_L}{(K \cdot \phi)^2} \quad (2.8)$$

จากสมการ 2.8 จะได้ว่า กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง w กับ T_L จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความลาดชันเป็นลบเท่ากับ $R_a / (K \cdot \phi)^2$ และมีความเร็วที่แรงบิดเป็นศูนย์เท่ากับ $v_a / (K \cdot \phi)$ ดังแสดงในรูป ที่ 2.2

จะเห็นได้ว่าสำหรับแรงบิดที่เท่ากัน ความเร็วของมอเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรง (v_u) มีค่าสูงขึ้น จุดทำงานของระบบสำหรับแรงดัน v_u ค่าหนึ่งจะอยู่ที่จุดตัดของกราฟระหว่างความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์ (T_{m1}, T_{m2}) และกราฟระหว่างความเร็วกับแรงบิดรวมของโหลด (T_L) ดังนั้นจึงสามารถเลือกจุดทำงานของระบบได้โดยการปรับค่าแรงดัน v_u เมื่อให้กราฟระหว่างความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์ตัดกับกราฟระหว่างความเร็วกับแรงบิดของโหลดที่จุดต่างๆ กันได้ ทำให้สามารถกำหนดความเร็วได้ตามต้องการ จะเห็นได้ว่าสามารถที่จะควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงโดยการควบคุมแรงดันที่ป้อนให้แก่ วงจรอาร์เมเจอร์

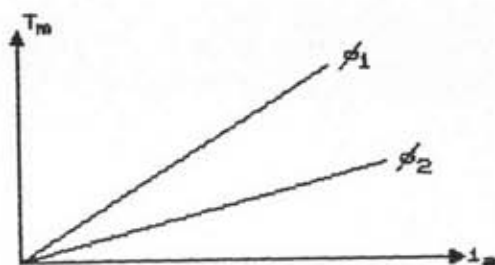


รูปที่ 2.2

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรง
ที่แรงดัน v_u ค่าต่างๆ กัน

จากสมการ 2.6 จะเห็นได้ว่าแรงบิดของมอเตอร์จะแปรผันโดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันเป็นบวกเท่ากับ K_ϕ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากลักษณะสมบัติดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสามารถควบคุมแรงบิดได้โดยตรง

ถ้าแหล่งจ่ายไฟตรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงเป็นแหล่งจ่ายกระแส ทำให้สามารถที่จะกำหนดแรงบิดของมอเตอร์ได้โดยตรงโดยไม่ขึ้นกับความเร็วของมอเตอร์เหมือนกับในกรณีที่ใช้แหล่งจ่ายแรงดันดังได้กล่าวมาแล้ว และคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งในการควบคุมมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงก็คือสามารถควบคุมกระแสที่เข้ามอเตอร์ได้รวดเร็วกว่าการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.3

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์เซอร์โว
กระแสตรง

ความเร็วในระบบเชิงกลมาก ดังนั้นจึงอาจจะกล่าวได้ว่าสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงได้ทั้งในสถานะอยู่ตัวและสถานะพลวัต ซึ่งจะทำให้การตอบสนองของระบบมีความเร็วสูงสุด รูปที่ 2.2 แสดงการทำงานในควอดแรนต์ที่ 1 และ 2 สำหรับการทำงานในควอดแรนต์ที่ 3 และ 4 ก็มีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 2.2 เพียงแต่ความเร็วของมอเตอร์จะมีทิศทางตรงกันข้าม

2.1.2 สถานะพลวัต (dynamic state) การศึกษาเสถียรภาพของระบบตลอดจนการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์นั้น จำเป็นต้องเข้าใจถึงลักษณะสมบัติของมอเตอร์และโหลดในสถานะพลวัต ลักษณะสมบัติในสถานะพลวัตของมอเตอร์จะเป็นไปตามสมการที่ 2.1 และ 2.4 เมื่อนำมาเขียนใหม่โดยแทน K_ϕ ด้วย K_1 จะได้

$$v_a = K_1 \cdot w + L_a (di_a/dt) + R_a \cdot i_a \quad (2.9)$$

$$T_m = K_1 \cdot i_a = J \cdot (dw/dt) + B \cdot w + T_w \quad (2.10)$$

จากสมการทั้งสองจะสามารถหาลักษณะสมบัติในสถานะพลวัตของมอเตอร์และโหลด ซึ่งโดยทั่วไปนิยมเขียนอยู่ในรูปของบล็อกไดอะแกรม จากสมการที่ 2.9 เมื่อใช้การแปลงแบบลาปลาซและย้ายข้างจะได้

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_1 \cdot W(s)}{s \cdot L_a(s) + R_a} = \frac{V_a(s) - K_1 \cdot W(s)}{R_a \cdot (s \cdot T_a + 1)} \quad (2.11)$$

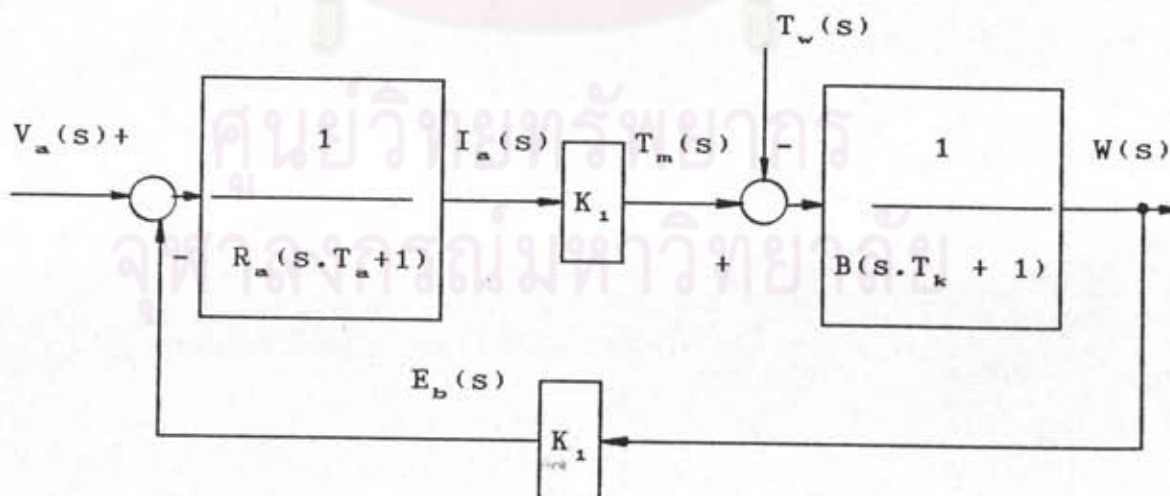
โดยที่ T_a คือค่าคงที่เวลาของวงจรรออาร์เมเจอร์ มีค่าเท่ากับ L_a/R_a วินาที

จากสมการ 2.10 เมื่อใช้การแปลงแบบ ลาลาซ และย้ายข้างจะ
ได้

$$W(s) = \frac{T_m(s) - T_w(s)}{s \cdot J + B} = \frac{T_m(s) - T_w(s)}{B(s \cdot T_k + 1)} \quad (2.12)$$

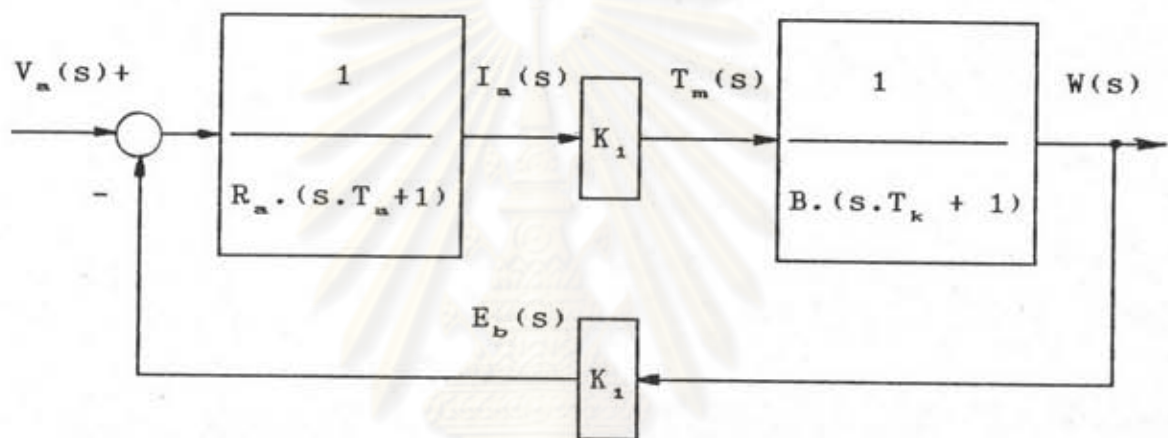
โดยที่ T_k คือค่าคงที่เวลาทางกลของทั้งมอเตอร์และระบบทางกล มีค่าเท่ากับ J/B วินาที

จากสมการที่ 2.11 และ 2.12 สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้แหล่งจ่ายเป็นแหล่งแรงดันได้ดังรูปที่ 2.4

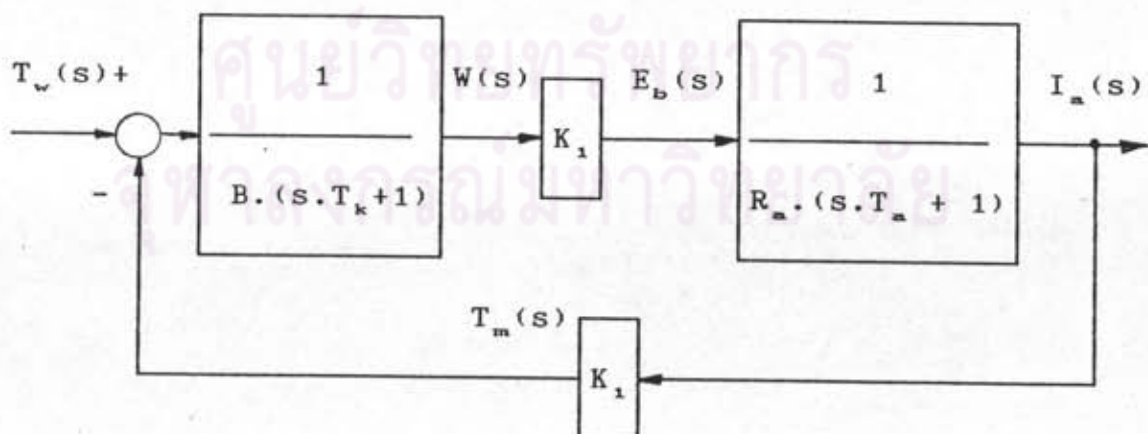


รูปที่ 2.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรอิสระ 2 ตัวคือ $V_m(s)$ และ $T_w(s)$ เมื่อจะพิจารณาผลของ $V_m(s)$ ต่อ $W(s)$ อย่างเดียว สามารถหาได้โดยการให้ $T_w(s) = 0$ บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.4 ก็จะเป็นดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.5ก จากรูป 2.5ก จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_m(s)$ ต่อ $V_m(s)$ ดังสมการ 2.13ก และเมื่อจะพิจารณาผลของ $T_w(s)$ ต่อ $W(s)$ อย่างเดียวสามารถหาได้โดยการให้ $V_m(s) = 0$ บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.4 ก็จะเป็นดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.5ข จากรูป 2.5ข จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_m(s)$ ต่อ $T_w(s)$ ดังสมการ 2.13ข



รูปที่ 2.5ก แสดงบล็อกไดอะแกรมมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงเมื่อ $T_w(s) = 0$



รูปที่ 2.5ข แสดงบล็อกไดอะแกรมมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงเมื่อ $V_m(s) = 0$

$$\frac{I_a(s)}{V_a(s)} = \frac{B.(s.T_k + 1)}{R_a.B.(s.T_a + 1).(s.T_k + 1) + K_1^2} \quad (2.13 \text{ ก})$$

$$\frac{I_a(s)}{T_w(s)} = \frac{K_1}{R_a.B.(s.T_a + 1).(s.T_k + 1) + K_1^2} \quad (2.13 \text{ ข})$$

แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษาคุณลักษณะสมบัติในสถานะพลวัตจะพิจารณาเฉพาะผลของ V_a ต่อ I_a เท่านั้น โดยกำหนดให้ T_w มีค่าคงที่ การคำนวณหาคุณลักษณะสมบัติในสถานะพลวัตในรูปของตัวแปรที่มีการทำให้เป็นบรรทัดฐานทำได้โดยนำสมการ 2.9 และ 2.10 มาทำให้เป็นบรรทัดฐาน (normalized) โดยใช้ฐานในการทำให้เป็นบรรทัดฐานดังนี้คือ

- ฐานความเร็ว (ω_o) ใช้ความเร็ววิกฤตของมอเตอร์ (rated speed) มีหน่วย เป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/s)
- ฐานแรงดัน (V_{ao}) ใช้แรงดันวิกฤตของอาร์เมเจอร์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V) โดยมีค่าเท่ากับ $K_1 \cdot \omega_o$
- ฐานกระแส (I_{ao}) ใช้กระแสลัดวงจรในขณะที่มอเตอร์ไม่หมุน (V_{ao}/R_a) มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
- ฐานแรงบิด (T_o) ใช้แรงบิดของมอเตอร์เมื่อกระแสในวงจรอาร์เมเจอร์และกระแสในวงจรสนามมีค่าเท่ากับวิกฤต ($K_1 \cdot I_{ao}$) มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N.M)

จากสมการ 2.9 หากด้วย V_{ao} จะได้

$$\frac{v_a}{V_{ao}} = \frac{K_1 \cdot \omega}{V_{ao}} + \frac{L_a \cdot d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ v_a \end{bmatrix} + \frac{R_a \cdot i_a}{V_{ao}}$$

$$V_{an} = W_n + T_{an} \frac{di_{an}}{dt} + i_{an} \quad (2.14)$$

ให้ subscript n หมายถึง ค่า normalized พารามิเตอร์ 2.4 ด้วย T_o จะได้

$$\frac{T_m}{T_o} = \frac{J \cdot d}{dt} \left[\frac{w}{T_o} \right] + \frac{B \cdot w}{T_o} + \frac{T_w}{T_o}$$

$$T_{mn} = T_{kn} \cdot (dw_n/dt) + B_n \cdot W_n + T_{wn} \quad (2.15)$$

เช่นกัน subscript n หมายถึงค่า normalized โดยที่

$$T_{kn} = (J \cdot W_o / T_o)$$

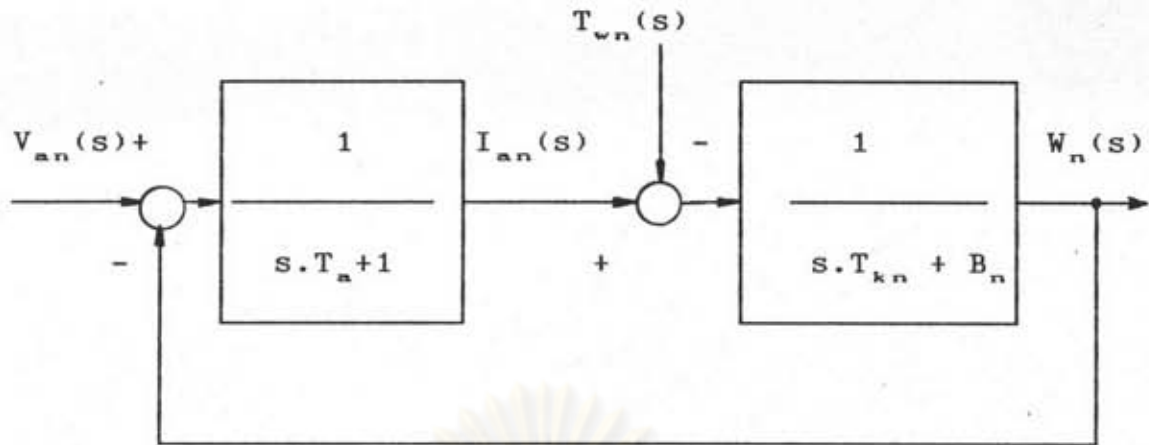
$$B_n = (B \cdot W_o / T_o)$$

จากสมการ 2.14 และ 2.15 เมื่อใช้การแปลงแบบลาปลาซและย้ายข้างจะได้

$$I_{an}(s) = \frac{V_{an}(s) - W_n(s)}{s \cdot T_a + 1} \quad (2.16)$$

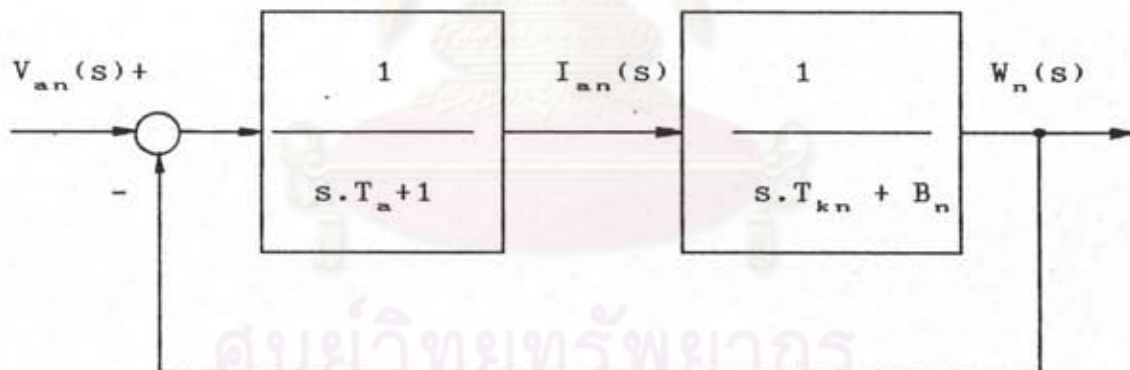
$$W_n(s) = \frac{T_{mn}(s) - T_{wn}(s)}{s \cdot T_{kn} + B_n} \quad (2.17)$$

จากสมการ 2.16 และ 2.17 นำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมโดยแทน $T_{mn}(s)$ ด้วย $I_{an}(s)$ จะได้บล็อกไดอะแกรมดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง
ที่ได้ทำเป็นบรรทัดฐานแล้ว

เมื่อนิยามผลของ $V_{an}(s)$ ต่อ $W_n(s)$ อย่างเดียว สามารถทำได้ จากรูปที่ 2.6 โดยให้ $T_{wn}(s) = 0$ ได้บล็อกไดอะแกรมดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง
ในรูป normalized เมื่อให้ $T_{wn}(s) = 0$

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.7 สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{an}(s)/I_{an}(s)$ ได้ดังสมการ 2.19 สมการ 2.19 เป็นอัตราส่วนระหว่างกระแสกับแรงดันซึ่งก็คือแอดมิตแตนซ์นั่นเอง ดังนั้นจึงนิยามพจน์ $I_{an}(s)/V_{an}(s)$ ว่าเป็นค่าบรรทัดฐานของแอดมิตแตนซ์ของมอเตอร์กระแสตรงพร้อมโหลดที่มองเข้าด้านอาร์เมเจอร์

$$\frac{I_{an}(s)}{V_{an}(s)} = \frac{s \cdot T_{kn} + B_n}{s^2 \cdot T_a \cdot T_{kn} + s \cdot (T_a \cdot B_n + T_{kn}) + B_n + 1} \quad (2.19)$$

2.2 วงจรขยายเซอร์โว (Servo Amplifier)

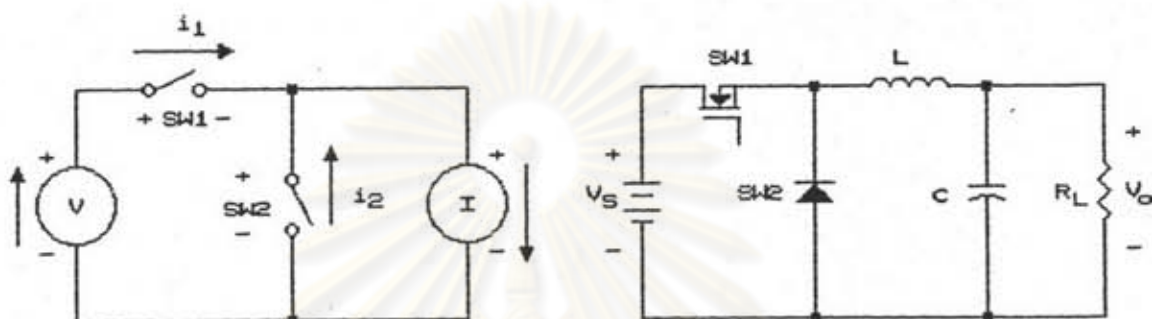
ในการควบคุมมอเตอร์เซอร์โวนั้นจะต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่สามารถควบคุมกระแสหรือแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวก็คือ วงจรขยายเซอร์โวซึ่งมีอยู่หลายแบบดังได้กล่าวมาแล้ว ในปัจจุบัน วงจรขยายเซอร์โวแบบสวิตชิงกำลังได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง และมีความเร็วในการตอบสนองเพียงพอสำหรับการควบคุมมอเตอร์เซอร์โวโดยสามารถควบคุมได้ทั้งกระแสและแรงดัน ตลอดจนสามารถควบคุมทิศทางการไหลของพลังงานได้โดยง่าย ดังนั้นจึงเลือกสร้างวงจขยายเซอร์โวแบบสวิตชิง วงจรขยายเซอร์โวโดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนประกอบใหญ่ 2 ส่วนคือ ภาคกำลังและภาคควบคุม โดยภาคกำลังจะมีหน้าที่แปลงผันระดับของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าตามสัญญาณควบคุม ส่วนภาคควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของภาคกำลังเพื่อให้ได้ระดับของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าตามความต้องการของระบบ

2.2.1 ภาคกำลัง (power circuit) ภาคกำลังของวงจขยายเซอร์โวแบบสวิตชิงโดยทั่วไปจะเป็นวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบสวิตชิงซึ่งทำหน้าที่แปลงผันระดับของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าเป็นไปตามสัญญาณควบคุม วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงมีหลายแบบแต่ละแบบจะมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน ทั้งในแง่ของอัตราการทำงานแปลงผันแรงดัน (V_o/V_u) ความต่อเนื่องของกระแสด้านเข้าและขาออก ความสามารถในการกลับทิศทางของแรงดันออก ตลอดจนความยากง่ายในการใช้วงจรดังกล่าว สำหรับทิศทางการไหลของกระแสและพลังงานนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะการทำงานของสวิตซ์ที่ใช้ในวงจร ในปัจจุบันได้มีการค้นคิดรูปแบบของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ [Mitchell, 1988] แต่วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงพื้นฐาน ที่เป็นที่

รู้จักกันแพร่หลายจะมีเพียงไม่กี่วงจรซึ่งมีรูปแบบของวงจรและลักษณะสมบัติดังนี้คือ

2.2.1.1 วงจรทอนระดับ (Buck converter)

วงจรทอนระดับเป็นวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่ให้แรงดันออกต่ำกว่าแรงดันเข้าเสมอ มีโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.8 ก. สถานะการทำงานปกติพลังงานจะไหลจากกิ่งแรงดันสู่กิ่งกระแส สวิตช์ SW1 และ SW2 จะต้องมีทิศทางการไหลของกระแสและทิศทางการทนแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.8 ก



ก. โครงสร้างพื้นฐานของวงจรทอนระดับ ข. ตัวอย่างวงจรทอนระดับที่พลังงานไหลได้ทางเดียว

รูปที่ 2.8 โครงสร้างและตัวอย่างวงจรทอนระดับ

รูปที่ 2.8 ข เป็นตัวอย่างของวงจรทอนระดับซึ่งใช้ FET เป็นสวิตช์ SW1 ใช้ DIODE เป็นสวิตช์ SW2 สำหรับกิ่งแรงดันนั้นจะใช้แหล่งแรงดัน ส่วนกิ่งกระแสใช้ตัวเหนี่ยวนำ (L) ต่ออนุกรมกับกิ่งแรงดันซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทาน (R_L) ที่ทำหน้าที่เป็นโหลด อย่างไรก็ตามทิศกิ่งกระแสอาจจะเป็นมอเตอร์กระแสตรงก็ได้ และในกรณีดังกล่าวอาจจะมีมีความจำเป็นต้องคืนพลังงานจากมอเตอร์ไปสู่กิ่งแรงดัน (แหล่งแรงดัน) ในช่วงที่ต้องการเบรคมอเตอร์ ดังนั้นจึงต้องใช้สวิตช์ที่สามารถนำกระแสได้สองทางและทนแรงดันได้เพียงทางเดียว เป็นสวิตช์ SW1 & SW2 ของวงจรในรูปที่ 2.8 ก ก็เพียงพอที่จะทำให้พลังงานไหลได้ในทั้งสองทิศทาง อัตราการแปลงผันแรงดันซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกต่อแรงดันของแหล่งจ่ายพลังงานด้านเข้าของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงนั้นจะขึ้นอยู่กับวัฏจักรงาน (duty cycle) ของสวิตช์ วัฏจักรงานของสวิตช์ (D) คืออัตราส่วนของช่วงเวลาที่ยสวิตช์ไวงาน SW1 นำกระแส ($D \cdot T_u$) ต่อคาบเวลาการทำงานของสวิตช์ (T_u) การคำนวณหาอัตราการแปลงผันแรงดันในสถานะ

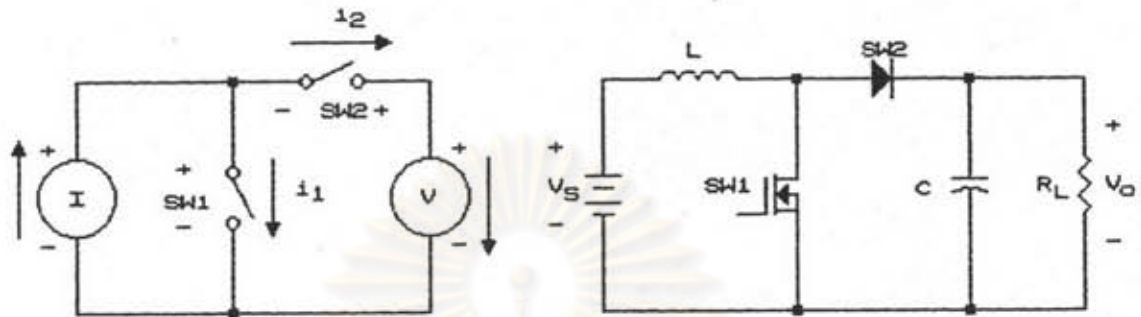
อยู่ตัวจะทำได้โดยอาศัยหลักการสมดุลของพลังงานเข้ากับพลังงานออกหรืออาจจะคำนวณหาจากความสมดุลระหว่างผลคูณของแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (Volt-sec balance) สำหรับวงจรทอนระดับนั้นอัตราการแปลงผันแรงดันจะมีค่าเท่ากับวัฏจักรงานของสวิตช์ไวงาน SW1 ตามสมการ 2.20

$$\frac{V_o}{V_u} = D \quad (2.20)$$

เนื่องจาก $D \leq 1$ ดังนั้นแรงดันออกจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันเข้าเท่านั้น คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงก็คือความต่อเนื่องของกระแสด้านเข้าและขาออกทั้งนี้เพราะกระแสที่ไม่ต่อเนื่องจะมี harmonics สูง อันจะเป็นผลทำให้เกิดคลื่นรบกวนและกำลังสูญเสียในวงจรมากขึ้น นอกจากนี้ความไม่ต่อเนื่องของกระแสด้านออกยังจะทำให้ระลอกของแรงดันสูงขึ้นเมื่อวงจรด้านออกมีเงื่อนไขอื่นเหมือนกัน สำหรับวงจรทอนระดับนั้น กระแสด้านเข้ามีความไม่ต่อเนื่องส่วนกระแสด้านออกนั้นมีความต่อเนื่องทั้งนี้เพราะวงจรด้านออกมีตัวเหนี่ยวนำต่ออยู่

2.2.1.2 วงจรทอนระดับ (Boost converter) วงจรทอนระดับเป็นวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่ให้แรงดันออกสูงกว่าแรงดันเข้าเสมอ มีโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.9 ก ในภาวะการทำงานปกติพลังงานจะไหลจากกิ่งกระแสสู่อินพุทแรงดัน สวิตช์ SW1 และ SW2 จะต้องมีทิศทางการไหลของกระแสและทิศทางการทำงานแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.9 ก ส่วนในรูปที่ 2.9 ข เป็นตัวอย่างวงจรทอนระดับซึ่งใช้ FET เป็นสวิตช์ SW1 ใช้ DIODE เป็นสวิตช์ SW2 สำหรับกิ่งกระแสจะใช้แหล่งแรงดัน (V_u) ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ (L) แทนแหล่งกระแส ส่วนกิ่งแรงดันประกอบด้วยตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองต่อขนานกับตัวต้านทาน R_L ที่ทำหน้าที่เป็นโหลด ในกรณีที่ต้องการให้พลังงานไหลได้สองทางจะต้องใช้สวิตช์ที่สามารถนำกระแสได้สองทางและทนแรงดันได้ทางเดียว อัตราการแปลงผันแรงดันของวงจรทอนระดับในสถานะอยู่ตัวจะมีค่าขึ้นอยู่กับวัฏจักรงาน (D) ของสวิตช์ SW1 ตามสมการ 2.21

$$\frac{V_o}{V_u} = \frac{1}{(1-D)} \quad (2.21)$$



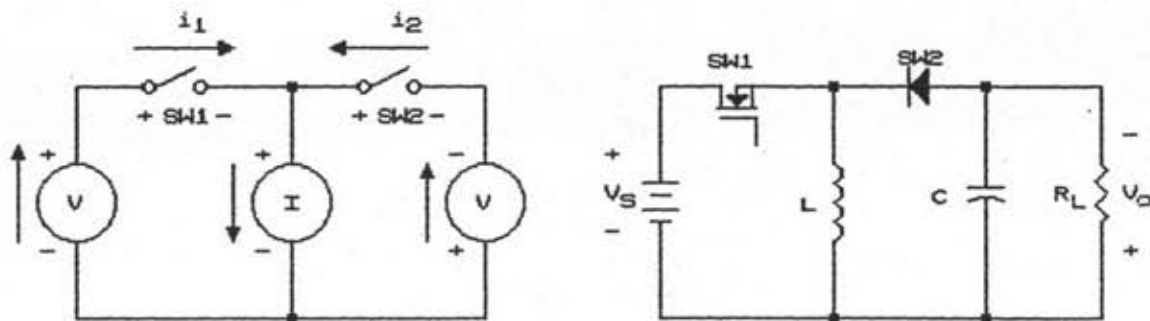
ก. โครงสร้างพื้นฐานของวงจร buck-boost ข. ตัวอย่างวงจร buck-boost ที่พลังงานไหลได้ทางเดียว

รูปที่ 2.9 โครงสร้างและตัวอย่างวงจร buck-boost

เนื่องจาก $(1-D) < 1$ ดังนั้นแรงดันออกจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันเข้าเท่านั้น วงจร buck-boost นี้จะมีความต่อเนื่องของกระแสด้านเข้าเนื่องจากมีตัวเหนี่ยวนำต่ออยู่ ส่วนด้านออกกระแสจะไม่ต่อเนื่อง ทำให้ตัวเก็บประจุที่เป็นวงจรกรองด้านออกมีขนาดใหญ่กว่าในกรณีของวงจร buck-boost ธรรมดาได้กล่าวมาแล้ว

2.2.1.3 วงจร buck-boost converter

วงจร buck-boost converter เป็นวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่สามารถให้ค่าแรงดันออกสูงกว่าหรือต่ำกว่าแรงดันเข้าก็ได้ขึ้นอยู่กับค่าของวัฏจักรงานของสวิตช์ โครงสร้างพื้นฐานของวงจร buck-boost converter นั้นแหล่งจ่ายพลังงาน (Source) และแหล่งรับพลังงาน (load) จะเป็นกิ่งแรงดันส่วนตัวกลางส่งผ่านพลังงานจะเป็นกิ่งกระแสแสดงในรูปที่ 2.10 ก ในรูปที่ 2.10 ข เป็นตัวอย่างของวงจร buck-boost converter ที่พลังงานไหลจากกิ่งแรงดันด้านซ้ายซึ่งเป็นแหล่งแรงดันไปยังกิ่งแรงดันด้านขวามือ ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุ (C) ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองและตัวต้านทาน R_L ที่ทำหน้าที่เป็นโหลด ในกรณีที่ต้องการให้พลังงานไหลได้ทั้งสองทางจะต้องใช้สวิตช์ซึ่งนำกระแสได้ทั้งสองทางแต่ทนแรงดันได้เพียงทางเดียว



ก. โครงสร้างพื้นฐานของวงจร
ทอนทบระดับ

ข. ตัวอย่างวงจรทอนทบระดับที่พลัง
งานไหลได้ทางเดียว

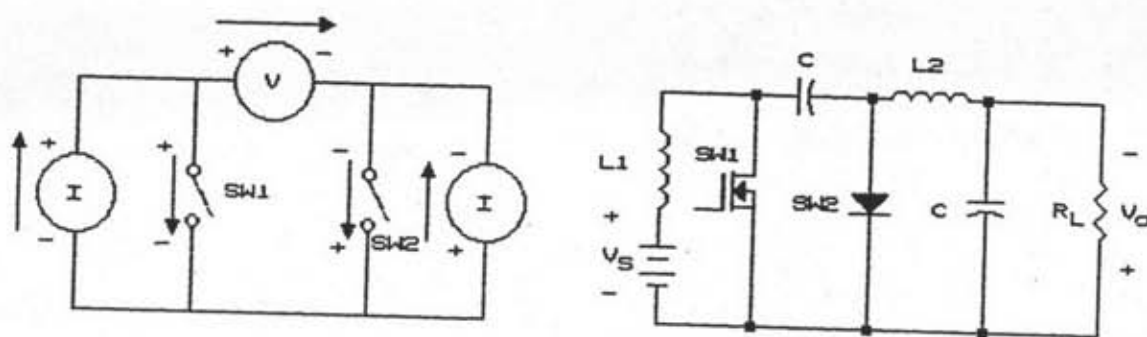
รูปที่ 2.10 โครงสร้างและตัวอย่างวงจรทอนทบระดับ

อัตราการแปลงผันแรงดันของวงจรทอนทบระดับในสถานะอยู่ตัวจะมีค่าขึ้นอยู่กับวัฏจักรงาน (D) ของสวิตช์ SW1 ตามสมการ 2.22

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{1-D} \tag{2.22}$$

วงจรทอนทบระดับนี้กระแสจะมีความไม่ต่อเนื่องทั้งด้านเข้าและด้าน
ออก ซึ่งนับว่าเป็นข้อเสียที่สำคัญอันหนึ่งของวงจรนี้

2.2.1.4 วงจรทอนระดับหรือวงจรชด (Boost-Buck or Ćuk converter) วงจรชดเป็นวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่สามารถให้แรงดันออกสูงกว่าหรือต่ำกว่าแรงดันเข้า เช่นเดียวกับกับวงจรทอนทบระดับ แต่จะมีข้อดีกว่าที่มีความต่อเนื่องของกระแสทั้งด้านเข้าและขาออกทั้งนี้เพราะตามโครงสร้างพื้นฐานของวงจรชด ทั้งแหล่งจ่ายพลังงาน (source) และแหล่งรับพลังงาน (load) เป็นกึ่งกระแสโดยมีกึ่งแรงดันเป็นตัวกลางส่งผ่านพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.11 ก ในรูปที่ 2.11 ข เป็นตัวอย่างของวงจรชดที่พลังงานไหลจากกึ่งกระแสด้านซ้ายมือซึ่งประกอบด้วยแหล่งแรงดัน (V_s) อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ (L_1) ไปยังกึ่งกระแสด้านขวามือซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ (L_2) ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ (C) และมีตัวต้านทาน (R_L , เป็นโหลดต่อขนานกับตัวเก็บประจุ (C) ในกรณีที่ต้องการให้พลังงานไหลได้สองทางจะต้องใช้สวิตช์ซึ่งนำกระแสได้ทั้งสองทาง แต่ทนแรงดันได้เพียงทางเดียว



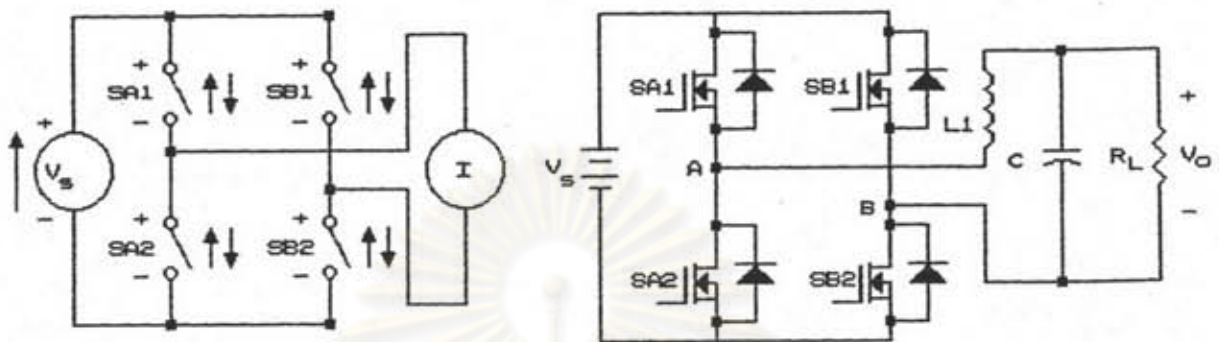
- ก. โครงสร้างพื้นฐานของวงจรชุด ข. ตัวอย่างวงจรชุดที่พลังงานไหล
ได้ทางเดียว

รูปที่ 2.11 โครงสร้างและตัวอย่างวงจรชุด

สำหรับอัตราการแปลงผันแรงดันของวงจรชุดในสถานะอยู่ตัวจะมีค่าขึ้นอยู่กับวัฏจักรงานของสวิตช์ SW1 ตามสมการ (2.22) เช่นเดียวกันกับวงจรทอนทบระดับ จากสมการ (2.22) จะเห็นได้ว่าถ้าวัฏจักรงาน (D) ของ SW1 มีค่าน้อยกว่า 0.5 แรงดันออกของทั้งวงจรทอนทบระดับและวงจรชุดจะมีค่าน้อยกว่าแรงดันเข้า แต่ถ้าวัฏจักรงานมีค่ามากกว่า 0.5 แรงดันออกของทั้งสองวงจรจะมีค่ามากกว่าแรงดันเข้าและเมื่อวัฏจักรงานมีค่าเท่ากับ 0.5 แรงดันออกจะเท่ากับแรงดันเข้าพอดี อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของอัตราแปลงผันแรงดันที่กล่าวมาทั้งหมดจะถูกตัดทิ้งก็เฉพาะในกรณีที่ไม่มีกำลังสูญเสียในอุปกรณ์ที่ใช้ ฉะนั้นในความเป็นจริงแล้วแรงดันออกจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการของอัตราแปลงผันที่กล่าวมาทั้งสิ้น

2.2.1.5 วงจรบริดจ์ (Bridge) จะเห็นได้ว่าวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงพื้นฐานทั้งสี่แบบสามารถกลับทิศทางการไหลของพลังงานได้โดยวิธีการกลับทิศทางการไหลของกระแส แต่ไม่สามารถจะกลับทิศทางของแรงดันออกได้ ในกรณีที่ต้องการให้มีการกลับทิศทางของแรงดันออกได้จะต้องใช้วงจรบริดจ์ (Bridge) ซึ่งเป็นวงจรที่ตัดแปลงจากวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงพื้นฐานดังได้กล่าวมาแล้ว รูปที่ 2.12 ก แสดงโครงสร้างพื้นฐานของวงจรบริดจ์ รูปที่ 2.12 ข เป็นตัวอย่างของวงจรบริดจ์ซึ่งใช้สวิตช์ที่นำกระแสได้ 2 ทาง แต่ทนแรงดันได้ทางเดียว ในวงจรดังกล่าวพลังงานสามารถไหลได้ทั้งสองทิศทางและ

แรงดันออกก็สามารถกลับทิศทางได้โดยไม่ต้องกลับทิศทางแรงดันของแหล่งจ่ายพลังงาน



ก. โครงสร้างพื้นฐานของวงจรวจรบริดจ์ ข. ตัวอย่างวงจรวจรบริดจ์

รูปที่ 2.12 โครงสร้างและตัวอย่างของวงจรวจรบริดจ์

กระแสของกิ่งแรงดันของวงจรวจรบริดจ์จะไม่ต่อเนื่อง ส่วนกระแสในกิ่งกระแสจะมีความต่อเนื่อง เช่นเดียวกับวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบทอนระดับ วงจรวจรบริดจ์ที่ใช้สวิตช์ซึ่งนำกระแสได้สองทิศทางจะมีความเหมาะสมในการใช้เป็น วงจรภาคกำลังของวงจรขยายเซออร์โว เนื่องจากสามารถควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้ทั้งสองทางและสามารถคืนพลังงานเข้าสู่แหล่งจ่ายพลังงานในตอนเบรคมอเตอร์ได้ ดังนั้นจึงเลือกวงจรวจรบริดจ์เป็นวงจรภาคกำลังของวงจรขยายเซออร์โว เพื่อที่จะทำให้สามารถกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์และสามารถเบรคมอเตอร์ได้อย่างรวดเร็ว ทิศทางของแรงดันออกและทิศทางไหลของพลังงานตลอดจนคุณสมบัติอื่นของวงจรจะขึ้นอยู่กับวงจรควบคุมและค่าอุปกรณ์ที่ใช้ดังจะกล่าวต่อไป

2.2.2 ภาคควบคุม (control circuit)

วงจรวจรควบคุมทำหน้าที่ควบคุมกระแสหรือแรงดันออกของวงจรภาคกำลัง โดยการควบคุมให้สวิตช์ทำงานอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าของกระแสหรือแรงดันออกตามความต้องการของระบบและมีลักษณะการทำงานเป็นไปตามที่ผู้ออกแบบได้กำหนดไว้ การควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบริดจ์นั้นจะประกอบด้วย

- การควบคุมลำดับการทำงานของสวิตช์
- การควบคุมช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์

2.2.2.1 การควบคุมลำดับการทำงานของสวิตช์ ลำดับการทำงานของสวิตช์จะมีผลต่อรูปร่างของแรงดันคร่อมกิ่งกระแสของวงจรถับสวิตช์ อันจะมีผลต่อขนาดและทิศทางของแรงดันออกตลอดจนขนาดและทิศทางของกระแสและการกระเพื่อม (ripple) ของกระแสในตัวเหนี่ยวนำของกิ่งกระแสด้วยการจำแนกรูปแบบ (mode) ของการสวิตช์ตามลักษณะของลำดับการทำงานของสวิตช์สามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ [Tal, 1976] ซึ่งแต่ละแบบจะมีลำดับและลักษณะสมบัติดังนี้คือ

2.2.2.1.1 แบบ 2 ขั้ว (bipolar mode)

การทำงานแบบนี้ สวิตช์ที่อยู่ในแนวขงมุมชุดหนึ่งคือ SA1 และ SB2 จะนำกระแสพร้อมกันแต่จะทำงานสลับกับสวิตช์ที่อยู่ในแนวขงมุมอีกชุดหนึ่งคือ SB1, SA2 ซึ่งก็จะนำกระแสพร้อมกันเช่นเดียวกัน ลำดับการทำงานดังกล่าวจะทำให้แรงดันคร่อมกิ่งกระแสเป็น $+V_u$ และ $-V_u$ สลับกัน ส่วนค่าเฉลี่ยซึ่งจะเป็นตัวกำหนดขนาดและทิศทางของกระแสและแรงดันออกนั้นจะขึ้นอยู่กับวัฏจักรงานของสวิตช์ ถ้ากำหนดให้วัฏจักรงานของสวิตช์ SA1 และ SB2 เท่ากับ D วัฏจักรงานของสวิตช์ SB1, SA2 จะเท่ากับ $(1-D)$ และคาบการทำงานของสวิตช์เท่ากับ T_u จะได้ว่า แรงดันคร่อมกิ่งกระแส V_{AB} ในแต่ละคาบจะมีค่าดังนี้คือ

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_u & 0 < t < D \cdot T_u \\ V_{AB} &= -V_u & D \cdot T_u < t < T_u \end{aligned} \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.23) คำนวณหาค่าเฉลี่ยของแรงดัน V_{AB} ได้

$$V_{AB} = \frac{V_u \cdot D \cdot T_u + (-V_u) \cdot (1-D) \cdot T_u}{T_u} = (2D-1) \cdot V_u \quad (2.24)$$

จะเห็นได้ว่าแรงดันเฉลี่ยของ V_{AB} เมื่อวงจรถับสวิตช์ทำงานแบบ 2 ขั้ว

จะมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ ขึ้นอยู่กับวัฏจักรงานของ SA1 และ SB2 โดยที่

$$\begin{aligned} V_{AB} &< 0 && \text{เมื่อ} && 0 < D < 0.5 \\ V_{AB} &= 0 && \text{เมื่อ} && D = 0.5 \\ V_{AB} &> 0 && \text{เมื่อ} && 0.5 < D < 1 \end{aligned}$$

2.2.2.1.2 แบบขั้วเดียว (unipolar mode)

การทำงานแบบนี้สวิตช์ตัวหนึ่งในกึ่งที่ 1 คือ SA1 หรือ SA2 จะนำกระแสตลอดเวลา ส่วนสวิตช์ในกึ่งที่ 2 คือ SB1 และ SB2 จะถูกควบคุมให้นำกระแสสลับกัน ลำดับการทำงานแบบนี้จะทำให้แรงดันคร่อมกึ่งกระแส V_{AB} มีค่าเป็น $+V_u$ และ 0 สลับกันถ้า SA1 ถูกบังคับให้นำกระแสตลอดเวลา แต่ถ้าบังคับให้ SA2 นำกระแสตลอดเวลาและบังคับให้ SB1 และ SB2 นำกระแสสลับกันแรงดันคร่อมกึ่งกระแส V_{AB} จะมีค่าเป็น $-V_u$ กับ 0 สลับกัน ถ้ากำหนดให้วัฏจักรงานของสวิตช์ SB2 เท่ากับ D วัฏจักรงานของ SB1 เท่ากับ $(1-D)$ และคาบการทำงานของสวิตช์เท่ากับ T_u จะได้ว่า ถ้า SA1 นำกระแสตลอดเวลาแล้วแรงดันคร่อมกึ่งแรงดัน V_{AB} ในแต่ละช่วงเวลาจะมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_u && 0 < t < DT_u \\ V_{AB} &= 0 && D.T_u < t < T_u \end{aligned} \quad (2.25)$$

จากสมการ 2.25 คำนวณหาค่าเฉลี่ยของแรงดัน V_{AB} ได้

$$V_{AB} = D \cdot V_u \quad (2.26)$$

แต่ถ้าให้ SA2 นำกระแสตลอดเวลาแล้วแรงดันคร่อมกึ่งกระแส V_{AB} ในแต่ละช่วงเวลาจะมีค่าดังนี้คือ

$$\begin{aligned} V_{AB} &= 0 && 0 < t < D.T_u \\ V_{AB} &= -V_u && D.T_u < t < T_u \end{aligned} \quad (2.27)$$

จากสมการ (2.27) คำนวณหาค่าเฉลี่ยของแรงดัน V_{AB} ได้

$$V_{AB} = -(1-D) \cdot V_u \quad (2.28)$$

จะเห็นได้ว่าถ้าลำดับการทำงานของสวิตช์เป็นแบบขั้วเดียว ค่าเฉลี่ยของแรงดัน V_{AB} จะมีค่าบวกหรือลบเพียงอย่างเดียว

2.2.2.1.3 แบบขั้วเดียวชนิดจำกัด

(limited unipolar mode) ในการทำงานแบบสองขั้วและแบบขั้วเดียวนั้น สวิตช์ในกิ่งเดียวกันจะถูกบังคับให้นำกระแสสลับกันตลอดเวลา แต่ในการทำงานแบบขั้วเดียวชนิดจำกัดนี้ สวิตช์ที่อยู่ในแนวแยงมุมเช่น SA1 กับ SB2 หรือ SB1 กับ SA2 เท่านั้นที่จะถูกควบคุมให้นำกระแสพร้อมๆ กันในช่วงวัฏจักรงาน DT_u ส่วนเวลาที่เหลือ $(1-D)T_u$ ของคาบเดียวกันจะหยุดควบคุมการนำกระแสของสวิตช์หนึ่งตัวและยังคงรักษาสัญญาณควบคุมการนำกระแสของอีกตัวหนึ่งไว้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากสวิตช์ที่ใช้สำหรับวงจรบริดจ์ โดยทั่วไปจะเป็นสวิตช์ที่นำกระแสทางเดียวและปิดกั้นแรงดันได้ทางเดียวต่อชานกับไดโอดเพื่อนำกระแสในอีกทิศทางหนึ่งได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ข ดังนั้น ตัวเหนี่ยวนำของกิ่งกระแสจะเหนี่ยวนำแรงดัน เพื่อให้กระแสไหลต่อไปได้โดยจะไหลผ่านสวิตช์ที่ถูกบังคับให้นำกระแสและไดโอดหนึ่งใน 2 ตัวของกิ่งที่สวิตช์ไม่ถูกควบคุมซึ่งจะขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของพลังงาน ในกรณีที่พลังงานไหลเข้าสู่กิ่งกระแสไดโอดที่นำกระแสจะเป็นไดโอดที่ไม่ได้อยู่ในแนวแยงมุมและอยู่นละกิ่งกับสวิตช์ที่ถูกควบคุมให้นำกระแส เช่นกรณีที่ V_{AB} เป็นบวก ในช่วงวัฏจักรงาน DT_u กระแสจะไหลผ่าน SA1 และ SB2 โดยไหลจาก A ไป B ส่วนในช่วงเวลาที่เหลือคือ $(1-D)T_u$ ของคาบเดียวกัน ถ้าควบคุมให้ SA1 นำกระแสต่อไปกระแสจะไหลผ่านไดโอดที่ต่อชานอยู่กับสวิตช์ SB1 แต่ถ้าควบคุมให้ SB2 นำกระแสต่อไปกระแสในกิ่งกระแสจะไหลผ่านไดโอดที่ต่อชานอยู่กับสวิตช์ SA2 เป็นต้น แต่ในกรณีที่พลังงานไหลออกจากกิ่งกระแสของวงจรบริดจ์กระแสจะไหลผ่านไดโอดของสวิตช์ที่ถูกควบคุมให้นำกระแสทั้งในช่วง $D \cdot T_u$ และ $(1-D) \cdot T_u$ เช่น ถ้า SA1 และ SB2 ถูกควบคุมให้นำกระแส V_{AB} จะเป็นบวกกระแสจะไหลออกจากขั้ว A เข้าสู่แหล่งแรงดันโดยผ่านไดโอดของสวิตช์ SA1 และ SB2 ตลอดเวลาไม่ว่า

SA1 และ SB2 จะถูกควบคุมให้นำกระแสหรือไม่ แต่ถ้า SB1 และ SA2 ถูกควบคุมให้นำกระแส V_{AB} จะเป็นลบ กระแสจะไหลออกจากขั้ว B เข้าสู่แหล่งแรงดันโดยผ่านไดโอดที่ต่อขนานกับสวิตช์ SB1 และ SA2 ตลอดเวลาไม่ว่า SB1 และ SA2 จะถูกควบคุมให้นำกระแสหรือไม่ก็ตาม ดังนั้นในกรณีที่วงจรถูกควบคุมให้มีลำดับการทำงานแบบขั้วเดียวชนิดจำกัดแล้วในสถานะที่พลังงานไหลเข้าสู่กิ่งกระแส การทำงานจะเหมือนกับการทำงานแบบขั้วเดียวธรรมดา

เนื่องจากการทำงานแบบ 2 ขั้ว แรงดันคร่อมกิ่งกระแสมีค่าแปรอยู่ระหว่าง $+V_u$ กับ $-V_u$ ในขณะที่การทำงานแบบขั้วเดียวทั้งสองแบบในภาวะปกติที่พลังงานไหลเข้าสู่กิ่งกระแสแรงดันคร่อมกิ่งกระแสมีค่าแปรอยู่ระหว่าง $+/-V_u$ กับ 0 ดังนั้นจึงทำให้องค์ประกอบไฟสลับในกรณีที่วงจรถูกทำงานแบบ 2 ขั้วมีค่าสูงกว่ากรณีที่วงจรถูกทำงานแบบขั้วเดียว อันเป็นผลทำให้การกระเพื่อมของกระแสของตัวเหนี่ยวนำในกิ่งกระแสมีค่ามากเมื่อวงจรถูกทำงานแบบ 2 ขั้ว แต่ถ้าต้องการให้การกระเพื่อมของกระแสเท่ากันจะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างไรก็ดี ถึงแม้การทำงานแบบขั้วเดียวจะมีข้อดีที่มืองค์ประกอบไฟสลับต่ำก็จริง แต่ในภาวะที่โหลดเกิดการลัดวงจรแล้วจะทำให้ยากต่อการจำกัดกระแสโดยเฉพาะในกรณีที่คาบการทำงานของสวิตช์มีค่าคงที่ ทั้งนี้เพราะในทางปฏิบัติจะมีขีดจำกัดของค่าต่ำสุดของวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ ทำให้ไม่สามารถลดค่าเฉลี่ยของแรงดันลงได้ตามต้องการ ดังนั้นกระแสออกของวงจรถูกกำหนดด้วยแรงดันเฉลี่ยและความต้านทานของกิ่งกระแสซึ่งอาจจะมีค่าสูงกว่าค่าพิกัดที่ต้องการได้ ในกรณีดังกล่าวอาจจะต้องแก้ไขโดยการเพิ่มคาบการทำงาน (T_u) โดยการลดความถี่หรือเปลี่ยนไปทำงานแบบ 2 ขั้วก็ได้ กล่าวคือแรงดันคร่อมกิ่งกระแสจะมีค่าเป็น $+V_u$ หรือ $-V_u$ ในช่วงวัฏจักรงาน DT_u และจะมีค่าเป็น $-V_u$ หรือ $+V_u$ ในช่วงเวลา $(1-D)T_u$ ที่เหลือของคาบเดียวกัน แต่ในกรณีที่พลังงานไหลออกจากกิ่งกระแสแรงดันคร่อมกิ่งกระแสจะมีค่า $+V_u$ หรือ $-V_u$ ตลอดเวลา การทำงานแบบขั้วเดียวชนิดจำกัดนี้ถ้าหากกระแสในตัวเหนี่ยวนำของกิ่งกระแสมีความไม่ต่อเนื่องการทำงานของวงจรมีลักษณะดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในขณะที่ยังมีกระแสไหลในตัวเหนี่ยวนำของกิ่งกระแส แต่เมื่อกระแสในตัวเหนี่ยวนำของกิ่งกระแสลดลงเป็นศูนย์ แรงดันคร่อมกิ่งกระแสจะมีค่าเท่ากับแรงดันออกซึ่งเป็นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรรองด้านออก

ในการควบคุมลำดับการทำงานของสวิตช์ของวงจรถวายเซอร์โวนั้นใน

ภาวะปกติที่แรงดันออกเป็นบวกหรือลบ จะเลือกการควบคุมแบบขั้วเดียวชนิดจำกัด (limited unipolar mode) เพื่อลดขนาดของการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ แต่ในการจำกัดกระแสออกบางครั้งจำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบ 2 ขั้ว (bipolar mode) เพื่อให้สามารถจำกัดกระแสได้ ถ้าการควบคุมแบบขั้วเดียวชนิดจำกัดไม่สามารถจำกัดกระแสออกได้ และนอกจากนี้ในระหว่างการทำงานแบบขั้วเดียวจำกัดนั้นจะมีการสลับกึ่งของสวิตช์ที่จะนำกระแสตลอดเวลาในแต่ละคาบเพื่อเป็นการกระจายกำลังสูญเสียในสวิตช์ให้สม่ำเสมอมากขึ้น เช่น ในกรณีที่แรงดันออกเป็นบวกจะให้ SA1 และ SB2 นำกระแสในช่วงวัฏจักรงาน $D.T_u$ และในช่วงเวลาที่เหลือคือ $(1-D).T_u$ จะให้ SB2 หยุดนำกระแสเพื่อให้กระแสไหลผ่าน SA1 และไดโอดของสวิตช์ SB1 แต่ในคาบต่อมาระหว่างช่วงวัฏจักรงาน $D.T_u$ SA1 และ SB2 จะนำกระแสเช่นเดียวกัน แต่ในช่วงเวลา $(1-D).T_u$ จะให้ SA1 หยุดนำกระแสเพื่อให้กระแสไหลผ่าน SB2 และไดโอดของสวิตช์ SA2 เป็นเช่นนี้สลับกันไป

2.2.2.2 การควบคุมช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์

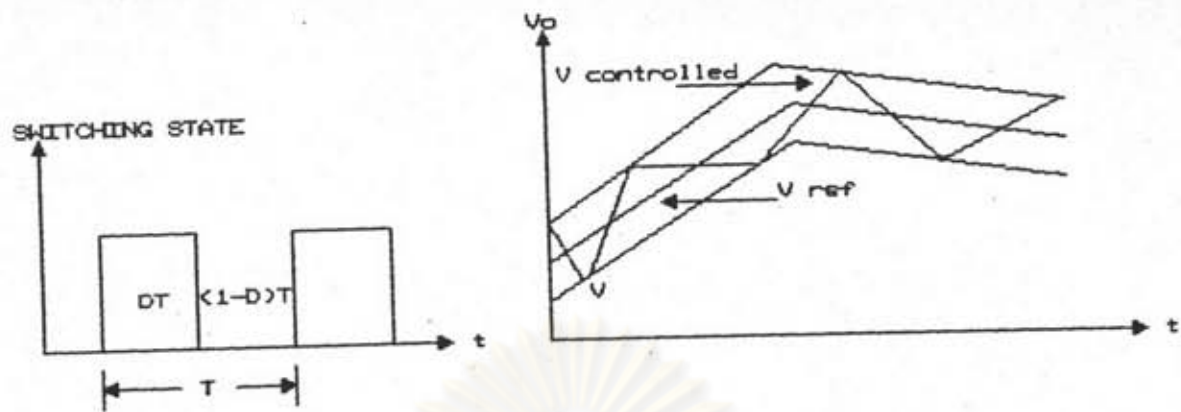
การควบคุมช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์หมายถึงการควบคุมวัฏจักรงานของสวิตช์ เนื่องจากวัฏจักรงานของสวิตช์มีผลต่อกระแสและแรงดันด้านออก ดังนั้นในการควบคุมกระแสหรือแรงดันด้านออกให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดจะทำได้โดยการควบคุมผ่านวัฏจักรงานของสวิตช์ เนื่องจากกระแสและแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงมีความสัมพันธ์กันโดยตรงด้วยค่าของ impedance ของโหลด ดังนั้นการควบคุมปริมาณด้านออกซึ่งอาจจะเป็นกระแสหรือแรงดันอาจจะทำโดยการควบคุมกระแสหรือแรงดันก็ได้จึงอาจแบ่งการควบคุมช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์ออกได้เป็น [Mitchell, 1988]

- การควบคุมแรงดัน (voltage control)
- การควบคุมกระแส (current control)

2.2.2.2.1 การควบคุมแรงดัน (voltage control) เนื่องจากแรงดันออกของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับวัฏจักรงานของสวิตช์ (ตามสมการ 2.26) ดังนั้นการควบคุมแรงดันออกจึงสามารถทำได้โดยการกำหนดวัฏจักรงาน (D) ของสวิตช์ จึงเรียกวิธีการควบคุมแบบนี้ว่า duty ratio programmed ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ก การควบคุมแรงดันออกอีกวิธีหนึ่งอาจจะทำโดยการป้อนกลับค่าของแรงดันออก

เพื่อมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงแล้วนำเอาสัญญาณความคลาดเคลื่อนไปใช้ในการกำหนดช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์ เพื่อควบคุมให้แรงดันออกมีค่าแปรอยู่ระหว่างค่าสูงสุดหรือต่ำสุดรอบๆสัญญาณอ้างอิง การเปลี่ยนช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์เกิดขึ้นเมื่อแรงดันออกมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าแรงดันอ้างอิงเท่ากับความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 2.13 ข ในวิธีการควบคุมแบบนี้สถานะของสวิตช์จะถูกกำหนดด้วยแรงดันออกของตัวเปรียบเทียบแรงดันที่มี hysteresis ดังนั้นจึงเรียกรูปการควบคุมแบบนี้ว่า hysteretic control หรือเป็นที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่า limit-cycle-control การควบคุมแรงดันโดยการกำหนดวัฏจักรงาน (duty ratio programmed) นั้นอาจจะทำได้โดยให้ความถี่ในการทำงานคงที่หรือไม่ก็ได้ ในกรณีให้ความถี่คงที่นั้นจะปรับวัฏจักรงาน (D) โดยการปรับช่วงเวลาการนำกระแสของสวิตช์เพื่อให้ได้วัฏจักรงานที่ต้องการ โดยมีผลรวมของเวลานำกระแสของสวิตช์ทั้งสองชุดเท่ากับคาบที่กำหนด ส่วนแบบที่มีความถี่ไม่คงที่นั้นจะรักษาให้ช่วงเวลาการนำกระแสของสวิตช์ชุดหนึ่งคงที่ไว้แล้วปรับช่วงเวลาการนำกระแสของสวิตช์อีกชุดหนึ่งไปเพื่อให้ได้วัฏจักรงานที่ต้องการ ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้คาบของการทำงานและความถี่จะไม่คงที่ สำหรับการควบคุมแบบ hysteretic control นั้นจะเป็นแบบที่มีความถี่ไม่คงที่ ช่วงเวลาการนำกระแสของสวิตช์ทั้งสองชุดจะเปลี่ยนไปตามสัญญาณอ้างอิงและสภาพของโหลดในขณะนั้น

2.2.2.2.2 การควบคุมกระแส (current control) เนื่องจากกระแสออกของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับวัฏจักรงานของสวิตช์ ดังนั้นการควบคุมกระแสจึงไม่อาจทำได้โดยการกำหนดวัฏจักรงานของสวิตช์โดยตรง แต่จะต้องอาศัยวิธีการป้อนกลับโดยการวัดขนาดของกระแสที่ต้องการควบคุมเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงของกระแส โดยทั่วไปกระแสที่ต้องการควบคุมจะเป็นกระแสในสวิตช์ของวงจรกำลัง สัญญาณความคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบจะถูกใช้ในการกำหนดช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์ เพื่อควบคุมให้กระแสที่ต้องการควบคุมมีค่าตามเงื่อนไขที่กำหนดโดยวิธีควบคุมที่ใช้ เงื่อนไขที่ใช้ในการกำหนดการทำงานของสวิตช์อาจจะเป็นค่าสูงสุดและต่ำสุดของกระแสที่ต้องการควบคุม หรืออาจจะเป็นการกำหนดค่าสูงสุดของกระแสที่ต้องการควบคุมและความถี่ของการสวิตช์ การควบคุมโดยการกำหนดค่าสูงสุดและต่ำสุดของกระแสที่ต้องการควบคุมนั้นเป็นการ



ก. การควบคุมวัฏจักรงาน

โดยตรง

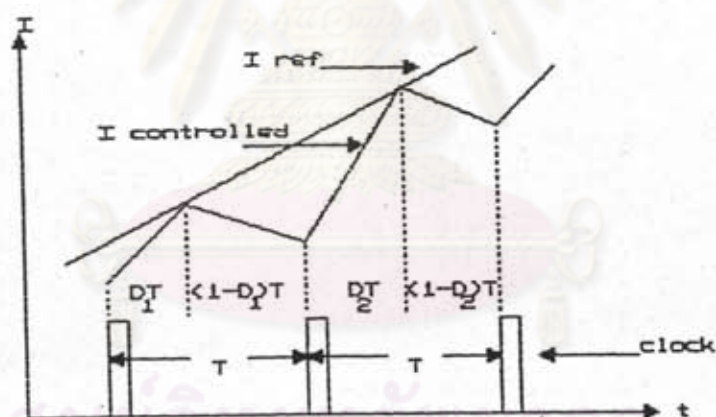
ข. การควบคุมแบบ

Voltage Bang-Bang

รูปที่ 2.13 ลักษณะรูปคลื่นของแรงดัน

ควบคุมแบบ hysteretic control หรือ limit-cycle control [Mitchell, 1988] เช่นเดียวกับกรณีการควบคุมแรงดัน ดังได้กล่าวมาแล้ว ในข้อ 2.2.2.2.1 เนื่องจากมีลักษณะการควบคุมเหมือนกันทุกประการเพียงแต่เปลี่ยนจากการควบคุมแรงดันไปเป็นการควบคุมกระแสแทน การควบคุมกระแสโดยวิธีการควบคุมแบบ hysteretic control นั้น ความถี่ในการสวิตช์จะไม่คงที่ ช่วงเวลาการนำกระแสของสวิตช์ทั้งสองขั้วจะเปลี่ยนไปตามสัญญาณอ้างอิงและสภาพของโหลดในขณะนั้น เช่นเดียวกันกับในกรณีของการควบคุมแรงดัน ในกรณีที่ต้องการให้ความถี่ของการทำงานของสวิตช์คงที่นั้น จะไม่สามารถควบคุมทั้งค่าสูงสุดและต่ำสุดพร้อมกันยกเว้นแต่จะมีการปรับค่า hysteresis ของตัวเปรียบเทียบสัญญาณให้มีค่าเหมาะสมกับขนาดของค่ากระแสอ้างอิง, แรงดันออก และโหลดตลอดเวลาเท่านั้น [Bose, 1986] โดยทั่วไปแล้วการควบคุมกระแสโดยให้ความถี่คงที่นั้นมักจะทำให้ค่าสูงสุดของกระแสที่ควบคุมเป็นตัวกำหนดช่วงเวลาการสวิตช์ ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้เรียกว่า การควบคุมโดยการกำหนดกระแส (current programmed mode) [Mitchell, 1986, 1988] ในการควบคุมโดยวิธีนี้การเริ่มนำกระแสของสวิตช์เพื่อเพิ่มขนาดของกระแสที่ควบคุมจะถูกกำหนดโดยสัญญาณนาฬิกาที่เป็นตัวกำหนดความถี่ (f) หรือ คาบ (T_s) ของการทำงานของสวิตช์ ส่วนกลุ่มของสวิตช์ที่เริ่มนำกระแสโดยสัญญาณนาฬิกานั้นจะขึ้นอยู่กับ

ทิศทางของค่ากระแสอ้างอิงที่ใช้ในการควบคุมและมีวัฏจักรการทำงานเท่ากับ D ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าของกระแสอ้างอิง สภาพของโหลดในขณะนั้น ตลอดจนอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ควบคุม (di/dt) อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ควบคุมในขณะนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำซึ่งกระแสที่ควบคุมไหลผ่านและขนาดของตัวเหนี่ยวนำเอง กระแสที่ควบคุมจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับกระแสอ้างอิงที่เวลา $D \cdot T_u$ วงจรเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิงและกระแสควบคุมจะทำหน้าที่เปลี่ยนกลุ่มสวิตช์ที่นำกระแสทำให้กระแสที่ควบคุมลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.14 กระแสที่ควบคุมจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ในช่วง $(1-D)T_u$ จนกว่าสัญญาณนาฬิกาถูกตัดไปจะทำหน้าที่เปลี่ยนกลุ่มของสวิตช์ที่นำกระแส เพื่อให้กระแสที่ควบคุมเพิ่มขึ้นอีก การทำงานของสวิตช์จะสลับกันไปเรื่อยๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว โดยมีช่วงเวลานำกระแสของสวิตช์ทั้งสองกลุ่มรวมกันเท่ากับคาบของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้เป็นตัวกำหนดความถี่การทำงานของสวิตช์



รูปที่ 2.14 ลักษณะรูปคลื่นของกระแส

โดยทั่วไปแล้วการทำงานในภาวะปกติของวงจรที่มีการควบคุมโดยการกำหนดกระแส (current programmed mode) จะเป็นไปตามขั้นตอนดังกล่าวข้างต้น แต่ในภาวะที่สัญญาณอ้างอิงหรือโหลดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันและมีขนาดใหญ่ การทำงานของวงจรอาจมีความแตกต่างจากที่กล่าวมาแล้ว เช่น ในกรณีที่มีการเพิ่มของสัญญาณอ้างอิงอย่างรวดเร็วและมีขนาดใหญ่ กระแสที่ถูกควบคุมอาจจะเพิ่มขึ้นไปไม่ถึงค่าของกระแสอ้างอิงในคาบแรก ๆ ของการเปลี่ยน

แปลงทำให้วงจรเปรียบเทียบกระแสอ้างอิงกับกระแสควบคุมไม่สามารถทำหน้าที่ในการเปลี่ยนกลุ่มของสวิตช์ที่นำกระแส แต่เพื่อให้ความถี่ในการสวิตช์คงที่จะต้องมีวงจรจำกัดค่าสูงสุดของวัฏจักรงานของสวิตช์ เพื่อทำหน้าที่สับเปลี่ยนกลุ่มของสวิตช์ที่นำกระแสแทนวงจรเปรียบเทียบกระแสอ้างอิงกับกระแสที่ควบคุม ในกรณีที่มีการลดขนาดของกระแสอ้างอิงลงอย่างรวดเร็วและมีขนาดใหญ่กระแสที่ควบคุมจะมีค่าใหญ่กว่าค่าของกระแสอ้างอิงตลอดเวลาในคาบแรกๆของการเปลี่ยนแปลง ทำให้เมื่อสิ้นสุดคาบการทำงานของสวิตช์แล้วกระแสที่ควบคุมยังคงมีค่ามากกว่ากระแสอ้างอิง แต่อย่างไรก็ดี สัญญาณนาฬิกาจะยังคงทำหน้าที่ควบคุมให้สวิตช์กลุ่มที่จะทำให้กระแสที่ควบคุมเพิ่มขึ้นนำกระแสเช่นเดิม หลังจากนั้นวงจรเปรียบเทียบกระแสอ้างอิงกับกระแสที่ควบคุมจะทำหน้าที่สับเปลี่ยนกลุ่มของสวิตช์ที่นำกระแสเพื่อทำให้กระแสที่ควบคุมลดลง แต่เนื่องจากไม่สามารถทำให้สวิตช์หยุดนำกระแสได้ทันที ดังนั้นสวิตช์กลุ่มที่ทำให้กระแสที่ควบคุมเพิ่มขึ้นจะนำกระแสโดยมีช่วงเวลานำกระแสเท่ากับเวลาที่จะควบคุมให้สวิตช์หยุดนำกระแส (turn off time)

เนื่องจากมอเตอร์มีค่าความต้านทานต่ำทำให้มีลักษณะเป็นโหลดแบบแรงดันมากกว่าแบบกระแส ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่ใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีลักษณะเป็นแบบแหล่งแรงดันเนื่องจากจะทำให้เกิดกระแสเกินพิกัดได้ง่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างกะทันหันของแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งจะเป็นอันตรายแก่ทั้งแหล่งจ่ายไฟและมอเตอร์เอง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงเลือกใช้วิธีการควบคุมกระแส (current control) เพื่อให้แหล่งจ่ายไฟมีลักษณะเป็นแหล่งกระแสส่วนการจะควบคุมกระแสหรือแรงดันของมอเตอร์นั้นก็ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ และในการควบคุมกระแส นั้นจะเลือกใช้วิธีการควบคุมโดยการกำหนดกระแส (current programmed mode) เพื่อให้ความถี่ในการสวิตช์มีค่าคงที่ อันจะเป็นการลดปัญหาเกี่ยวกับคลื่นรบกวน [Mitchell, 1988] โดยจะใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ และเพื่อให้การควบคุมกระแสมีเสถียรภาพและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเร็ว จะมีการใช้ compensating ramp บวกเข้ากับสัญญาณควบคุม [Middlebrook, Cuk, 1981] โดยให้ความลาดเอียง (slope) ของ compensating ramp เท่ากับอัตราการลดลงของกระแสที่ควบคุม ซึ่งทำได้โดยการใช้แรงดันออกเป็นตัวควบคุมความลาดเอียงของ compensating ramp

2.3 การหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

จะเห็นได้ว่าสามารถใช้การควบคุมช่วงเวลาในการทำงานของสวิตช์ ดังได้กล่าวมาแล้วในข้อ 2.2.2 ในการควบคุมให้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง มีลักษณะใกล้เคียงกับแหล่งกระแสหรือแหล่งแรงดันก็ได้ แต่ในการควบคุม มอเตอร์นั้นจะต้องมีการควบคุมกระแสหรือแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์เพื่อให้ได้ แรงบิดและความเร็วของมอเตอร์เป็นไปตามความต้องการของระบบ ในการ ควบคุมกระแสหรือแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์นั้นจะอาศัยการป้อนกลับตัวแปรที่ ต้องการควบคุมเพื่อมาเปรียบเทียบกับสัญญาณตั้งค่า ความแตกต่างของสัญญาณ ตั้งค่าและสัญญาณป้อนกลับจะถูกขยายและปรับแต่งโดยวงจรคุมค่า (regulator) สัญญาณออกของวงจรคุมค่าจะถูกนำไปใช้ในการควบคุมช่วงเวลาการทำงานของ สวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง เพื่อให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพและการ ตอบสนองที่ดี ฟังก์ชันโอนย้าย (transfer function) ของวงจรคุมค่า (regulator) จะต้องมีค่าที่เหมาะสม ในการออกแบบฟังก์ชันโอนย้ายของ วงจรคุมค่าเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพและมีการตอบสนองตามต้องการนั้นจะต้อง ทราบค่าฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างตัวแปรที่ต้องการควบคุมกับสัญญาณที่ใช้ในการ ควบคุมซึ่งเป็นสัญญาณออกของวงจรคุมค่า การทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง- ไฟตรงนั้นจะมีการตัดต่อวงจรของสวิตช์ตลอดเวลา รูปแบบของวงจรและตัวแปร ต่างๆของวงจรมีความไม่ต่อเนื่อง ทำให้ไม่สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายได้ เนื่องจากไม่ใช่วงจรเชิงเส้น อย่างไรก็ตามวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงมักจะใช้ ความถี่ในการสวิตช์สูงกว่าความถี่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของวงจร (circuit natural frequency) และความถี่ของสัญญาณควบคุมมาก ดังนั้น ถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างของวงจรในช่วง DT_s และ $(1-D)T_s$ ก็ตาม แต่ก็อาจ ประเมินได้ว่าค่าตัวแปรสถานะต่างๆของวงจรมีความต่อเนื่อง ทำให้ดูเหมือน ว่าจะมีความต่อเนื่องของวงจร ในการหาวงจรแบบต่อเนื่องที่สมมูลกับวงจรเดิมที่ มีความไม่ต่อเนื่องนั้นจะอาศัยการเฉลี่ยโดยใช้วิธีการงานเป็นตัวกำหนดน้ำหนักใน การเฉลี่ย ซึ่งจะทำให้ได้ 2 วิธีคือ การใช้รูปแบบวงจรสมมูล (equivalent circuit model technique) [Middlebrook, 1981, 1987] หรืออาจจะ ใช้วิธีการเฉลี่ยตัวแปรสถานะของวงจร (state-space averaging technique) [Middlebrook, 1981; Mitchell, 1986, 1988] จากวิธีการทั้งสองดัง

กล่าวจะทำให้ได้วงจรที่มีความต่อเนื่องแต่โดยทั่วไปจะยังคงเป็นวงจรไม่เชิงเส้น ซึ่งจะยังไม่สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายได้ แต่ในกรณีที่สัญญาณควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยรอบๆจุดทำงานสงบอาจจะใช้วิธีประมาณวงจรไม่เชิงเส้นที่มีความต่อเนื่องด้วยวงจรเชิงเส้น ซึ่งจะทำให้สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงได้ การวิเคราะห์และออกแบบวงจรโดยการใช่วงจรสมมูลแบบเชิงเส้นสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก ถึงแม้จะมีข้อจำกัดดังได้กล่าวมาแล้วก็ตามแต่ก็เป็นวิธีที่ทำให้เข้าใจพฤติกรรมของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงได้ดีและง่ายกว่าการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์และทำให้มีแนวทางการออกแบบวงจรคุมค่าเบื้องต้นได้สะดวกและรวดเร็วก่อนใช้คอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรในขั้นสุดท้าย

โดยทั่วไปแล้ววงจรสมมูลแบบเชิงเส้นสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง นั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของวงจรแล้วยังขึ้นอยู่กับลำดับการทำงานของสวิตช์และวิธีการควบคุมด้วยเนื่องจากวงจรขยายเซอร์โวที่ศึกษามีภาคกำลังเป็นวงจรบริดจ์ที่มีลำดับการทำงานแบบชั้วเดียวชนิดจำกัด ซึ่งมีลักษณะการทำงานเหมือนวงจรทอนระดับ (Buck converter) และใช้วิธีการควบคุมโดยการกำหนดกระแส (current programmed mode) ซึ่งมีความถี่การสวิตช์คงที่ ดังนั้นจะวิเคราะห์หาวงจรมูลแบบเชิงเส้นสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทอนระดับที่มีการควบคุมโดยการกำหนดกระแส และจะใช้ฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรดังกล่าวในการออกแบบวงจรคุมค่า จากการศึกษาเบื้องต้นจะได้ว่าวงจรที่มีการควบคุมโดยการกำหนดกระแส (current programmed mode) จะประกอบด้วยวงรอบปิด 2 วงรอบ ซ้อนกันอยู่ โดยวงรอบปิดภายในจะเป็นวงรอบที่ใช้ในการควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำโดยสัญญาณควบคุมเป็นค่าอ้างอิงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ส่วนสัญญาณป้อนกลับเป็นค่าของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ สำหรับวงรอบปิดภายนอกเป็นวงรอบที่ใช้ในการควบคุมกระแสออกหรือแรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง ซึ่งค่าอ้างอิงและสัญญาณป้อนกลับจะเป็นกระแสหรือแรงดันขึ้นอยู่กับว่าต้องการควบคุมกระแสหรือแรงดันออก ได้มีการเสนอแนวทางในการหาฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงไว้สองแนวทาง

แนวทางแรก [Cho, Lee, 1986; Mitchell, 1988] ทำโดยพิจารณาทั้งสองวงรอบปิดไปพร้อมกัน และใช้วิธีการเฉลี่ยตัวแปรสถานะของวงจร

(state-space averaging technique) เพื่อหาฟังก์ชันโอนย้ายโดยไม่มีการหาวงจรมุมล วิธีนี้วงรอบปิดทั้งสองจะไม่มีกรแยกโดดจากกันซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในการพิจารณาเพื่อออกแบบวงจรมุมค่า

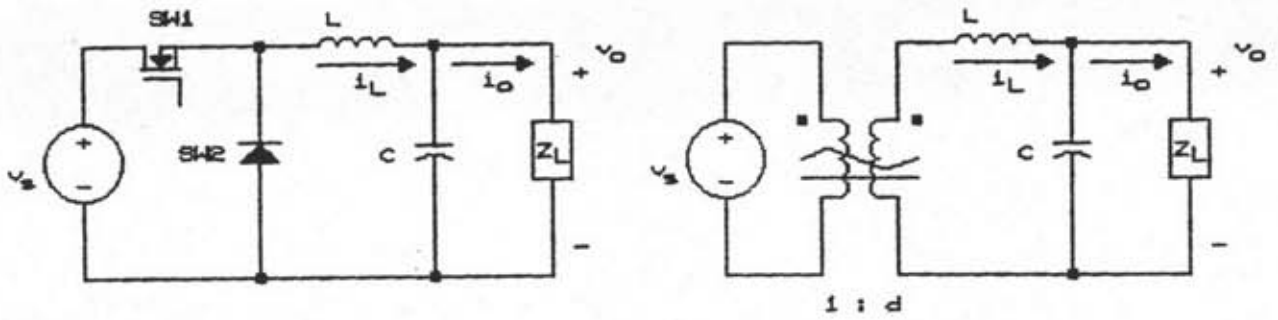
แนวทางที่สอง [Middlebrook, 1981, 1987] ทำโดยพิจารณาเฉพาะวงรอบปิดกระแสภายในเพียงวงรอบปิดเดียวก่อนและทำการหาแบบจำลองเต็มรูป (canonical model) เพื่อให้หาฟังก์ชันโอนย้ายทั้งหมดของวงรอบปิดกระแสภายในก่อน แล้วจึงทำการออกแบบวงจรมุมค่าของวงรอบปิดภายนอก ซึ่งสามารถทำได้ง่ายโดยอาศัยหลักการของวงรอบปิดเดียว วิธีการหาแบบจำลองดังใน [Middlebrook, 1987] จะใช้วิธีการหารูปแบบวงจรมุมล (equivalent circuit model technique) โดยทำการขยายเพิ่มเติมจาก canonical model ของวงจรมุมแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่มีวิธีการควบคุมแบบ duty ratio programmed ซึ่งจะมีข้อดีที่คุณสมบัติของวงจรมุมจะยังคงสภาพไว้หมด ต่างกับการหาแบบจำลอง [Middlebrook, 1981] โดยการเฉลี่ยตัวแปรสถานะของวงจรมุมในการหาแบบจำลอง ซึ่งทำให้คุณสมบัติบางอย่างถูกหักล้างไป นอกจากนี้ [Ridley, Cho, Lee, 1988] ได้มีการสนับสนุนวิธีการของหาโดยการพิจารณาวงรอบแยกกันด้วย

เนื่องจากแนวทางที่สองจะทำให้สามารถออกแบบวงจรมุมค่าได้ง่าย ดังนั้นในการหาแบบจำลองแบบเชิงเส้นสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรมุมระดับที่มีการควบคุมโดยการกำหนดกระแสจะใช้วิธีการตามแนวทางที่สอง ซึ่งหาแบบจำลอง โดยการขยายเพิ่มเติมจาก canonical model ของวงจรมุมแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่ใช้การควบคุมแบบ duty ratio programmed ในขั้นแรกจะทำการพิจารณา canonical model ของวงจรมุมระดับที่ใช้การควบคุมแบบ duty ratio programmed โดยการให้รูปแบบวงจรมุมล [Middlebrook, 1981] ดังนี้

จากวงจรมุมพื้นฐานของวงจรมุมระดับในรูปที่ 2.15ก. เมื่อทำการเปลี่ยนผลลัพธ์ของการทำงานของวงจรมุมจากการปิดเปิดวงจรมุมของสวิตช์ S_1 เป็นหม้อแปลงที่สมนัยกันคือเป็นหม้อแปลงที่แปลงได้ทั้งไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรงดังแสดงในรูปที่ 2.15ข โดยที่

$$d = D + \hat{d} ; \text{เมื่อ } \hat{d} \text{ คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบ ๆ วัฏจักรงาน}$$

คงที่ D



ก. วงจรพื้นฐานของวงจรทอนระดับ ข. วงจรทอนระดับที่แปลงผลของการเปิดปิดสวิตช์เป็นหม้อแปลง

รูปที่ 2.15 แสดงการแปลงผลของการเปิดปิดสวิตช์เป็นหม้อแปลง

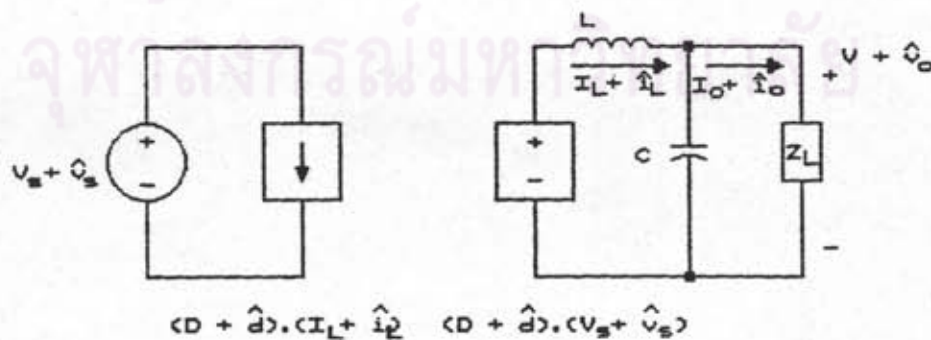
$v_s = V_s + \hat{v}_s$; เมื่อ \hat{v}_s คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบ ๆ แรงดันเข้าคงที่ V_s

$i_L = I_L + \hat{i}_L$; เมื่อ \hat{i}_L คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบ ๆ ค่าคงที่ของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ I_L

$v_o = V_o + \hat{v}_o$; เมื่อ \hat{v}_o คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบ ๆ ค่าคงที่ของแรงดันออก V_o

$i_o = I_o + \hat{i}_o$; เมื่อ \hat{i}_o คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบ ๆ ค่าคงที่ของกระแสออก I_o

จากรูปที่ 2.15ข. ทำการเปลี่ยนหม้อแปลงเป็นแหล่งจ่ายไม่อิสระที่สมนัยกันดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงการเปลี่ยนหม้อแปลงในรูปที่ 2.15 ข. เป็นแหล่งจ่ายที่สมนัยกัน

จากรูปที่ 2.16 สามารถแยกแหล่งจ่ายไม่อิสระแต่ละตัวเป็นแหล่งจ่ายไม่อิสระ 2 ตัว ได้ดังนี้

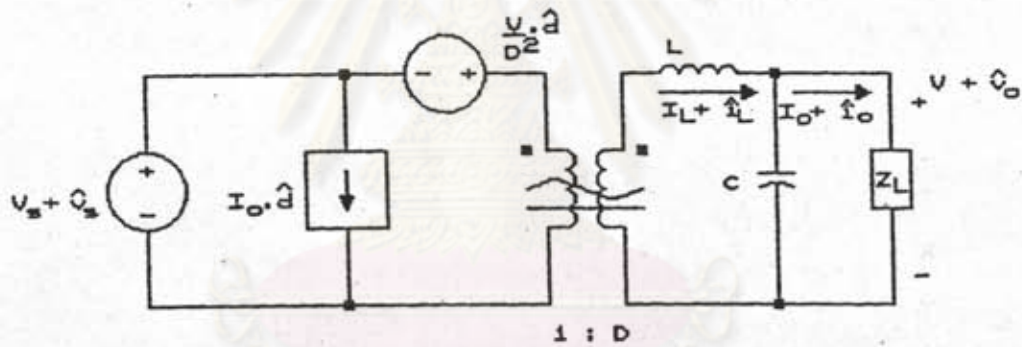
$$(D + \hat{d}) \cdot (I_L + \hat{i}_L) = D \cdot I_L + D \cdot \hat{i}_L + \hat{d} \cdot I_L + \hat{d} \cdot \hat{i}_L$$

$$= D \cdot (I_L + \hat{i}_L) + I_L \cdot \hat{d} \quad (\text{ละเลข } \hat{d} \cdot \hat{i}_L)$$

$$(D + \hat{d}) \cdot (V_o + \hat{v}_o) = D \cdot V_o + D \cdot \hat{v}_o + \hat{d} \cdot V_o + \hat{d} \cdot \hat{v}_o$$

$$= D \cdot (V_o + \hat{v}_o) + V_o \cdot \hat{d} \quad (\text{ละเลข } \hat{d} \cdot \hat{v}_o)$$

จากแหล่งจ่ายไม่อิสระ $D \cdot (I_L + \hat{i}_L)$ และ $D \cdot (V_o + \hat{v}_o)$ ทำการแปลงเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราการแปลงเท่ากับ $1:D$ แล้วย้ายข้างของแหล่งจ่าย $V_o \cdot \hat{d} = (V/D) \cdot \hat{d}$ ไปทางปฐมภูมิจะได้เป็น $(V/D^2) \cdot \hat{d}$ นอกจากนี้เนื่องจาก $I_L = I_o = V_o/R$ เมื่อ R คือ อัตราส่วนระหว่าง ค่าเฉลี่ยของแรงดันออกไฟตรงต่อค่าเฉลี่ยของกระแสออกไฟตรง ทำให้แบบจำลองในรูปที่ 2.16 เป็นดังในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 canonical model ของวงจรทอนระดับที่ใช้การควบคุมแบบ duty ratio programmed

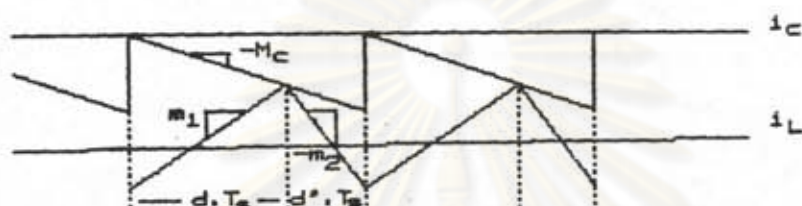
ในทางปฏิบัติสำหรับการควบคุมแบบ duty ratio programmed วัฏจักรงาน d จะได้จากวงจรมอดูเลตที่ทำการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมที่เป็นสัญญาณออกของวงจรคณค่า (V_c) กับ สัญญาณฟันเลื่อยที่มีขนาดสูงสุดเท่ากับ V_m ทำให้

$$d = \frac{\hat{v}_c}{V_m} = \frac{V_c + \hat{v}_c}{V_m} = \frac{V_c}{V_m} + \frac{\hat{v}_c}{V_m}$$

ดังนั้น

$$D = \frac{V_c}{V_m}, \quad \hat{d} = \frac{\hat{V}_c}{V_m}$$

แต่ในกรณีของการควบคุมโดยกำหนดกระแสที่ความถี่ในการสวิตช์คงที่ d จะขึ้นกับสัญญาณควบคุม (i_c), กระแสที่ทำการควบคุม (i_L) และสัญญาณพื้นเลื่อยซดเซยดังลักษณะรูปคลื่นแสดงการทำงานของวงจรในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะรูปคลื่นการทำงานของวงจรทอนระดับที่ใช้วิธีการควบคุมโดยกำหนดกระแสที่ความถี่ในการสวิตช์คงที่

จากรูปที่ 2.18 จะได้สมการของ i_L ที่เวลา $d.T_s$ เป็น

$$i_c - M_c \cdot d.T_s = i_L + m_1 \cdot d.T_s / 2 \quad (2.29)$$

โดยที่

$m_1 = M_1 + \hat{m}_1$; เมื่อ \hat{m}_1 คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบค่าของความสัมพันธ์ของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (M_1)

$m_2 = M_2 + \hat{m}_2$; เมื่อ \hat{m}_2 คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบค่าของความสัมพันธ์ของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (M_2)

$i_c = I_c + \hat{i}_c$; เมื่อ \hat{i}_c คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบค่าของสัญญาณคำสั่งกระแสที่เป็นสัญญาณออกของวงจรคุมค่า (I_c)
ปรกติแล้วมักจะใช้แรงดันควบคุม (v_c) แทน i_c
ซึ่งทั้งสองจะสัมพันธ์กันด้วยความต้านทาน R_c

T_s คือ ความถี่การสวิตช์ของสวิตช์

M_c คือ ความชันของสัญญาณพื้นเลื่อยซดเซย เนื่องจาก

จะถือว่าความชันของสัญญาณชดเชยซึ่งเป็นสัญญาณ
อิสระมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้นจึงมีเฉพาะปริมาณไฟตรง
เท่านั้น

เมื่อทำการแทนค่าในสมการ 2.29 โดยแยกแต่ละพจน์เป็นปริมาณ
ไฟตรงและปริมาณไฟสลับ (ปริมาณการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดเล็ก) จะได้ผลคือ

$$D = \frac{2}{n \cdot M_1 \cdot T_m} (I_c - I_L) \quad (2.30)$$

$$\hat{d} = \frac{2}{n \cdot M_1 \cdot T_m} (\hat{i}_c - \hat{i}_L) - \frac{D}{n \cdot M_1} \hat{m}_1 \quad (2.31)$$

โดยที่

$$n = 1 + 2(M_c/M_1) \quad (2.32)$$

จากรูปที่ 2.15ก. ในช่วงที่สวิตช์ S_1 นำกระแส แรงดันตกคร่อมตัว
เหนี่ยวนำ L เท่ากับ $v_m - v_o$ ดังนั้น

$$m_1 = (v_m - v_o)/L \quad (2.33)$$

จาก

$$v_o = D \cdot v_m \quad \text{จะได้}$$

$$M_1 = (D' \cdot v_o) / (D \cdot L) \quad (2.34)$$

$$\hat{m}_1 = (\hat{v}_m - \hat{v}_o) / L \quad (2.35)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.34), (2.35) ลงในสมการ (2.31) จะได้

$$\hat{d} = \frac{K.R.D}{n.D'.V_o} \cdot (\hat{i}_c - \hat{i}_L) - \frac{D^2}{n.D'.V_o} \cdot \hat{v}_u + \frac{D^2}{n.D'.V_o} \cdot \hat{v}_o \quad (2.36)$$

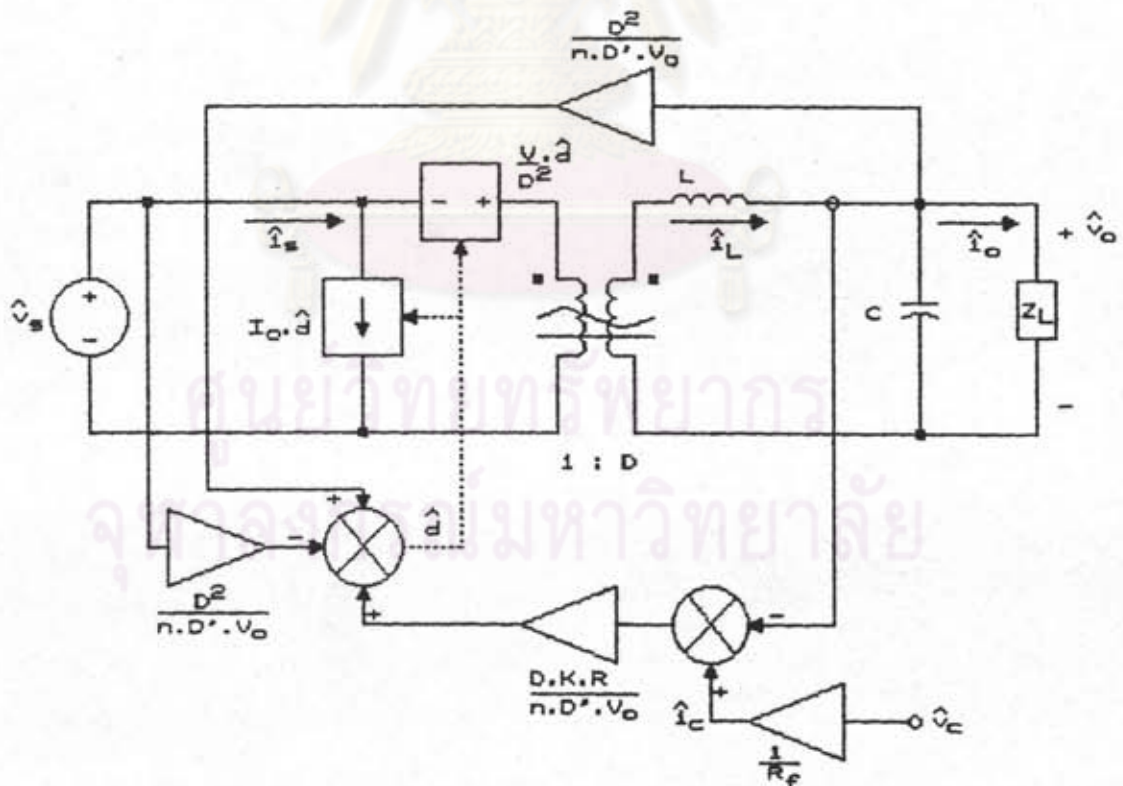
โดยที่ $K = (2.L)/(R.T_u)$

ในกรณีที่มีการกำหนดสัญญาณชดเชยแบบพอดี คือให้ $M_c = M_2$ ซึ่งทำให้การทำงานของวงจรมีเวลาการตอบสนองที่เร็วที่สุด [Middlebrook, 1981] ทำให้

$$n = 1 + (2.M_2/M_1)$$

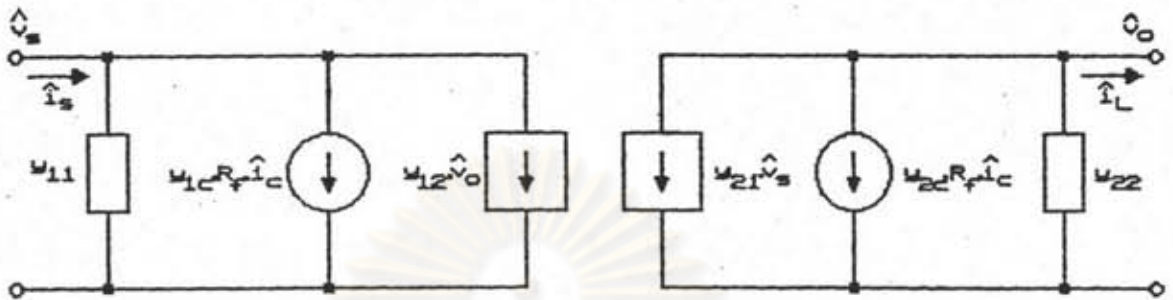
หรือ $n = 1 + (2.D/D') = (1 + D)/D' = (1 + D)/(1 - D) \quad (2.37)$

จากสมการที่ 2.36 จะเห็นได้ว่า d นอกจากจะขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณคำสั่งกระแส (\hat{i}_c) แล้วยังขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (\hat{i}_L) , การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเข้า (\hat{v}_u) และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันออก (\hat{v}_o) เมื่อนำค่า \hat{d} ที่ได้มารวมกับรูปที่ 2.17 ก็จะได้แบบจำลองสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก ดังรูปที่ 2.19 โดยแทน $i_c = v_c/R_f$



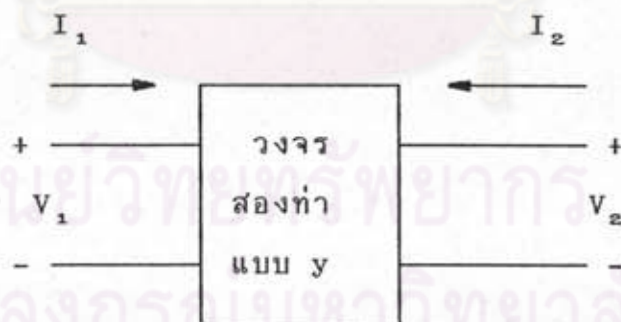
รูปที่ 2.19 แบบจำลองสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทอนระดับที่มีการควบคุมโดยกำหนดกระแสที่มีความถี่ในการสวิตซ์คงที่

เพื่อเป็นการง่ายในการหาฟังก์ชันโอนย้าย (transfer function) ต่าง ๆ จึงทำการเปลี่ยนแบบจำลองในรูปที่ 2.19 เป็นวงจรสองท่าแบบ y ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แบบจำลองสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทอนระดับที่มีการควบคุมโดยกำหนดกระแสที่มีความถี่ในการสวิตซ์คงที่ ในรูปของตัวแปร y

ตัวแปรต่างๆในรูปที่ 2.20 หาได้จากหลักการของวงจรสองท่าแบบ y ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 บล็อกไดอะแกรมของวงจรสองท่าแบบ y

จากรูปที่ 2.20 และ 2.21 มีนิยามของตัวแปรแต่ละพจน์ดังนี้

$$y_{11} = \frac{I_1}{V_1} \left| \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right|_{V_2 = i_c = 0} = \frac{\hat{i}_s}{\hat{v}_s} \left| \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right|_{\hat{v}_o = \hat{i}_c = 0} \quad (2.38)$$

$$y_{1c} = \frac{I_1}{R_f \cdot i_c} \left| \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right|_{V_1 = V_2 = 0} = \frac{\hat{i}_s}{R_f \cdot \hat{i}_c} \left| \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right|_{\hat{v}_s = \hat{v}_o = 0} \quad (2.39)$$

$$y_{12} = \frac{I_1}{V_2} \left| \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right|_{V_1 = i_c = 0} = \frac{\hat{i}_s}{\hat{v}_o} \left| \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right|_{\hat{v}_s = \hat{i}_c = 0} \quad (2.40)$$

$$y_{21} = \frac{I_2}{V_1} \left| \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right|_{V_2 = i_c = 0} = \frac{-\hat{i}_L}{\hat{v}_s} \left| \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right|_{\hat{v}_o = \hat{i}_c = 0} \quad (2.41)$$

$$y_{2c} = \frac{I_2}{R_f \cdot i_c} \left| \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right|_{V_1 = V_2 = 0} = \frac{-\hat{i}_L}{R_f \cdot \hat{i}_c} \left| \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right|_{\hat{v}_s = \hat{v}_o = 0} \quad (2.42)$$

$$y_{22} = \frac{I_2}{V_2} \left| \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right|_{V_1 = i_c = 0} = \frac{-\hat{i}_L}{\hat{v}_o} \left| \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right|_{\hat{v}_s = \hat{i}_c = 0} \quad (2.43)$$

ทำการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามสมการที่ 2.38 - 2.43 จากรูปที่ 2.19
จะได้

$$y_{11} = - \frac{D^2 \cdot C_1}{R} \cdot \left(1 + \frac{s}{c_1 w_m} \right) ; c_1 = 1 - \frac{(nD' - 1)}{K} \quad (2.44)$$

$$y_{1c} = \frac{D}{R_f} \cdot \left[\frac{1 + s \cdot (L/R)}{1 + s/w_c} \right] \quad (2.45)$$

$$y_{12} = \frac{D \cdot c_2 \cdot \left[1 + \frac{s \cdot D}{c_2 \cdot (w_m / \kappa)} \right]}{1 + s/w_c} ; c_2 = 1 - (n \cdot D' - D) / K \quad (2.46)$$

$$y_{21} = \frac{- D \cdot (n \cdot D' - 1)}{K \cdot R (1 + s/w_c)} \quad (2.47)$$

$$y_{2c} = \frac{- 1}{R_f \cdot (1 + s/w_c)} \quad (2.48)$$

$$y_{22} = \frac{n \cdot D' - D}{K \cdot R} \cdot \frac{1}{1 + s/w_c} \quad (2.49)$$

โดยที่ $w_m = 2 \cdot \kappa / T_m = 2 \cdot \kappa \cdot f_m$

$$w_c = \frac{K \cdot R}{n \cdot D' \cdot L} = \frac{2}{n \cdot D' \cdot T_m} = \frac{w_m}{\kappa \cdot n \cdot D'} = \frac{2 \cdot f_m}{n \cdot D'} \quad (2.50)$$

เมื่อให้วงจรทอนระดับมีโหลดเป็นค่า normalized ของแอดมิตแตนซ์ของมอเตอร์กระแสตรงพร้อมโหลดที่มองทางด้านอาร์เมเจอร์ ($Y_{mn}(s)$) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของกระแสต่อแรงดันและตามสมการ 2.19 โดยให้

$$\frac{I_{an}(s)}{V_{an}(s)} = Y_{mn}(s) \quad (2.51)$$

ดังนั้น จากรูปที่ 2.20 จึงสามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างกระแสของโหลด ($\hat{i}_{on}(s)$) และแรงดันด้านออก ($\hat{v}_{on}(s)$) กับสัญญาณควบคุมสำหรับสัญญาณเล็ก ($\hat{i}_{cn}(s)$) ในรูปของ normalize โดยให้พจน์ \hat{v}_o เป็นศูนย์ ได้ผลดังสมการที่ 2.52, 2.53 ตามลำดับ

$$\frac{\hat{v}_{on}(s)}{\hat{i}_{cn}(s)} = -y_{2cn} \cdot \frac{R_{fn}}{y_{22n} + s \cdot C_n + Y_{mn}(s)} \quad (2.52)$$

$$\frac{\hat{i}_{on}(s)}{\hat{i}_{cn}(s)} = -y_{2cn} \cdot \frac{Y_{mn}(s) \cdot R_{fn}}{y_{22n} + s \cdot C_n + Y_{mn}(s)} \quad (2.53)$$

โดยที่

$$\left. \begin{aligned} y_{2cn} &= y_{2c} \cdot R_a \\ y_{22n} &= y_{22} \cdot R_a \\ s \cdot C_n &= s \cdot C \cdot R_a, \quad R_{fn} = R_f / R_a \\ \hat{i}_{on} &= \hat{i}_o / I_{ao}, \quad \hat{i}_{cn} = \hat{i}_c / I_{ao}, \quad \hat{v}_{on} = \hat{v}_o / V_{ao} \end{aligned} \right\} (2.54)$$

ในทางปฏิบัติกระแสควบคุม (i_c) มักจะอยู่ในรูปของแรงดันโดยในการตรวจจับกระแสจะใช้ความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำแล้วนำแรงดันตกคร่อมความต้านทานมาขยาย ถ้าให้ความต้านทานที่ตรวจจับกระแสคูณกับอัตราขยาย

เท่ากับ R_f ดังนั้นจะได้ว่า

$$v_{cn} = i_{cn} \cdot R_f \quad (2.55)$$

เมื่อแทนค่าสมการ 2.55 ลงใน สมการ 2.52, 2.53 จะได้ผลดังนี้

$$\frac{\hat{v}_{on}(s)}{\hat{v}_{cn}(s)} = -y_{2cn} \cdot \frac{1}{y_{22n} + s \cdot C_n + Y_{mn}(s)} \quad (2.56)$$

$$\frac{\hat{i}_{on}(s)}{\hat{v}_{cn}(s)} = -y_{2cn} \cdot \frac{Y_{mn}(s)}{y_{22n} + s \cdot C_n + Y_{mn}(s)} \quad (2.57)$$

สมการ 2.56 ถึงแม้จะเป็นรูปต่อหน่วย แต่สามารถใช้แทนเป็นรูปจริง (\hat{v}_o/\hat{v}_c) ได้เลย เนื่องจากค่าที่ใช้ในการ normalized ของ \hat{v}_o และ \hat{v}_c เป็นค่าเดียวกัน แต่สมการ 2.57 ยังไม่สามารถแทนค่าจริงได้ เนื่องจากค่าที่ใช้ในการ normalized \hat{i}_o และ \hat{v}_c มีค่าต่างกัน โดยค่าจริงของสมการ 2.57 จะเป็นไปตามสมการ 2.58

$$\frac{\hat{i}_o}{\hat{v}_c} = \frac{\hat{i}_{on}}{\hat{v}_{cn}} \cdot \frac{(V_{ao}/R_a)}{V_{ao}} = \frac{\hat{i}_{on}}{\hat{v}_{cn}} \cdot \frac{1}{R_a} \quad (2.58)$$

สำหรับในกรณีที่มีการป้อนกลับแรงดันออกของวงจรถอนระดับ เพื่อกำหนดขนาดของสัญญาณพื้นเลื้อยชดเชย (m_c) ให้มีความชันเท่ากับ m_2 ตลอดเวลาทำให้สัญญาณพื้นเลื้อยมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กน้อยรอบค่าเฉลี่ย M_c จะได้ $m_c = M_c + \hat{m}_c$ จึงทำให้สมการ 2.31 เปลี่ยนเป็น

$$\hat{d} = \frac{2}{n \cdot M_1 \cdot T_m} \cdot (\hat{i}_c - \hat{i}_L) - \frac{D}{n \cdot M_1} \cdot (2\hat{m}_c + \hat{m}_1) \quad (2.59)$$

เมื่อ $m_c = M_c + \hat{m}_c = v_o/L = (v_o/L) + (\hat{v}_o/L)$ จึงทำให้สมการที่ 2.59 เป็น

$$\hat{d} = \frac{K.R.D}{n.D'.V_o} : (\hat{i}_c - \hat{i}_L) - \frac{D^2}{n.D'.V_o} : \hat{v}_o - \frac{D^2}{n.D'.V_o} : \hat{v}_o \quad (2.60)$$

ดังนั้นพจน์

$$y_{zz} = \frac{n.D' + D}{K.R} \cdot \frac{1}{1 + s/w_c} \quad (2.61)$$

ส่วนพจน์ y_{zc} จะมีค่าเหมือนเดิม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย