

บทที่ 3

เทคนิคการควบคุมการแปลงผันพลังงานแบบเรโซแนนซ์

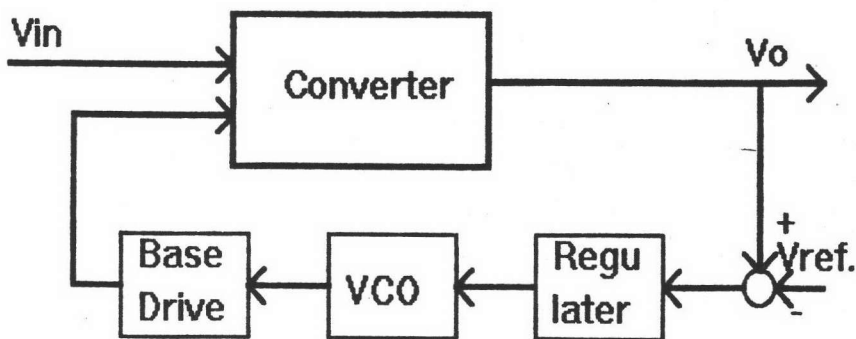
บทนำ

การควบคุมแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผัน สามารถทำได้หลายวิธี ในการเลือกวิธีการควบคุมที่เหมาะสมจะต้องพิจารณารูปแบบและการทำงานของวงจรเป็นหลัก ประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของวงจรขึ้นอยู่กับวิธีการควบคุม โดยหลักใหญ่ๆ การควบคุม แบ่งออกเป็น 2 แบบคือแบบความถี่คงตัวกับแบบแปรค่าความถี่ ในการแปลงผันส่วนใหญ่ มักจะเลือกการควบคุมความถี่คงตัว แต่การควบคุมแบบแปรค่าความถี่ก็ได้มีการนำมา ประยุกต์ใช้เช่นกัน ตัวอย่างการควบคุมแบบความถี่คงตัวได้แก่การมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) [8] การควบคุมโดยการเลื่อนเฟส (Phase- Shift Control) หรือการควบคุมโดยการโปรแกรมกระแส (Current Programmed Control Scheme) การควบคุมโดยการโปรแกรม กระแสมีข้อดีคือค่ากระแสของตัวเหนี่ยวนำจะถูกจำกัดโดยวงจรควบคุม สำหรับบทนี้นำเสนอหลักการควบคุมแบบต่างๆ 4 แบบพอสังเขปคือ

- 1.การควบคุมแบบความถี่คงตัว
- 2.การควบคุม โดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์
- 3.การควบคุม โดยการโปรแกรมกระแส
- 4.การควบคุม โดยการเลื่อนเฟส

การควบคุมโดยการแปรค่าความถี่

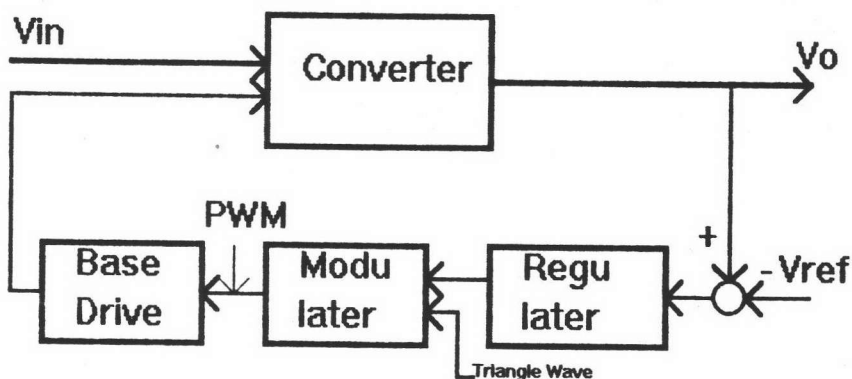
ในการควบคุมลักษณะนี้อัตราการแปลงผัน (Conversion Gain) จะต้องขึ้นอยู่กับความถี่ส่วนใหญ่วัฏจักรงาน (Duty Cycle) จะมีค่าคงตัว สัญญาณขับนำสวิตช์มักจะมาจากออสซิลเลเตอร์ที่ความถี่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Oscillator VCO) [8] รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างแผนภาพการควบคุม



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการควบคุมโดยแปรค่าความถี่การสวิตช์

การควบคุมโดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์

ในการแปลงผันแบบเรโซแนนซ์โดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์ อัตราการแปลงผัน (Conversion Ratio) ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ในการสวิตช์เพียงอย่างเดียวแต่จะขึ้นอยู่กับช่วงเวลานำกระแสของสวิตช์ด้วย (Turn-on time) การควบคุมแรงดันด้านออกก็จะควบคุมช่วงเวลานำกระแสของสวิตช์ ในขณะที่ความถี่ของสวิตช์จะคงที่ การมอดูเลตความกว้างพัลส์คือการควบคุมให้สวิตช์แปรค่าวัฏจักรงานของช่วงนำกระแสที่ความถี่ในการสวิตช์คงที่ แผนภาพแสดงการควบคุมวงจรแปลงผันโดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์เป็นดังรูปที่ 3.2

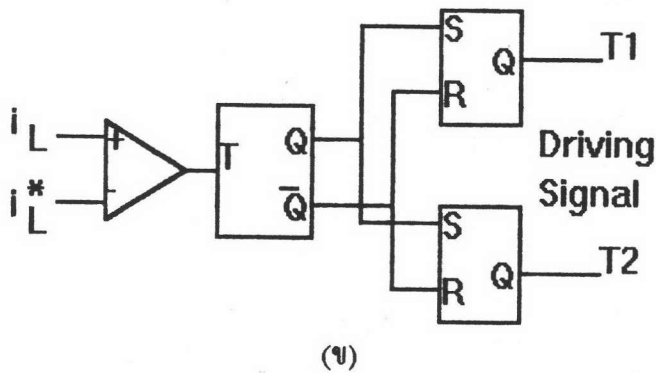
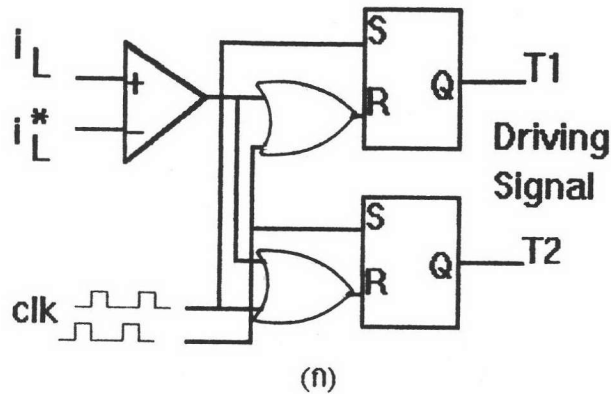


รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการควบคุมโดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์

ผลจากการเปรียบเทียบแรงดันด้านออกกับแรงดันอ้างอิง โดยใช้วงจรคุมค่า (Regulator) จะได้สัญญาณคลาดเคลื่อนซึ่งนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันสามเหลี่ยมจะได้สัญญาณ PWM ที่มีความถี่เท่ากับสัญญาณสามเหลี่ยม และมีวัฏจักรงานที่ขึ้นกับค่าของสัญญาณคลาดเคลื่อน

การควบคุมโดยการโปรแกรมกระแส

ในการควบคุมโดยการโปรแกรมกระแสเมื่อกระแสของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นถึงค่าที่ตั้งไว้ (Set Value) สวิตช์จะเปลี่ยนสถานะทำให้กระแสลดลง ผลก็คือเราสามารถจำกัดค่ายอดของกระแสตัวเหนี่ยวนำได้โดยจำกัดค่าที่ตั้งไว้นั่นเอง การควบคุมแบบนี้จะมีทั้งแบบความถี่คงตัวและแปรค่าความถี่ดังรูปที่ 3.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จากรูปสามารถจะเห็นได้ว่าค่ายอดของกระแส i_L จะถูกควบคุมโดยค่าที่ตั้ง i_L^*



รูปที่ 3.3 แสดงการควบคุมการแปลงผันแบบเรโซแนนซ์โดยโปรแกรมกระแส
 (ก) แสดงการควบคุมแบบความถี่คงตัว
 (ข) แสดงการควบคุมแบบแปรค่าความถี่

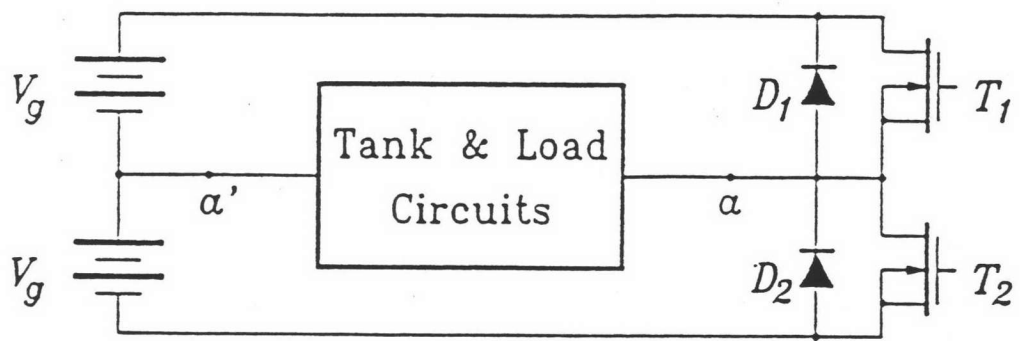
การควบคุมโดยการเลื่อนเฟส

รูปคลื่น

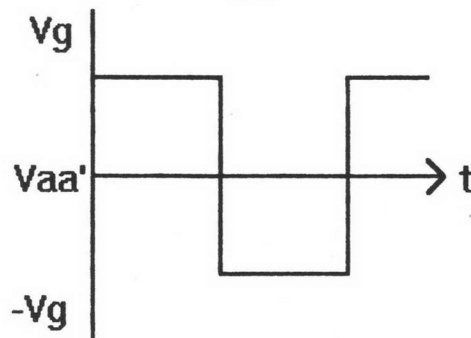
ในการควบคุมโดยการเลื่อนเฟส [8] ความถี่ในการทำงานของสวิตช์จะคงที่

อย่างไรก็ตามการควบคุมในลักษณะนี้สวิตช์ต้องนำกระแสได้สองทาง ซึ่งจะต้องมีไดโอดต่อขนานกลับทาง เพื่อให้นำกระแสกลับทางกับสวิตช์ไวงาน ในวงจรแปลงผันแบบอนุกรม (SRC) ปัจจุบัน มักจะใช้หลักการแปลงผันโดยการเลื่อนเฟส การควบคุมในลักษณะนี้ใช้ได้เฉพาะกับวงจรบริดจ์เต็ม (Full Bridge)

วงจรแปลงผันแบบแหล่งแรงดันส่วนใหญ่ทั้งวงจรกึ่งบริดจ์และบริดจ์เต็มจะมีการควบคุมโดยการแปรค่าความถี่ในการสวิตช์ (Variable Frequency Control) แรงดันที่ขั้ว $V_{aa'}$ จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 3.4 (ก) และ (ข) และรูปที่ 3. (ก) และ (ข) ตามลำดับ

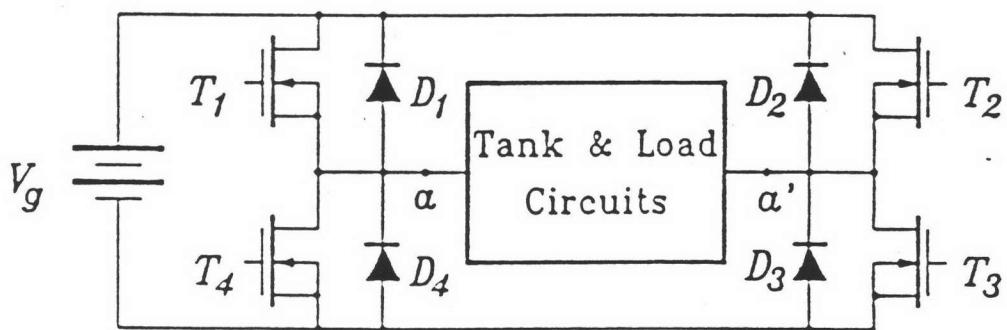


(ก)

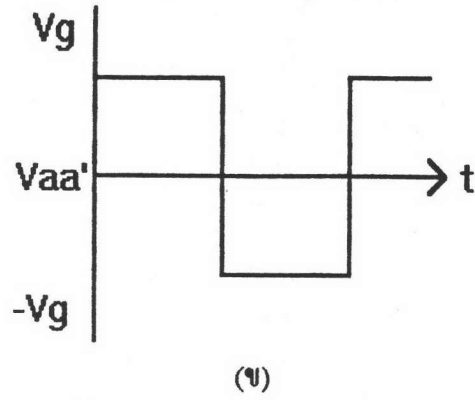


(ข)

รูปที่ 3.4 (ก) วงจรแปลงผันแบบกึ่งบริดจ์
(ข) แรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

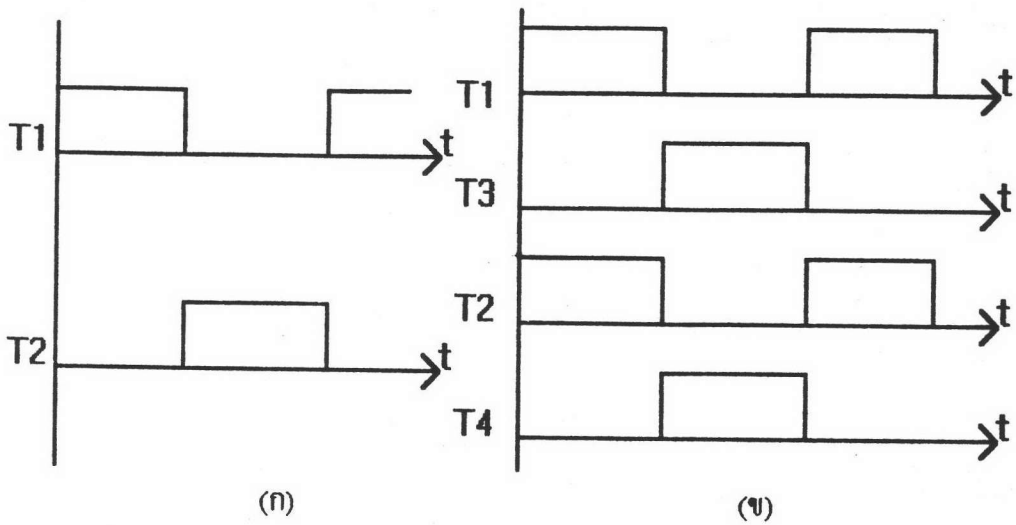


(ก)



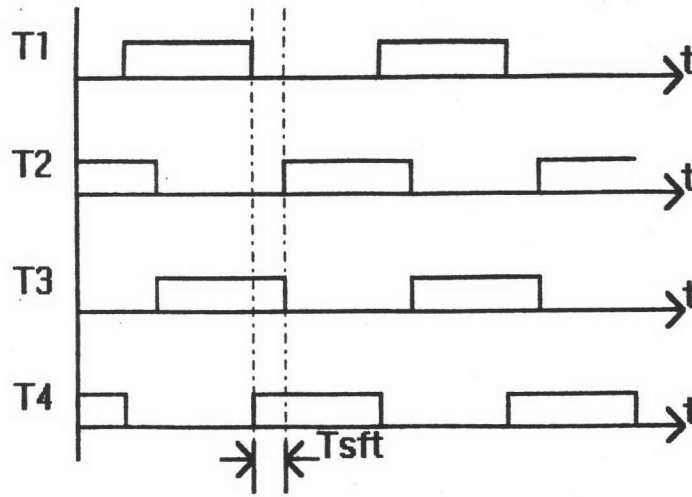
รูปที่ 3.7 (ก) วงจรแปลงผันแบบบริดจ์เต็ม
(ข) แรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

ซึ่งสัญญาณขั้วนำสวิตช์ดังรูปที่ 3.8 (ก) และ (ข) สำหรับวงจรกึ่งบริดจ์และเต็มบริดจ์ตามลำดับ



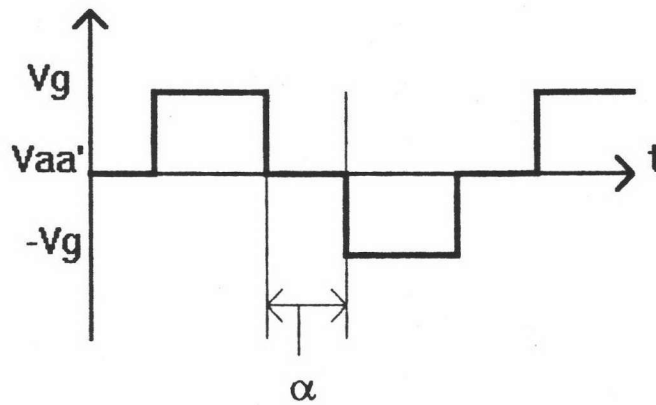
รูปที่ 3.6 สัญญาณขั้วนำวงจรที่ควบคุมโดยการแปรค่าความถี่สวิตช์
(ก) สัญญาณขั้วนำวงจรในรูปที่ 3.4 (ข) สัญญาณขั้วนำวงจรในรูปที่ 3.5

แรงดันตกคร่อมวงจร v_{sc} ที่เกิดจากการขั้วนำโดยสัญญาณดังรูปที่ 3.6 (ก) และ (ข) จะเป็นลักษณะแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมในการควบคุมโดยการเลือนเฟสซึ่งใช้ควบคุมเฉพาะในวงจรแปลงผันแบบบริดจ์เต็ม ดังรูปที่ 3.5 (ก) การทำงานของสวิตช์ $T1, T4$ และ $T2, T3$ จะมีวัฏจักรงานเป็น 50%



รูปที่ 3.7 สัญญาณขั้วนำสวิตช์โดยการควบคุมการเลื่อนเฟส

การควบคุมในลักษณะนี้แรงดันตกคร่อมโหลดจะมีสามสถานะคือ $+V_s$, $-V_s$ และสถานะลัดวงจร (Short Circuit) ดังรูปที่ 3.8



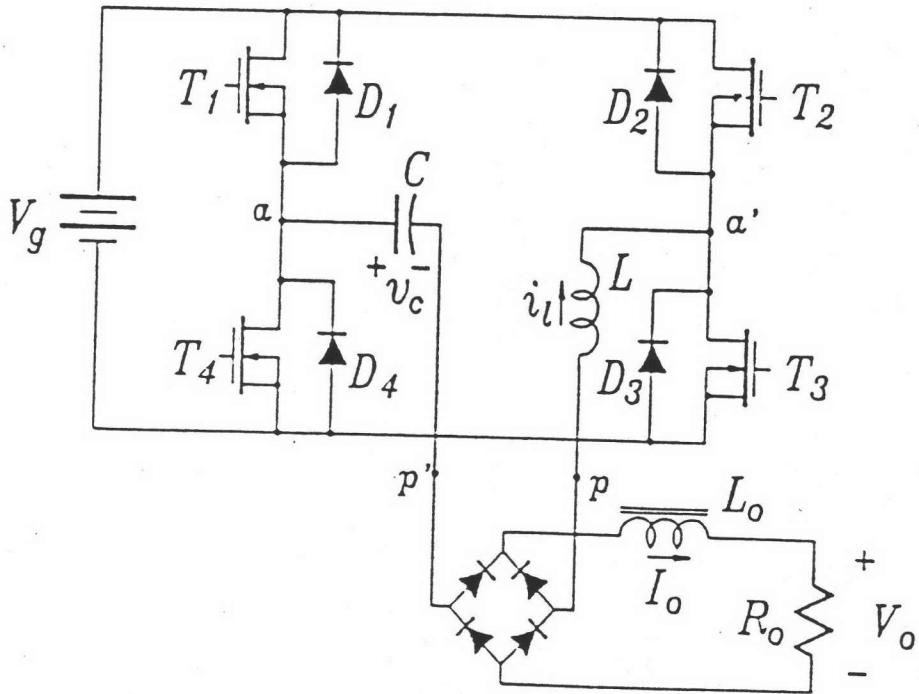
รูปที่ 3.8 แสดงแรงดันตกคร่อมวงจรรีโซแนนซ์

เมื่อใช้สัญญาณขั้วนำดังรูปที่ 3.7 แรงดัน $v_{aa'}$ ในรูปที่ 3.5 (ก) จะเป็นดังรูปที่ 3.8 ช่วงเวลาที่มีการเลื่อนเฟส T_{sft} (ดูรูปที่ 3.7) จะเกิดการลัดวงจรหรือแรงดัน $v_{aa'}$ จะมีค่าเป็นศูนย์ มุมที่เลื่อนไปของเฟสจะมีค่าดังสมการที่ (3.1)

$$\alpha = T_{sft} \cdot \frac{360}{T_r} \text{ องศา} \tag{3.1}$$

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์อนุกรมควบคุมโดยวิธีการเลื่อนเฟส

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์อนุกรมแบบบริดจ์เต็มแสดงในรูปที่ 3.9

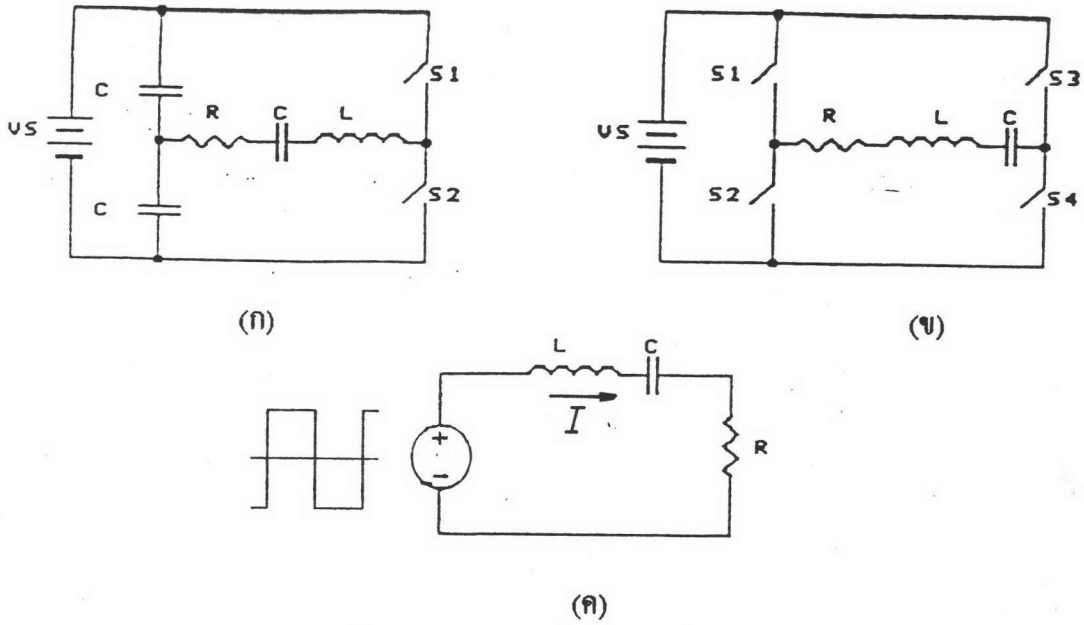


รูปที่ 3.9 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์อนุกรมแบบบริดจ์เต็ม

ในการควบคุมเฟสสวิทช์ T_1, T_2, T_3 และ T_4 จะถูกขับนำโดยสัญญาณดังรูปที่ 3.7 การทำงานของวงจรจะมีโหมคการทำงานเพิ่มขึ้นเป็น 7 โหมค [8] ดังนั้นการวิเคราะห์ห้วงจรจะมีความยุ่งยาก และสลับซับซ้อนมากกว่าการควบคุมโดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับเรโซแนนซ์อนุกรมควบคุมโดยการเลื่อนเฟส

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับเรโซแนนซ์อนุกรม เป็นวงจรแปลงผันที่แหล่งเป็นกึ่งแรงดัน และโหลดเป็นกึ่งกระแสประกอบด้วย RLC ต่ออนุกรมกัน วงจรอาจมีโครงสร้างเป็นแบบวงจรบริดจ์เต็มหรือวงจรแบบกึ่งบริดจ์ เราสามารถแทนแหล่งไฟตรงและสวิทช์ด้วยแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม วงจรแปลงผันจึงมีโครงสร้างและวงจรสมมูลตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 โครงสร้างวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม
 (ก) วงจรแปลงผันแบบกึ่งบริดจ์ (ข) วงจรแปลงผันแบบบริดจ์เต็ม (ค) วงจรสมมูล

ถ้า $\omega_o = \omega_r$ หรือ $\omega_n = \omega_r / \omega_o = 1$

กำลังมีค่าสูงสุดเท่ากับ
$$P_{max} = \frac{V_p^2}{2R} \tag{3.2}$$

โดยที่
$$V_p = \frac{4V_s}{\pi} \quad \text{หรือ} \quad \frac{2V_s}{\pi} \tag{3.3}$$

สำหรับวงจรบริดจ์หรือวงจรกึ่งบริดจ์ตามลำดับ
 ที่ความถี่ที่ไม่ใช่เรโซแนนซ์ ($\omega_n \neq 1$) กำลังที่ความต้านทาน R ได้รับจะมีค่าลดลงดังนี้

$$P = \frac{P_{max}}{1 + Q^2 \left(1 - \frac{1}{\omega_n^2} \right)} \tag{3.4}$$

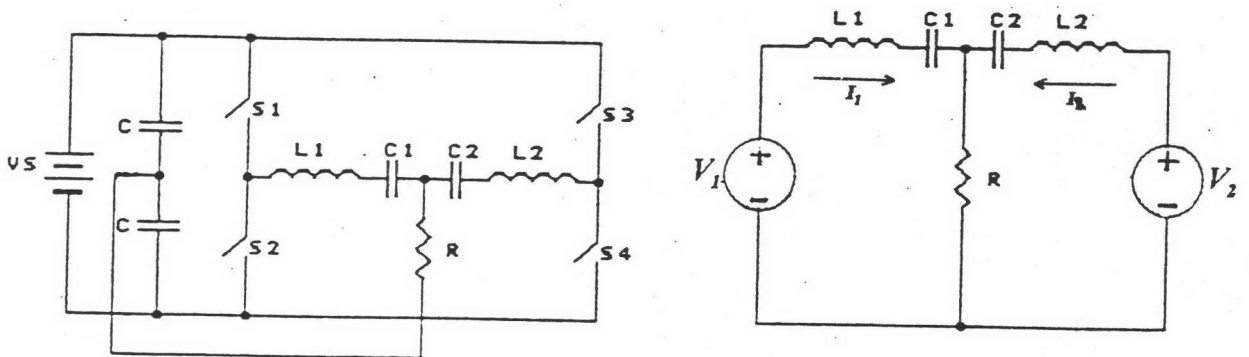
ในกรณีที่มีการควบคุมเฟส แรงดันตกคร่อมวงจรเรโซแนนซ์จะมีรูป
 เกือบสี่เหลี่ยมดังในรูปที่ 3.8 องค์ประกอบหลักมูลมีแอมพลิจูดตามสมการที่ (3.5) สำหรับ
 วงจรบริดจ์หรือกึ่งบริดจ์ตามลำดับ

$$V_p = \frac{4V_s}{\pi} \cos \frac{\theta}{2} \quad \text{หรือ} \quad \frac{2V_s}{\pi} \cos \frac{\theta}{2} \quad (3.5)$$

จะเห็นว่ากระแสโหลดและกำลังงานจะแปรตามเฟส θ คือขึ้นอยู่กับ $\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$ และ $\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$ ตามลำดับ

วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมคู่แบบที่ 1 [3],[10]

วงจรควบคุมเฟสแบบนี้จะมีองค์ประกอบ LC อย่างละสองตัวต่ออนุกรมกัน และต่ออยู่ระหว่างวงจรกึ่งบริดจ์สองวงจร และโหลดจะต่ออยู่ระหว่างจุดกึ่งกลางแหล่งเรโซแนนซ์และจุดกึ่งกลางระหว่างแหล่งไฟตรง 2 แหล่งตามรูปที่ 3.11 ซึ่งใช้ตัวเก็บประจุ C ค่าใหญ่ 2 ตัวแบ่งแรงดันจากแหล่งไฟตรง



(ก) วงจร

(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 3.11 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมคู่แบบที่ 1

จากวงจรในรูปที่ 3.11 (ก) สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังในรูปที่ 3.11 (ข) โดยที่ V_1, V_2 คือองค์ประกอบหลักมูลของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและมีแอมพลิจูดเท่ากับ $\frac{2V_s}{\pi}$ วงจรนี้ตรงกับวงจรในรูปที่ 1.1 ซึ่งมีวงจรสมมูลเทวินินดังในรูปที่ 1.2 องค์ประกอบของวงจรสมมูลเทวินินได้แก่

$$L_s = L_1 // L_2 = \frac{L_1}{2}, L_1 = L_2 \quad (3.6)$$

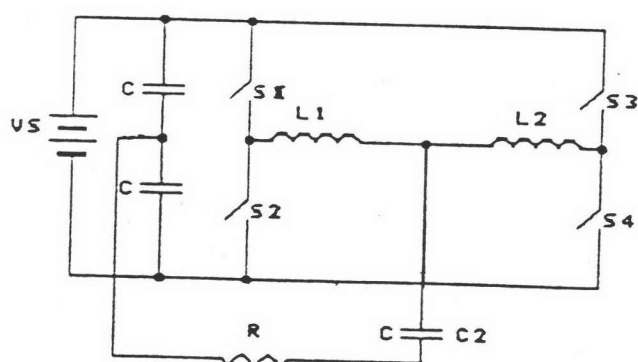
$$C_s = C_1 // C_2 = 2C_1, C_1 = C_2 \quad (3.7)$$

$$R_s = R \quad (3.8)$$

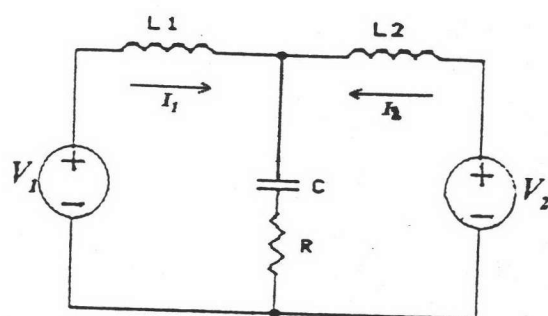
เนื่องจากแหล่งเทวินินที่แอมพลิจูดเท่ากับ $\frac{4V_s}{\pi} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$ (ดูสมการที่ 1.9) กระแสและกำลัง
 ด้านออกทางด้านออกจะแปรตามอัตราส่วน $\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$ และ $\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$ ตามลำดับ(ดูสมการ
 1.10 และ 1.11) อนึ่งมุม θ ในที่นี้สัมพันธ์กับมุม α ในรูปที่ 3.8 ดังนี้ $\theta + \alpha = 180^\circ$

วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมคู่แบบที่ 2.[3]

ใช้ตัวเหนี่ยวนำสองตัวอนุกรมกันและต่อไว้ระหว่างวงจรกึ่งบริดจ์ ส่วน
 โหลดต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุโดยต่อไว้ระหว่างจุดกึ่งกลางแหล่งกับจุดกึ่งกลางของตัวเหนี่ยวนำ
 นำสองตัวที่ต่อระหว่างวงจรกึ่งบริดจ์ วงจรประกอบด้วยองค์ประกอบ L 2 ตัว C 1
 ตัว ดังแสดงตามรูปที่ 3.12



(ก) วงจร



(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 3.12 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมคู่แบบที่ 2

จากวงจรสมมูลของรูปที่ 3.12 สามารถเขียนวงจรสมมูลเทวินินตามรูปที่ 1.2 ซึ่งเป็นวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมที่มีค่าองค์ประกอบดังนี้

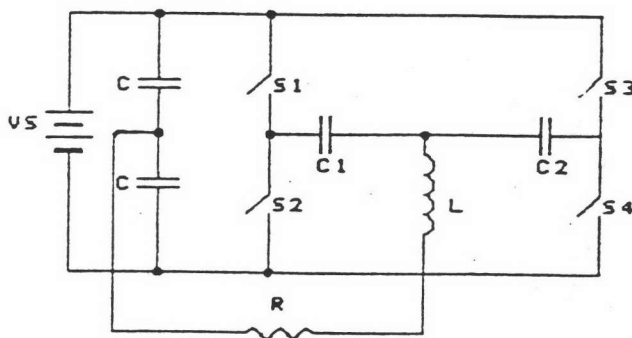
$$L_e = L_1 / 2 \quad \text{ถ้า} \quad L_1 = L_2 \quad (3.9)$$

$$C_e = C \quad (3.10)$$

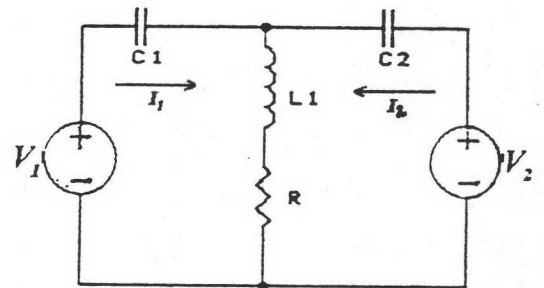
$$R_e = R \quad (3.11)$$

วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมคู่แบบที่ 3.[3]

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบนี้ใช้ตัวเก็บประจุสองตัวต่ออนุกรมกันระหว่างวงจรกึ่งบริดจ์ ส่วนโหลดต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและต่อระหว่างกึ่งกลางแหล่งกับจุดกึ่งกลางของตัวเก็บประจุลักษณะของวงจรแสดงดังรูปที่ 3.13



(ก) วงจร



(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 3.13 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมคู่แบบที่ 3

จากวงจรสมมูลของรูปที่ 3.13 สามารถเขียนวงจรสมมูลเทวินินได้ตามรูปที่ 1.2 ซึ่งเป็นวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมที่มีองค์ประกอบดังนี้

$$C_e = C_1 // C_2 = 2C_1, (C_1 = C_2) \quad (3.12)$$

$$L_s = L \quad (3.13)$$

$$R_s = R \quad (3.14)$$

ข้อสรุปสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมคู่

จากการศึกษาและทำการวิเคราะห์ห้วงวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมคู่ทั้ง 3 แบบได้ข้อสรุปดังนี้

1. วงจรทั้งสามแบบสามารถมีวงจรสมมูลเป็นวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมได้
2. วงจรแตกต่างกันเฉพาะการจัดวางตำแหน่งขององค์ประกอบ
3. กระแสไหลและกำลังแปรตาม $\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$ และ $\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$ ตามลำดับ

4. ความแตกต่างที่ชัดเจนคือขณะที่เฟสระหว่างสองแหล่งมีค่าเข้าใกล้ 180 องศา คือขนาดของกระแสที่ไหลออกจากแหล่งแรงดันสี่เหลี่ยม สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมคู่แบบที่ 3 ไม่เหมาะกับวิธีการควบคุมแบบนี้เพราะกระแสจะมีมูมนำหน้าแรงดัน ในขณะที่วงจรอีกสองแบบกระแสจะมีมูมด้าหลังแรงดัน

5. วงจรที่เหมาะสมกับการควบคุมโดยวิธีการนี้คือวงจรแบบที่ 1 และแบบที่ 2 โดยวงจรแบบที่ 2 เพราะเมื่อเฟสของสองแหล่งแตกต่างกัน 180 องศา กระแสจะมีค่าต่ำเนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์อันเนื่องมาแต่ตัวเหนี่ยวนำช่วยจำกัดกระแส

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ จะทำการสร้างและทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมคู่ 2 แบบคือวงจรแบบที่ 1 และวงจรแบบที่ 2 โดยทำการทดสอบวงจรที่องค์ประกอบสมมูลเทวินินค่าเดียวกัน เพื่อศึกษาถึงกำลัง, ประสิทธิภาพของวงจรและแรงดันค้ำ้นออก สำหรับวงจรแบบที่ 3 นั้นจะไม่ทำการทดสอบ เนื่องจากวงจรแบบดังกล่าวจะแตกต่างกับอีกสองวงจร กล่าวคือจะเกิดกระแสนำหน้าในขณะที่เฟสระหว่างสองแหล่งแตกต่างกันมากขึ้นอันจะก่อให้เกิดการสูญเสียในสวิตช์มากยิ่งขึ้น