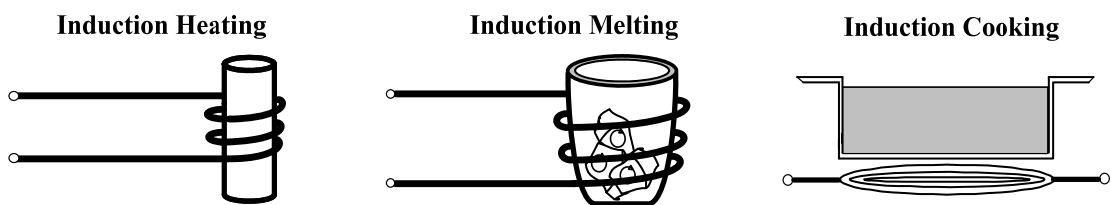


บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของวงจรฟูลบริดจ์เรโซแนนท์ แบบอนุกรมที่ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานที่จำเป็นต้องเข้าใจในขั้นแรกสุดเกี่ยวกับการเกิดความร้อนที่ตัวชิ้นงานที่ต้องการทำให้เกิดความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ได้หลายประเภทดังรูปที่ 2.1 โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการทดสอบกับอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงประเภท Induction Heating

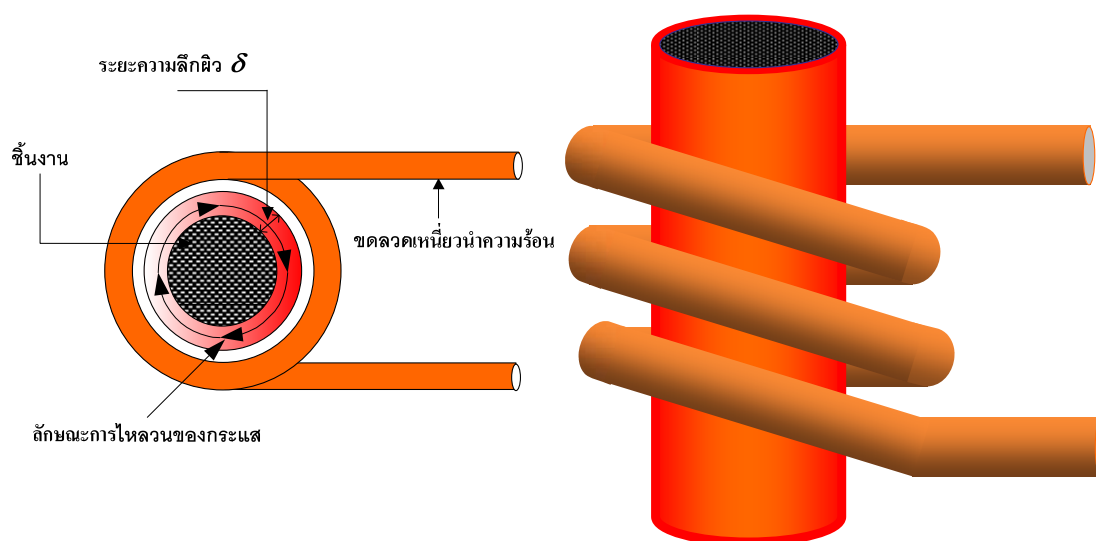


รูปที่ 2.1 ลักษณะชิ้นงานต่างๆ ที่ต้องการทำให้เกิดความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง

เนื้อหาหลักในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับข้อมูลพื้นฐานการทำให้เกิดความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง หลักการสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนที่ตัวชิ้นงาน โดยจะพิจารณาในส่วนต่างๆ ของโครงสร้างอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงประเภท Induction Heating ซึ่งจะประกอบไปด้วย ภาคแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz และวงจร LC ฟิวเตอร์ ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ภาคหม้อแปลงความถี่สูง ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนและชิ้นงาน รวมไปถึงลักษณะการต่อโหลดเรโซแนนท์ทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน การควบคุมกำลังไฟฟ้าในแบบต่างๆ และโหมดการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์เรโซแนนท์แบบอนุกรม ซึ่งรายละเอียดต่างๆ จะได้นำเสนอในอันดับถัดไปดังนี้

2.2 หลักการพื้นฐานการเกิดความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง

การให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง คือกระบวนการทำให้เกิดความร้อนขึ้นโดยตรงในชิ้นงานที่เป็นวัสดุแม่เหล็ก (Ferromagnetic Material) โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดมาจากการเหนี่ยวนำทำให้มีกระแสสลับไหลที่ผิวของชิ้นงานจากการป้อนกระแสสูงและความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ ขดลวดเหนี่ยวนำนี้จะสร้างฟลักแม่เหล็กความถี่สูงคล่องผ่านชิ้นงานทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้มีกระแสไหลวน (Eddy Current) ที่ผิวของชิ้นงานซึ่งมีค่าความต้านทานทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณที่มีกระแสไหลผ่าน



รูปที่ 2.2 ลักษณะการไหลวนของกระแสไฟฟ้าสลับความถี่สูงที่ชิ้นงาน

ความลึกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในตัวชิ้นงานนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหล ซึ่งจะเป็นความถี่เดียวกับความถี่ที่ป้อนเข้าไปในขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนที่พันอยู่รอบชิ้นงานโลหะ ดังนั้นปริมาณกระแสที่ไหลในแท่งเหล็กจะเท่ากับปริมาณกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำ

สำหรับองค์ประกอบของการเกิดความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำที่ความถี่สูงนี้ จะประกอบไปด้วยความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ คือ ความถี่ (Frequency : f) สภาพความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity : ρ) และ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability : μ) ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์กับค่าความลึกผิวของการไหลวนของกระแส (Skin depth : δ) ได้โดยสมการ (2.1) ดังต่อไปนี้

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_o \mu_r f \pi}} \quad (2.1)$$

เมื่อ δ = ค่าความลึกผิว (m)
 ρ = สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงาน ($\Omega \cdot m$)
 f = ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อน (Hz)
 μ_r = ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของชิ้นงาน
 $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

จากสมการ (2.1) จะพบว่าเมื่อความถี่นั้นมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้กระแสไหลวนไหลลึกกลงไปจากบริเวณผิวชิ้นงานได้น้อยลงทั้งนี้เนื่องจากค่าความลึกของการไหลของกระแสไหลวน (Current depth : δ) มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความถี่

การให้ความร้อนกับชิ้นงานในงานอุตสาหกรรมทั่วไปนั้น จะเป็นการให้ความร้อนกับชิ้นงานในบริเวณสั้นๆ ดังนั้นจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนที่พันรอบชิ้นงาน จึงมีจำนวนรอบน้อย ดังรูปที่ 2.2 อีกทั้งยังเป็นการลดขนาดของเครื่องลง เนื่องจากจำนวนรอบน้อย กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการให้ความร้อนกับชิ้นงานก็น้อยลง ซึ่งในการให้ความร้อนกับชิ้นงานในลักษณะนี้ เนื่องจากจำนวนรอบของเหนี่ยวนำความร้อนน้อย จะทำให้แรงดันที่ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนมีค่าต่ำ ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงประเภท Induction Heating ขนาด 3kW จะเห็นได้ว่าจำนวนรอบขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนจะมีจำนวนรอบเพียง 3 รอบ ดังนั้นจึงต้องการกระแสที่มีปริมาณสูง ประมาณ 100 A ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนที่จะนำมาใช้นี้จึงจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่พอสมควร เพื่อที่จะสามารถรองรับปริมาณกระแสที่มีค่าสูงได้ และขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนนี้ จะต้องสามารถระบายความร้อนได้ เพื่อป้องกันไม่ให้ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนในบริเวณที่เกี่ยวข้องกับชิ้นงานนั้นได้รับความเสียหายจากการให้ความร้อนกับชิ้นงาน ดังนั้นจะต้องใช้ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนซึ่งภายในของขดลวดมีลักษณะกลวง เพื่อที่จะสามารถระบายความร้อนได้ โดยการใช้น้ำไหลผ่านภายในของขดลวด

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในการให้ความร้อนกับชิ้นงานจะต้องทำการสร้างอุปกรณ์ที่สามารถสร้างแรงดันต่ำ กระแสสูง และความถี่สูง เนื่องจากในการให้ความร้อนกับชิ้นงานด้วยการเหนี่ยวนำนี้จะต้องอาศัยความถี่สูง ยกตัวอย่างเช่น การให้ความร้อนกับชิ้นงานที่ความถี่ 50 kHz แทนการใช้ความถี่จากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz จะพบว่าความถี่ที่ใช้ในการให้ความร้อนนั้นจะมีค่าเป็น 1,000 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz ทำให้สนามแม่เหล็กที่ชิ้นงานมีการกลับทิศไปมาเพื่อให้โมเลกุลของชิ้นงานที่นำมาให้ความร้อนนี้กลับทิศไปมาด้วยความเร็ว 50,000 ครั้งต่อวินาที



รูปที่ 2.3 หม้อแปลง Step-down ความถี่สูง



รูปที่ 2.4 ลักษณะรูปทรงแกนเฟอร์ไรท์ขนาดต่างๆ ที่นำมาใช้ในหม้อแปลง Step-down ความถี่สูง

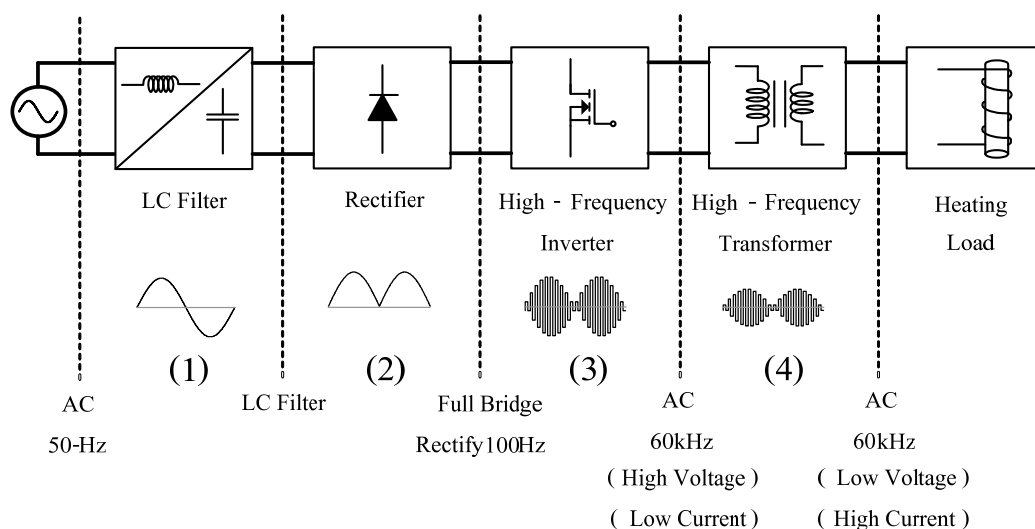
ดังนั้นระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์กับขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน จะต้องหม้อแปลง Step-down ที่สามารถทนความถี่สูงได้ ซึ่งในส่วนแกนของหม้อแปลงนี้จะใช้แกนเฟอร์ไรท์เพื่อป้องกันการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก โดยหม้อแปลง Step-down ความถี่สูงนี้จะทำหน้าที่ลดแรงดันจากทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ขณะเดียวกันหม้อแปลง Step-down ความถี่สูงนี้ยังทำการเพิ่มกระแสให้มีค่าสูงขึ้น ขดลวดที่นำมาใช้ในการพันทางด้านทุติยภูมิของหม้อหม้อแปลง Step-down ความถี่สูงนี้จะเป็นขดลวดกลวงเช่นเดียวกับขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน ทำให้สามารถทำการระบายความร้อนให้กับขดลวดได้เช่นเดียวกับขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนที่เกี่ยวข้องกับชิ้นงาน ในส่วนของขดลวดด้านปฐมภูมินั้น จะใช้ลวดตีเกลียวเพื่อที่จะสามารถรองรับกระแสและความถี่สูงทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ได้ ซึ่งลวดตีเกลียวที่นำมาพันด้านปฐมภูมินี้จะใช้ลวดทองแดงเบอร์ 28 S.W.G.

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & \\
 S_4 & & & & & & S_1 \\
 & S_2 & & S_3 & & &
 \end{array}$$

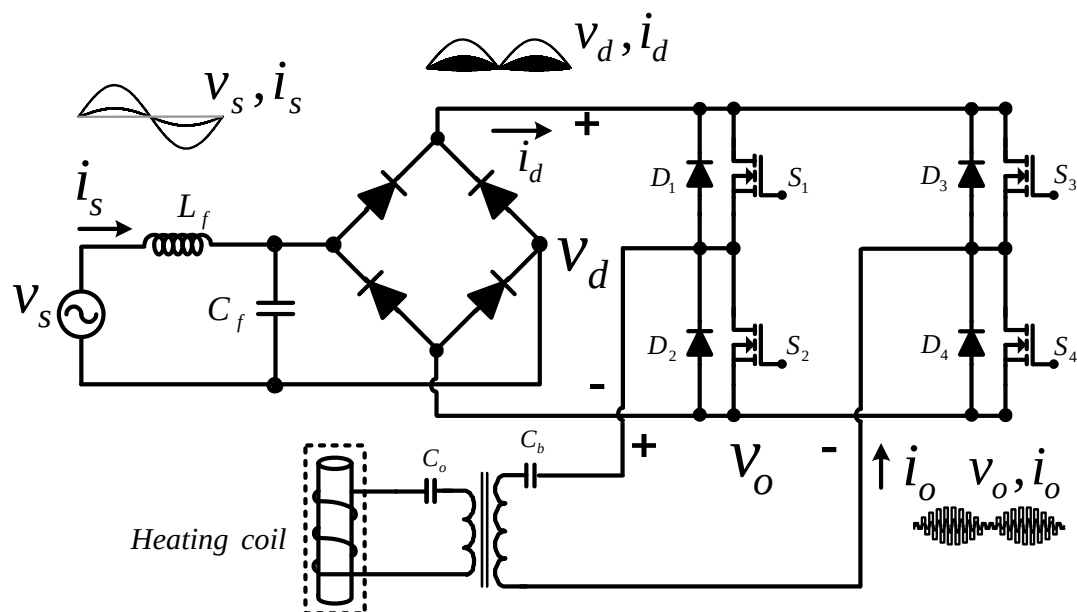
2.3 หลักการสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนกับชิ้นงาน

ในปัจจุบันการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี และได้มีการพัฒนามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยในส่วนของหลักการที่นำเสนอนี้จะอาศัยหลักการเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการสร้างคลื่นแรงดันและกระแสความถี่สูงเพื่อนำไปใช้ในการเหนี่ยวนำเพื่อทำให้เกิดความร้อนกับชิ้นงาน ซึ่งโครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำทำให้เกิดความร้อนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 โดยจะมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ คือ

- 1) ภาคแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz และวงจร LC ฟิลเตอร์
- 2) ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
- 3) ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง
- 4) ภาคหม้อแปลงความถี่สูง ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนและชิ้นงาน



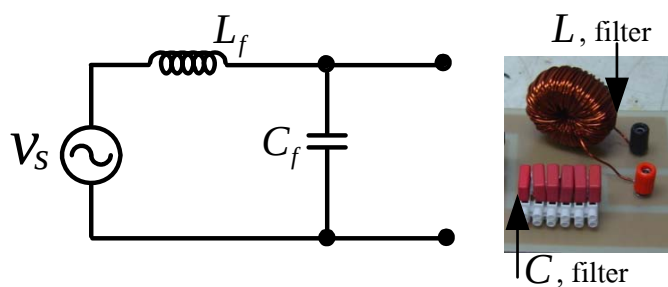
รูปที่ 2.5 โครงสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงที่ทำให้เกิดความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) กรณีที่แรงดันทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงดันคี่ซีกเร็กติไฟฟาย 100Hz

2.3.1 ภาคแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz และ วงจรฟิลเตอร์

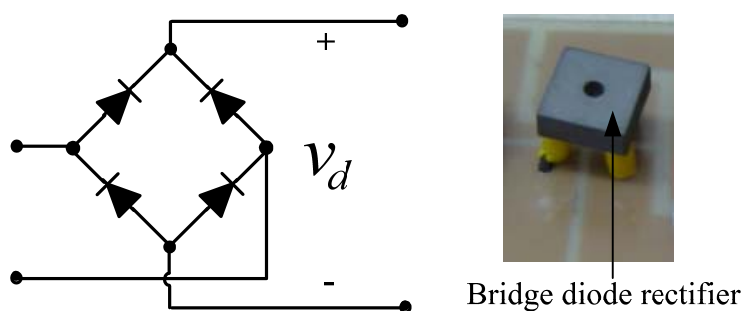
ในส่วนนี้จะป็นวงจรภาคกำลังความถี่ต่ำซึ่งจะเป็นส่วนแรกของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ความถี่สูงที่ใช้ในการเหนี่ยวนำทำให้เกิดความร้อนโดยจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz และ LC ฟิลเตอร์โดยจะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50-Hz จากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า และทำการต่อวงจร LC ฟิลเตอร์ เพื่อกรององค์ประกอบความถี่สูง ซึ่งมีวงจรดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ภาคแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz และวงจร LC ฟิลเตอร์

2.3.2 ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

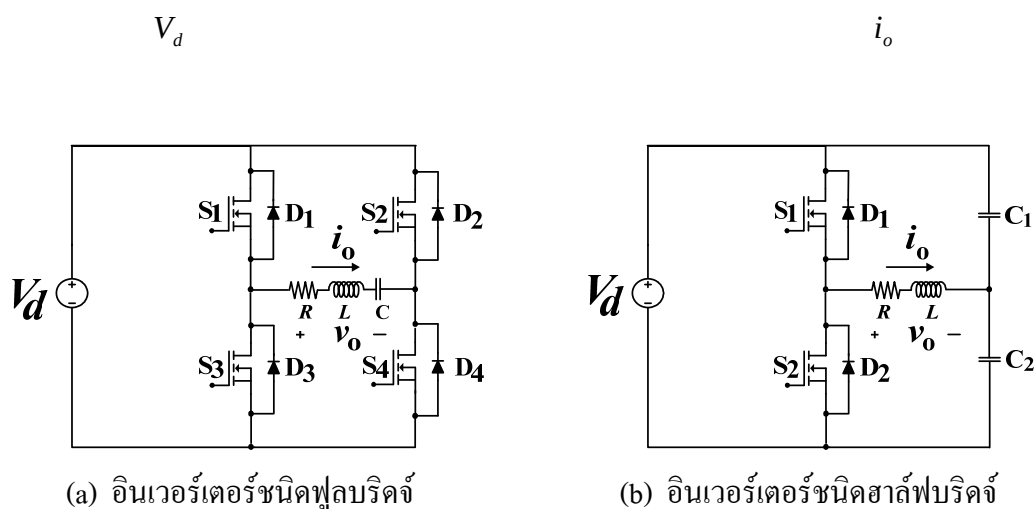
ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะประกอบด้วยวงจรเรกติฟายที่ได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50-Hz จากจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz ผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์และเมื่อนำมาผ่านวงจรเรกติฟายเพื่อทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยวงจรเรกติฟายนี้จะมีคุณสมบัติคือยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังโหลดเพียงทิศทางเดียว เพื่อให้ได้คลื่นแรงดันคิซีเรกติฟาย 100 Hz ป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยสามารถแบ่งวงจรออกเป็น 2 รูปแบบหลักๆ คือ วงจรฮาล์ฟเวฟเรกติฟายเออร์ (Half wave rectifier) และวงจรฟูลเวฟเรกติฟายเออร์ (Full wave rectifier) ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะทำการพิจารณาเฉพาะวงจรฟูลเวฟเรกติฟายเออร์ เหตุผลเนื่องจากให้แรงดันไฟตรงที่สูงกว่าและเรียบกว่ามาก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวงจรฮาล์ฟเวฟเรกติฟายเออร์



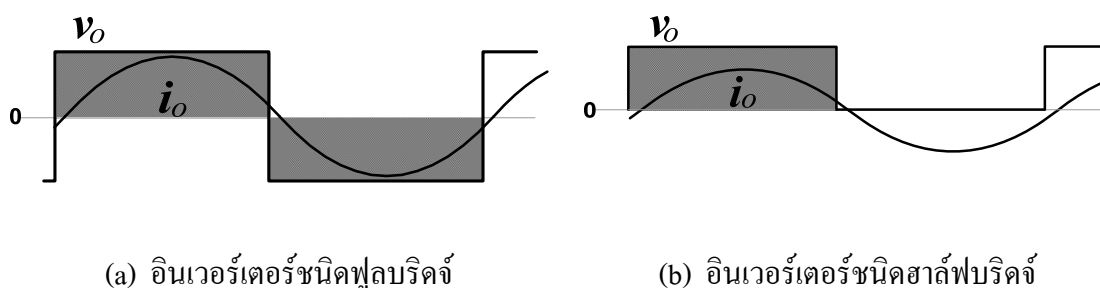
รูปที่ 2.8 ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

2.3.3 ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง

ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีหน้าที่หลักคือจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงให้แก่โหลดทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ซึ่งแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์นั้นจะมีลักษณะเป็นคลื่นแรงดันคิซีเรกติฟาย ที่ได้มาจากภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อนำมาผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลงไฟกระแสตรงให้เป็นไฟกระแสสลับความถี่สูง ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์และฮาล์ฟบริดจ์ ซึ่งมีข้อแตกต่างกันดังรูปที่ 2.9(a) และ 2.9(b) ตามลำดับ สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ดังรูปที่ 2.9(a) จะมีคู่สวิตช์ S_1 , S_4 และ S_2 , S_3 ทำงานสลับกันเพื่อแปลงไฟกระแสตรงให้เป็นไฟกระแสสลับความถี่สูง เมื่อวัดแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (v_o) จะได้รูปคลื่นสแควร์ที่มีแรงดันสูงสุดเท่ากับ $+V_d$ และแรงดันต่ำสุดเท่ากับ $-V_d$ และกระแสไหลผ่านโหลด (i_o) เป็นรูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 2.10(a) ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์ดังรูปที่ 2.9(b) ทำหน้าที่เหมือนกับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ แต่จะมีสวิตช์ S_1 และ S_2 ทำงานสลับกัน เมื่อวัดแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (v_{s2}) จะได้ค่าแรงดัน



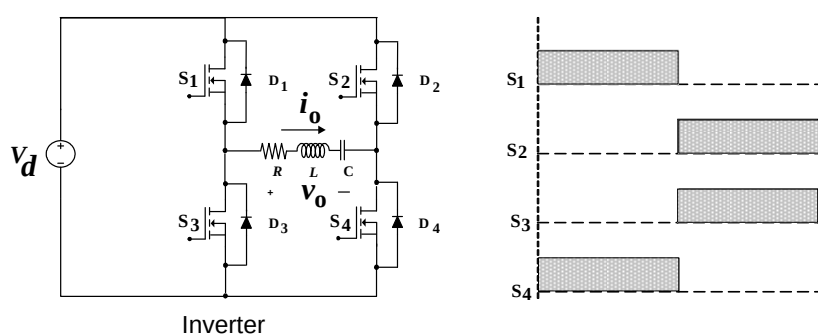
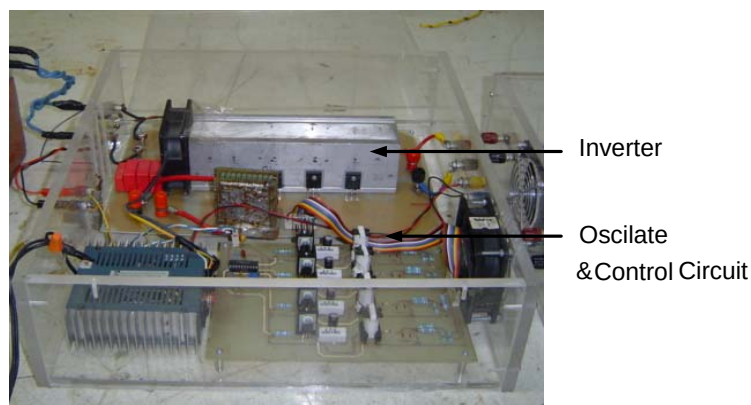
รูปที่ 2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดฟูลบริดจ์และชนิดฮาล์ฟบริดจ์



รูปที่ 2.10 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์และชนิดฮาล์ฟบริดจ์

จากรูปที่ 2.10 วงจรฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ จะมีแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสไหลผ่านโหลดเป็นครึ่งหนึ่งของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะมากกว่าฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ จะเห็นได้ว่าฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์สามารถรับแรงดันและกระแสที่มีปริมาณมากได้ ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์กับกรณีที่ต้องจ่ายโหลดที่เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) ซึ่งต้องการแหล่งจ่ายที่มีกำลังไฟฟ้ามก

จากรูปที่ 2.11 ในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ยังประกอบไปด้วยวงจรควบคุม (Control Circuit) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการให้กำเนิดสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยม ซึ่งสัญญาณนี้จะนำมาใช้ในการขับขาเกทของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ ไอซีเบอร์ UC 3879N เป็นไอซี 20 ขาในการสร้างสัญญาณ ไอซีเบอร์นี้สามารถควบคุมได้ทั้งความถี่และการปรับ Phase-Shift การควบคุมความถี่นั้นสามารถทำการปรับได้โดยปรับค่าความต้านทานได้ที่ขา 18 ของไอซี สัญญาณพัลส์ที่ได้จากชุดวงจรสร้างสัญญาณนี้ จะถูกนำมาต่อเข้ากับวงจรขับ และใช้หม้อแปลงแยกกราวด์เพื่อแยกกราวด์ของสัญญาณทั้งหมด ออกจากชุดสร้างสัญญาณให้เป็นอิสระต่อกันและมีชุดสแน็บเบอร์เพื่อป้องกันแรงดันสไปค์ของแรงดัน แล้วนำไปขับขาเกทของวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อไป



รูปที่ 2.11 ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง

2.3.4 ภาคหม้อแปลงความถี่สูง ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนและชิ้นงาน

จากรูปที่ 2.12 ทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีส่วนประกอบอยู่ 3 ส่วนหลักๆซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังต่อไปนี้

2.3.4.1 หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท์ความถี่สูง

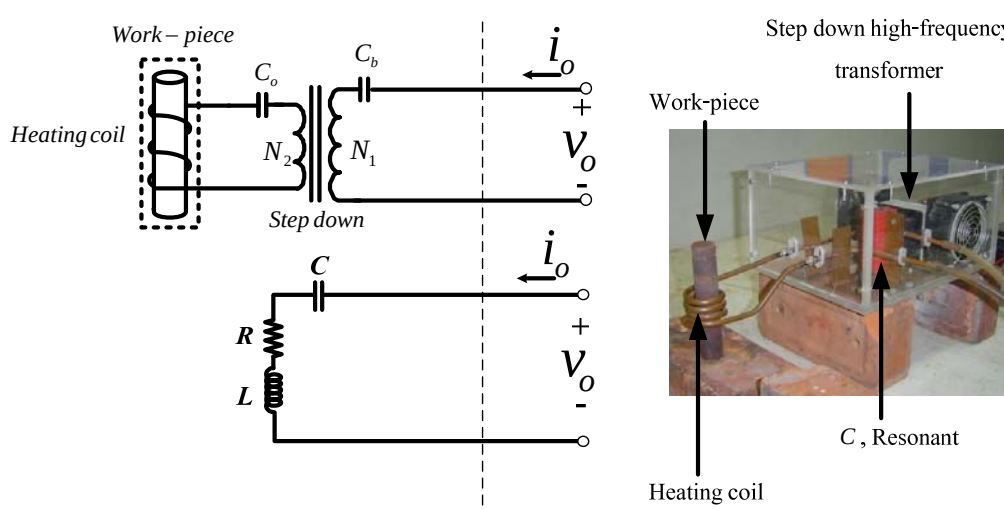
ประกอบด้วยขดลวดทองแดงตีเกลียวทางด้านปฐมภูมิ และขดลวดในลักษณะของท่อทองแดงทางด้านทุติยภูมิ เพื่อให้สามารถระบายความร้อนด้วยน้ำผ่านภายในท่อทองแดง โดยที่ด้านปฐมภูมิจะมีจำนวนรอบของขดลวดสูงกว่า ทางด้านทุติยภูมิในอัตราส่วน 10:1 ซึ่งจะทำให้ได้กระแสทางด้านทุติยภูมิประมาณ 200 A ในขณะที่กระแสทางด้านปฐมภูมิจะมีค่าประมาณ 20 A จะได้กำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่ใช้ในการทำ ให้เกิดความร้อนกับชิ้นงานประมาณ 1,800 W โดยที่กระแสที่ไหลเข้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงนี้ จะมีลักษณะรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ที่มีความถี่ 60 kHz

2.3.4.2 ตัวเก็บประจุความถี่สูง กระแสสูง

ตัวเก็บประจุความถี่สูง กระแสสูง จะสามารถแบ่งออกเป็นตัวเก็บประจุความถี่สูง กระแสสูงต่ออนุกรมอยู่กับขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนและตัวชิ้นงาน เพื่อทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์และมีตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเพื่อทำให้คลื่นแรงดันสแควร์ความถี่สูงทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีลักษณะที่สมมาตรกัน

2.3.4.3 ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งมีแท่งเหล็กชิ้นงานสอดอยู่ภายใน ดังรูปที่ 2.12 โดยที่ตัวชิ้นงานจะต้องเป็นวัสดุแม่เหล็ก (Ferromagnetic Material) ภายในท่อทองแดงจะใช้เป็นบริเวณที่มีน้ำไหลวนผ่าน เพื่อเป็นการระบายความร้อนออกจากขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน อันเนื่องมาจากความร้อนที่แผ่กระจายมาจากตัวของชิ้นงาน โดยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนและตัวชิ้นงานนี้จะมีลักษณะของวงจรสมมูลเป็นวงจร RL อนุกรม และทำการตัวเก็บประจุความถี่สูงเพื่อที่จะทำให้เกิดสถานะเรโซแนนท์ ดังนั้นโหลดของอินเวอร์เตอร์นี้จึงสามารถแทนด้วยวงจร RLC เรโซแนนท์อนุกรมเพื่อให้สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดหรือชิ้นงานได้มากที่สุด



รูปที่ 2.12 ภาคหม้อแปลงความถี่สูง ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน และชิ้นงาน

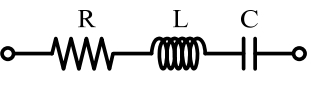
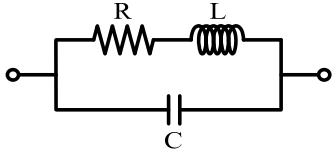
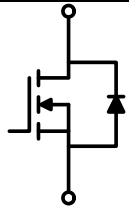
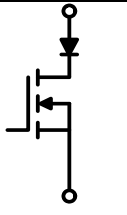
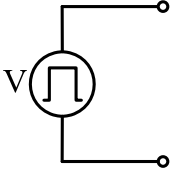
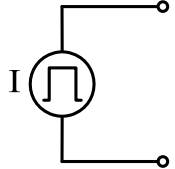
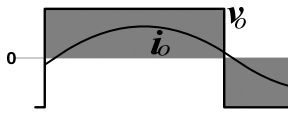
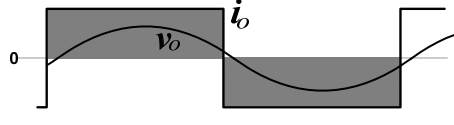
2.4 โหลดเรโซแนนท์

สำหรับโหลดเรโซแนนท์ที่ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงโดยทั่วไป จะมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือลดการสูญเสียในการสวิตช์ เมื่อสวิตช์ตัดต่อวงจรที่กระแสศูนย์ (ZCS) หรือสวิตช์ตัดต่อวงจรที่แรงดันศูนย์ (ZVS) แต่ข้อเสียเปรียบที่สำคัญของวงจรเรโซแนนท์คือ ที่ตำแหน่งใกล้เคียงความถี่เรโซแนนท์กระแสในวงจรมีค่ามาก ส่งผลให้แรงดันตกคร่อมวงจรมีค่ามากด้วย ในกรณีที่วงจรเรโซแนนท์ที่มีค่า Q สูง ดังนั้นสวิตช์ที่เลือกใช้จะต้องสามารถทนแรงดันตกคร่อมขณะ OFF ได้สูงและ LC ในวงจรเรโซแนนท์ที่เลือกใช้ก็เช่นกัน จะต้องมีความถี่ใหญ่ เพื่อให้สามารถเก็บพลังงานได้มาก อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์โดยทั่วไปจะมีด้วยกัน 2 ชนิดคือ อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ชนิดอนุกรมและชนิดขนาน ซึ่งทั้งสองชนิดนี้มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 และมีโครงสร้างของวงจรดังแสดงในตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์โหลดเรโซแนนท์ชนิดอนุกรมจะใช้แหล่งจ่ายชนิดแรงดันคงที่ (Constant Voltage Source) เนื่องจากต้อง

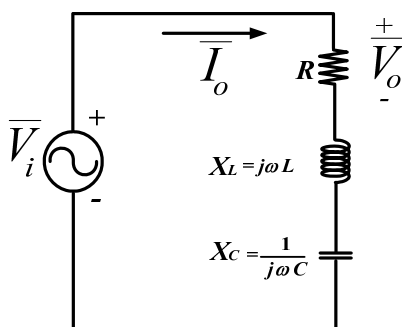
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม และชนิดขนาน

วงจรอินเวอร์เตอร์	ข้อดี	ข้อเสีย
เรโซแนนซ์อนุกรม	- โครงสร้างง่ายและราคาถูก - สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเรกติฟายเออร์ โดยไม่ต้องมีการปรับแรงดัน - กำลังไฟฟ้าที่จ่ายสามารถปรับควบคุมได้ง่ายโดยการปรับความถี่ที่วงจรอินเวอร์เตอร์	- ขณะป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรโหลดจะเปิดวงจรออกไม่ได้ - ไม่สามารถทนการลัดวงจรที่โหลดได้ - ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับความถี่สวิตช์ให้เลื่อนห่างออกจากความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้กระแสไม่ค่อยเป็นไซน์ ซึ่งเป็นผลให้มีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นตามมา
เรโซแนนซ์ขนาน	- ขณะป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรโหลดสามารถเปิดวงจรออกได้ - สามารถทนการลัดวงจรที่โหลดได้ - อุปกรณ์ L และ C ที่ใช้ในวงจรเรโซแนนซ์ไม่จำเป็นต้องมีพิกัดแรงดันสูง เนื่องจากกระแสเป็นรูปคลื่นสแควร์ จึงมีค่า Peak คงที่ที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์	- ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเรกติฟายเออร์ แต่ต้องมีการปรับแรงดันจากการใช้สวิตช์ควบคุม - จำเป็นต้องมี Choke เนื่องจากเป็น Constant Current - มีขนาดใหญ่เนื่องจากมี Choke และวงจรควบคุมแรงดันดีซีอินพุตให้กับอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบลักษณะของอุปกรณ์และรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและขนาน

Inverter	Series Resonant	Parallel Resonant
Load		
Switch		
Source		
Output Waveform		

ในกรณีอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงนั้น เหมาะสมที่จะใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม เนื่องจากโครงสร้างง่าย มีขนาดเล็กไม่ใหญ่ และวงจรควบคุมไม่ซับซ้อน มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงประเภท Induction Heating ดังนั้นในการพิจารณาจะทำการพิจารณาเฉพาะวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม



รูปที่ 2.13 วงจรเฟสเซอร์ RLC อนุกรม

วงจร RLC เรโซแนนซ์แบบอนุกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13 โดยจะนำเสนอการพิจารณาผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรในกรณีที่แรงดันอินพุตเป็นคลื่นไซน์ซึ่งจะเป็นพื้นฐานในการพิจารณาสำหรับกรณีที่อินพุตมีลักษณะคลื่นที่ไม่เป็นไซน์ได้ต่อไป จากวงจร RLC อนุกรมดังรูปที่ 2.13 ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและเอาต์พุตได้ดังสมการ (2.2)

$$\begin{aligned}\bar{V}_o &= \bar{V}_i \left(\frac{R}{R + jX_L + \frac{1}{jX_C}} \right) = \bar{V}_i \left(\frac{R}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \right) \\ &= \bar{V}_i \left(\frac{R}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \right)\end{aligned}\quad (2.2)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแรงดันอินพุตและเอาต์พุตแสดงได้ดังสมการ (2.3)

$$V_o = V_i \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \right) \quad (2.3)$$

ดังนั้นจะได้ทรานสเฟอว์ฟังก์ชันของวงจรคือ

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (2.4)$$

หรือ

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R} - \frac{1}{\omega RC}\right)^2}}$$

เรโซแนนซ์เกิดขึ้นเมื่อค่า $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ ซึ่งจะทำให้ค่าทรานสเฟอว์ฟังก์ชันของวงจรเท่ากับ 1 และความถี่ที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์นี้มีค่าดังสมการ

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.5)$$

หรือ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.6)$$

ค่า characteristic impedance (Z_o) วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมเท่ากับ

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} \quad (2.7)$$

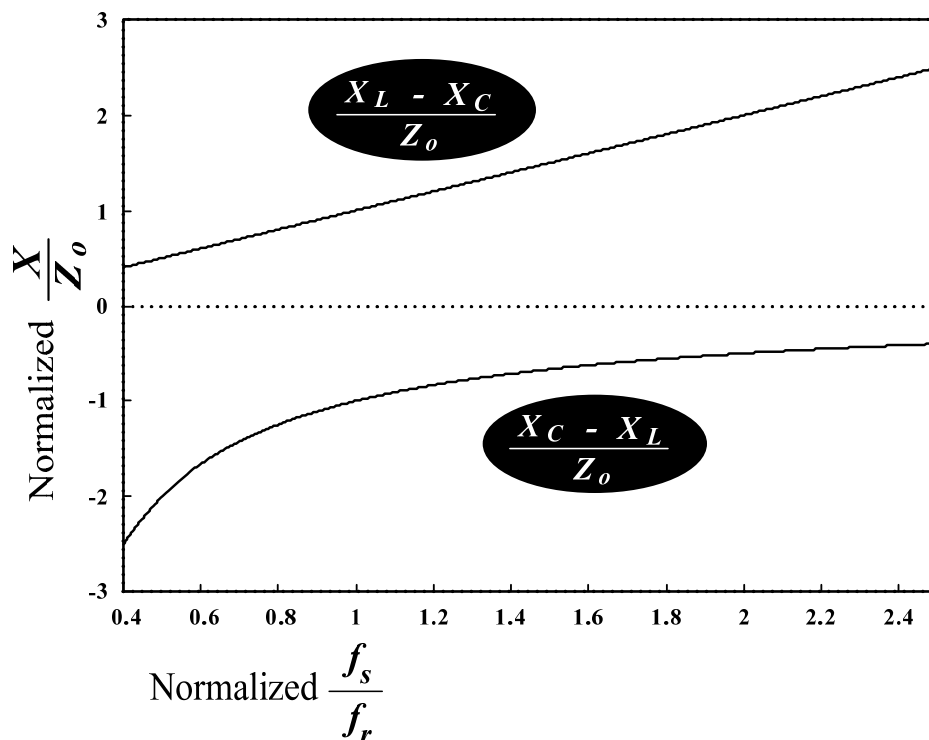
เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ X_L และค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ X_C เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง โดยสามารถอ้างอิงกับ Z_o ได้ดังนี้

$$\frac{X_L}{Z_o} = \frac{\omega L}{\omega_r L} = \frac{\omega}{\omega_r} \quad (2.8)$$

และ

$$\frac{X_C}{Z_o} = \frac{(1/\omega C)}{(-1/\omega_r C)} = -\frac{\omega_r}{\omega} \quad (2.9)$$

สามารถพล็อตกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ X_L และ X_C เทียบกับความถี่ได้ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งจะพบว่า $X_L = -X_C$ ขณะที่ความถี่ $f_s = f_r$



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง

ค่า Quality factor Q ของวงจรสามารถหาได้จากสมการ (2.10)

$$Q = 2\pi \left[\frac{\text{พลังงานที่เก็บไว้ในตัวเหนี่ยวนำสูงสุด}}{\text{พลังงานที่ใช้ไปต่อไซเคิล}} \right] \quad (2.10)$$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร ขณะที่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับศูนย์ จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงสุด และพลังงานจะถูกเก็บไว้ในตัวเหนี่ยวนำทั้งหมด ถ้ากำหนดให้กระแสที่ไหลในวงจร RLC อนุกรมมีค่าดังสมการ (2.11)

$$i_o = I_p \sin \omega t \quad (2.11)$$

พลังงานที่เก็บไว้ในตัวเหนี่ยวนำสูงสุดจะมีค่าดังสมการ (2.12)

$$\text{พลังงานที่เก็บไว้ในตัวเหนี่ยวนำสูงสุด} = \frac{1}{2} L I_p^2 \quad (2.12)$$

และพลังงานที่ใช้ไปต่อไซเคิลมีค่าดังสมการ (2.13)

$$\text{พลังงานที่ใช้ไปต่อไซเคิล} = \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{I_p^2 R}{f_r} \right) \quad (2.13)$$

ดังนั้นจะได้ค่า Quality factor Q ของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมดังสมการ (2.14)

$$Q = 2\pi \frac{\left(\frac{1}{2} \right) L I_p^2}{\left(\frac{1}{2} \right) \frac{I_p^2 R}{f_r}} = 2\pi f_r \frac{L}{R} = \frac{\omega_r L}{R} \quad (2.14)$$

เนื่องจากที่ความถี่เรโซแนนซ์ $\omega_r L = \frac{1}{\omega_r C}$ ดังนั้นจะได้

$$Q = \frac{1}{\omega_r R C} \quad (2.15)$$

คูณทั้งสองด้านของสมการ (2.15) ด้วย $\frac{\omega}{\omega_r}$

$$Q \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right) = \left(\frac{\omega_r L}{R} \right) \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right) = \frac{\omega L}{R} \quad (2.16)$$

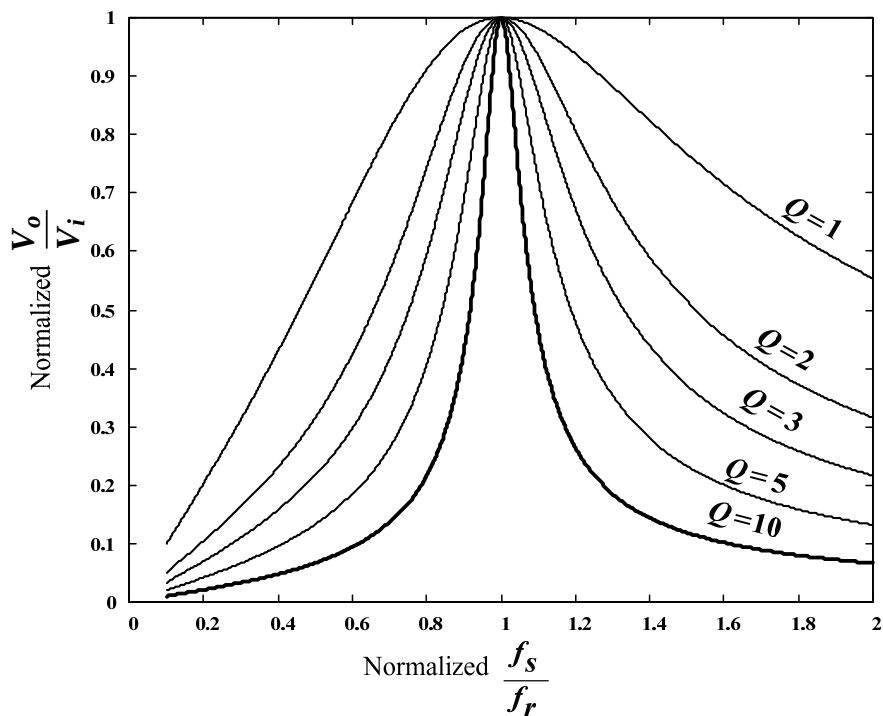
คูณทั้งสองด้านของสมการ (2.15) ด้วย $\frac{\omega_r}{\omega}$

$$Q\left(\frac{\omega_r}{\omega}\right) = \left(\frac{1}{\omega_r RC}\right)\left(\frac{\omega_r}{\omega}\right) = \frac{1}{\omega RC} \quad (2.17)$$

แทนค่า $\frac{\omega L}{R}$ จากสมการ (2.16) และ $\frac{1}{\omega RC}$ จากสมการ (2.17) ลงในทรานสเฟอร์ฟังก์ชันสมการ (2.4) จะสามารถเขียนทรานสเฟอร์ฟังก์ชันใหม่ในรูปของค่า Q ได้ดังสมการ (2.18)

$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_i} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(Q \frac{\omega}{\omega_r} - Q \frac{\omega_r}{\omega}\right)^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega}\right)^2}} \end{aligned} \quad (2.18)$$

สามารถแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่ Q ค่าต่างๆ ของวงจรได้ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าความถี่ของอินพุตไม่เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร จะทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงในขณะที่ Q ของวงจรมีค่าสูงขึ้น



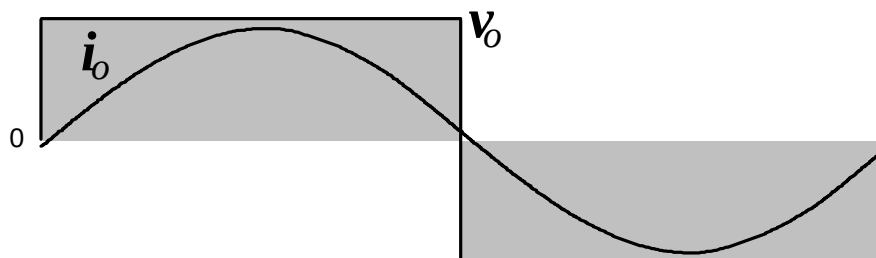
รูปที่ 2.15 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่ค่า Quality factor ต่างๆ

2.5 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม

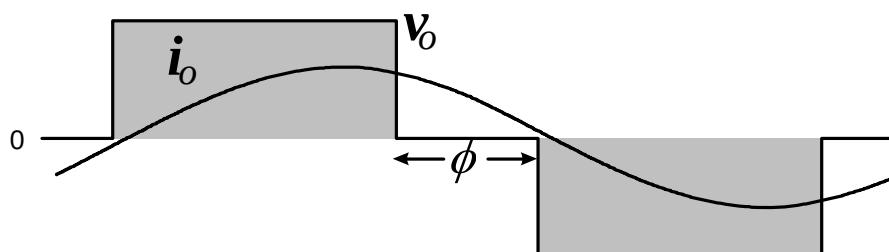
การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมสามารถควบคุมได้ 4 แบบ คือ

- 1) การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ Phase-Shift Controlled
- 2) การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ Pulse Density Modulation
- 3) การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ Asymmetrical Voltage Controlled
- 4) การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ Pulse Frequency Modulation

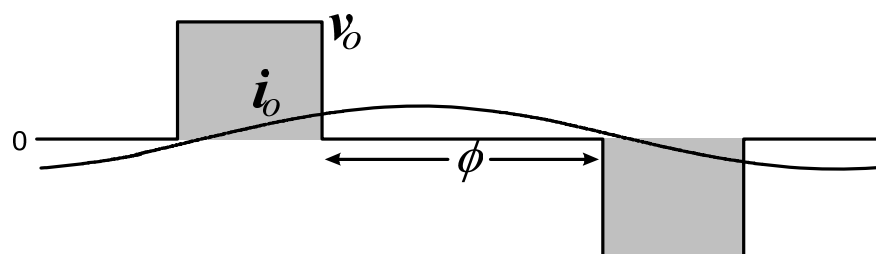
2.5.1 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุม Phase-Shift : ϕ



(a) มุม Phase-Shift 0 องศา



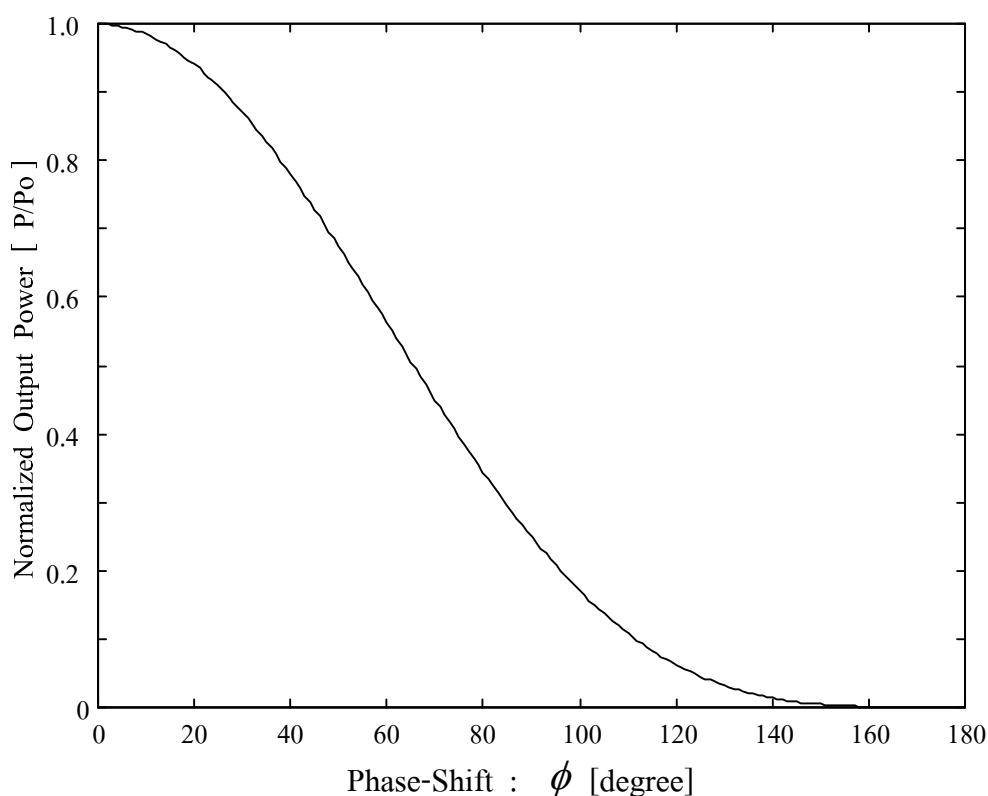
(b) มุม Phase-Shift 60 องศา



(c) มุม Phase-Shift 120 องศา

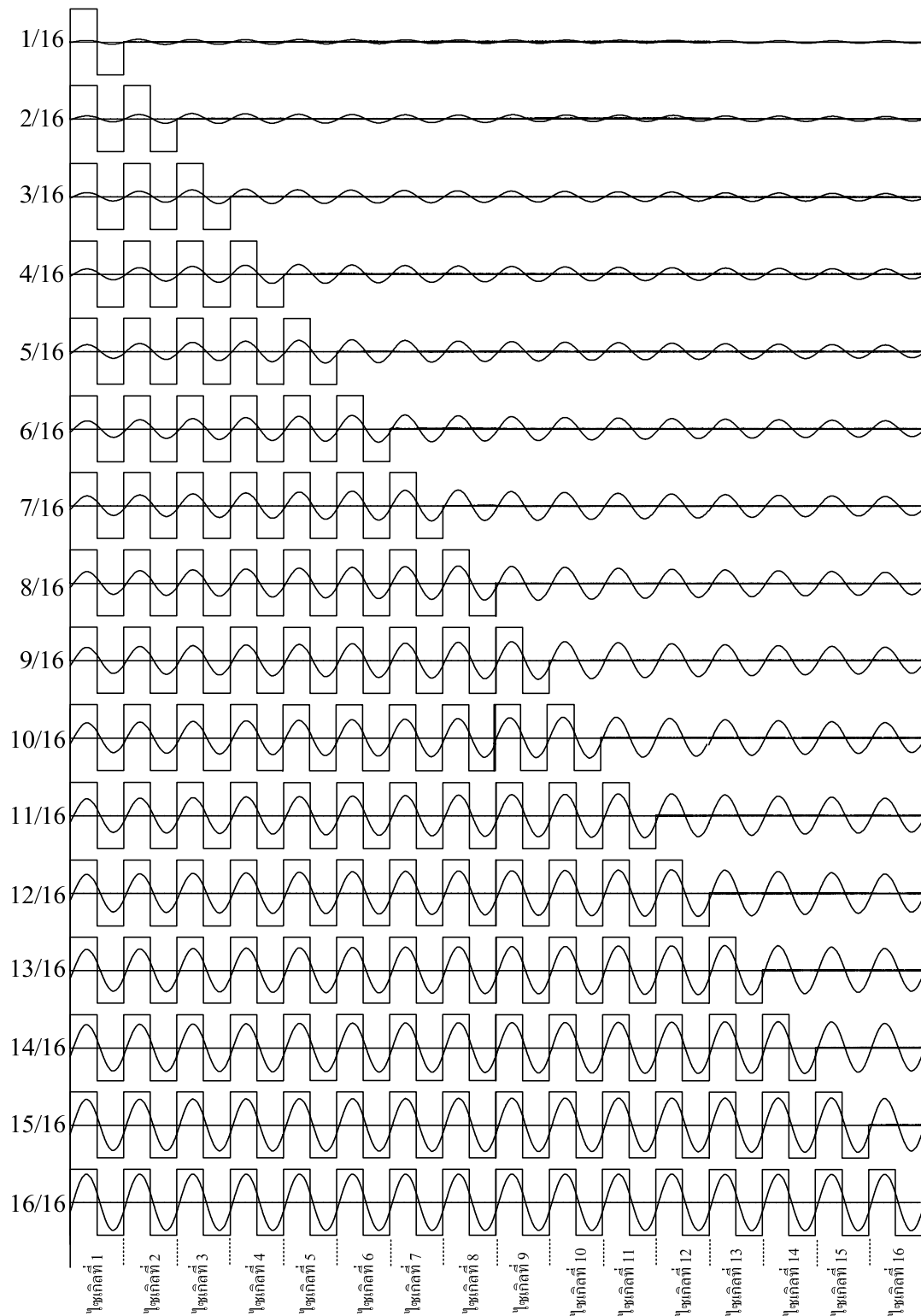
รูปที่ 2.16 คลื่นแรงดันและกระแสที่ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ

การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุม Phase-Shift จะเป็นการปรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ด้วยหลักการเลื่อนมุมเฟสของสัญญาณกึ่งหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ให้ซ้อนทับสัญญาณอีกกึ่งหนึ่งเป็นบางส่วนตามขนาดของมุม Phase-Shift โดยที่ความถี่สวิตช์จะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เพื่อให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ตำแหน่ง ZVS เสมอ ดังรูปที่ 2.16 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ เช่น ที่มุม Phase-Shift เท่ากับ 0 องศา ดังรูปที่ 2.16(a) จะได้ปริมาณกระแสมากที่สุด และเมื่อปรับมุม Phase-Shift เพิ่มขึ้นเป็น 60 องศา และ 120 องศา ดังรูปที่ 2.16(b) และรูปที่ 2.16(c) ตามลำดับ ปริมาณกระแสจะลดต่ำลงเรื่อยๆ ดังนั้นเมื่อนำมาเขียนเป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ จะได้ดังรูปที่ 2.17 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับมุม Phase-Shift มากขึ้นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะลดลงเรื่อยๆ การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุม Phase-Shift นี้มีข้อดีคือ เมื่อปรับมุม Phase-Shift มากขึ้นจะมีผลทำให้กระแสจ่ายโหลดทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ผิดเพี้ยนไปจากคลื่นไซน์มากขึ้น ซึ่งข้อดีนี้สามารถปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้นได้โดยการเลือกค่า Q ของวงจรเรโซแนนซ์ให้มีค่าสูงขึ้น



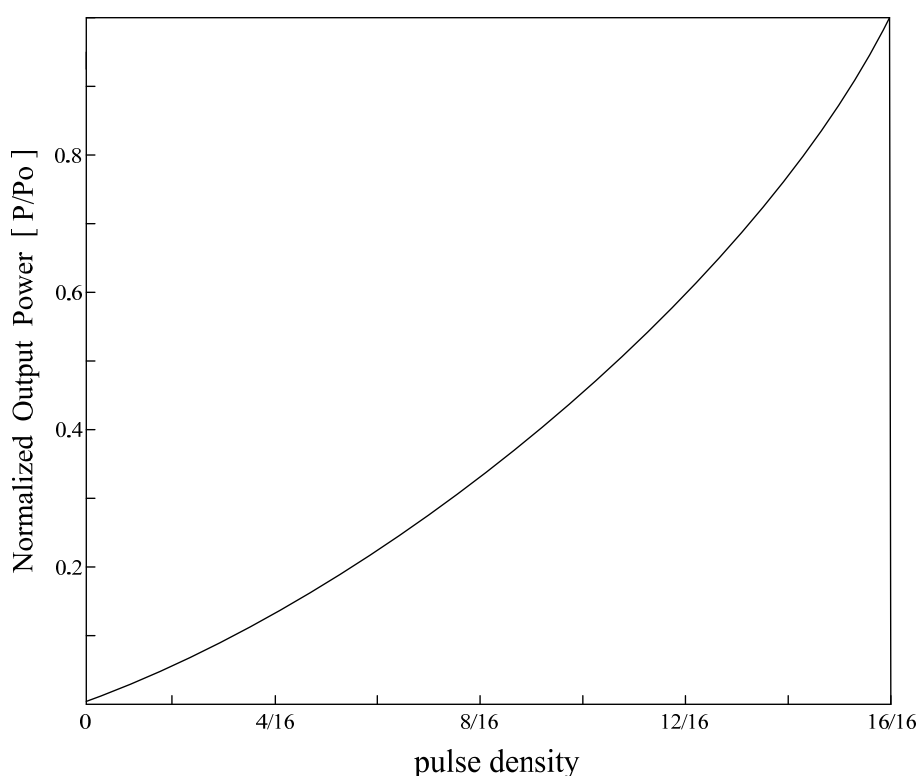
รูปที่ 2.17 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ

2.5.2 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ Pulse Density Modulation



รูปที่ 2.18 คลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวนไซเกิลต่างๆ

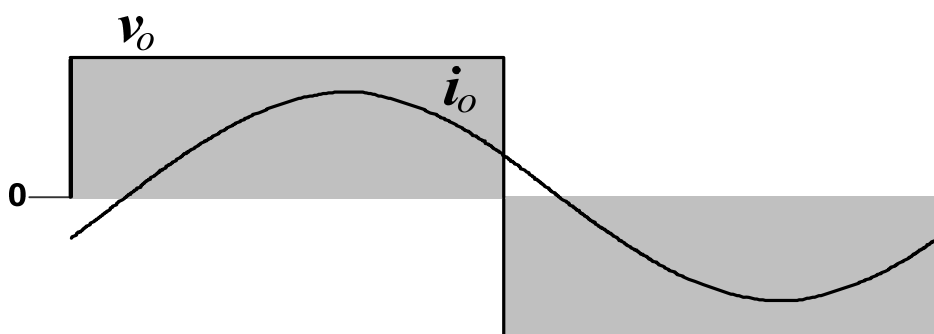
การควบคุมด้วยวิธีนี้เป็นการปรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ด้วยหลักการลดจำนวนไซเคิลของคลื่นสแควร์ของเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์จากจำนวนน้อยไปหามากดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีการปรับเปลี่ยนจาก 16 ไซเคิล ไปจนถึง 1 ไซเคิล กระแสไหลผ่านโหลดจะมีปริมาณมากที่สุดเมื่อปรับแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่มีจำนวนไซเคิลสูงสุดเท่ากับ 16 ไซเคิล และปริมาณกระแสที่ไหลผ่านโหลดจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อปรับแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่มีจำนวนไซเคิลลดลง ดังนั้นเมื่อนำมาเขียนกราฟกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะปรับจำนวนไซเคิลเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ไปจะได้ดังรูปที่ 2.19 โดยจะเห็นได้ว่าที่จำนวนไซเคิลสูงสุดเท่ากับ 16 ไซเคิล กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์จะมีค่ามากที่สุดและจะลดลงเรื่อยๆเมื่อทำการปรับจำนวนไซเคิลลดลง การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนี้จะมีข้อด้อยคือ ระดับกำลังไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนค่าไปจะมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง แต่จะเป็นไปทีละ step ซึ่งมีทั้งหมดรวม 16 step ดังแสดงในรูปที่ 2.18 นอกจากนั้นในกรณีที่มีการปรับลดกำลังไฟฟ้าลงไปถึงระดับต่ำๆ จะมีผลทำให้กระแสที่จ่ายโหลดของอินเวอร์เตอร์ จะมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ที่ไม่คงที่ แต่ระดับ peak ของคลื่นไซน์จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่



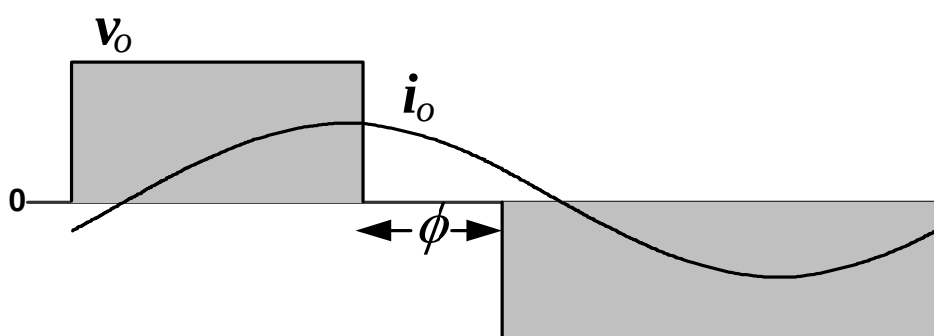
รูปที่ 2.19 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวนไซเคิลต่างๆ

2.5.3 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ Asymmetrical Voltage Controlled

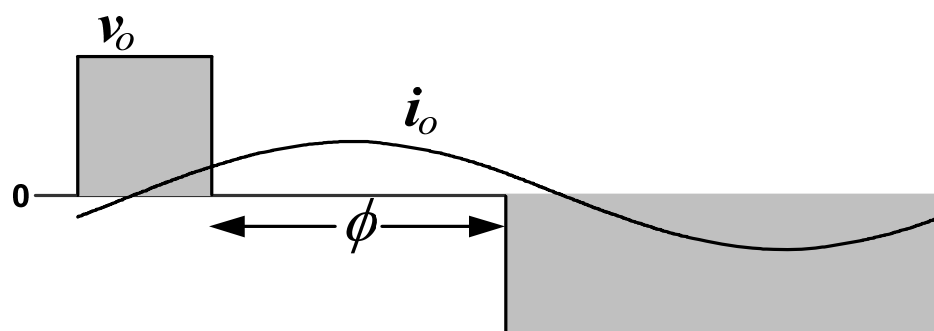
รูปแบบลักษณะคลื่นแรงดันแบบไม่สมมาตรทางด้านเอาต์พุตของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมความถี่สูง เพื่อใช้สำหรับการควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยจะใช้หลักการควบคุมแรงดันแบบไม่สมมาตรที่มีการสวิตช์สถานะแรงดันเท่ากับศูนย์



a) การเงื่อนไขแรงดันแบบไม่สมมาตรที่มุม $\phi = 0^\circ$

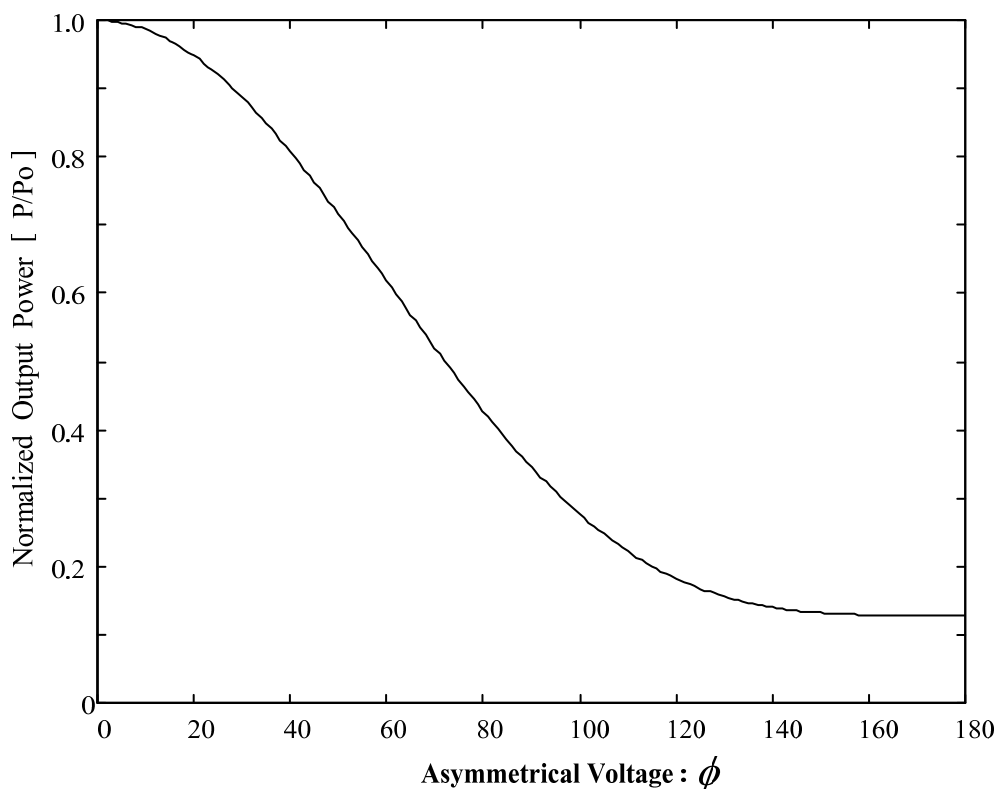


b) การเงื่อนไขแรงดันแบบไม่สมมาตรที่มุม $\phi = 60^\circ$



c) การเงื่อนไขแรงดันแบบไม่สมมาตรที่มุม $\phi = 120^\circ$

รูปที่ 2.20 คลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กรณีที่มีการเงื่อนไขแรงดันแบบไม่สมมาตรที่มุม ϕ ต่างๆ

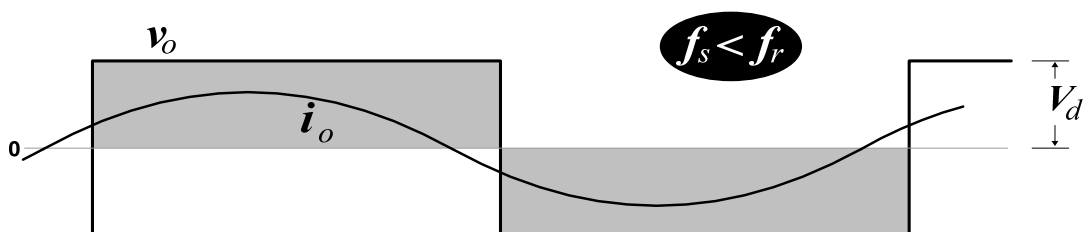


รูปที่ 2.21 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเหนี่ยวนำแรงดันแบบไม่สมมาตร ที่มุม ϕ ต่างๆ

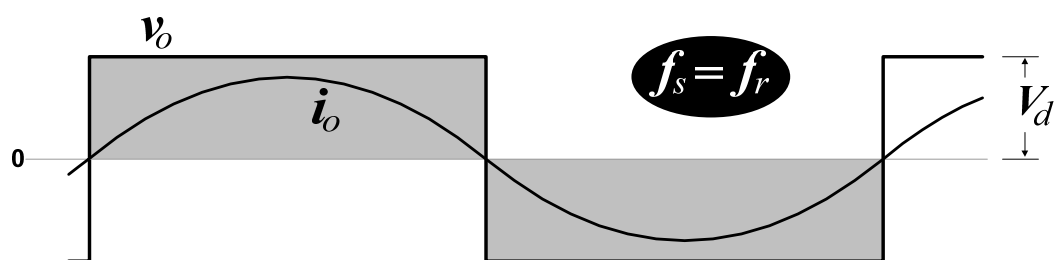
จากรูปที่ 2.21 จะพบว่าเมื่อทำการเหนี่ยวนำแรงดันมากขึ้นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะลดลงเรื่อยๆ การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการ Asymmetrical Voltage นี้มีข้อด้อยคือ เมื่อทำการเหนี่ยวนำแรงดันมากขึ้น จะมีผลทำให้กระแสจ่ายโหลดทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ผิดเพี้ยนไปจากคลื่นไซน์มากขึ้น ซึ่งข้อด้อยนี้สามารถปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้นได้โดยการเลือกค่า Q ของวงจรเรโซแนนซ์ให้มีค่าสูงขึ้น อีกทั้งกรณีที่มีการเหนี่ยวนำแรงดันนี้จะต้องทำการสร้างสัญญาณเพื่อทำการเหนี่ยวนำแรงดันเพิ่มเติม ทำให้วงจรควบคุมมีความซับซ้อนมากขึ้นถ้านำมาใช้แล้วจะทำให้โครงสร้างของวงจรควบคุมมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมากขึ้น

2.5.4 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ Pulse Frequency Modulation

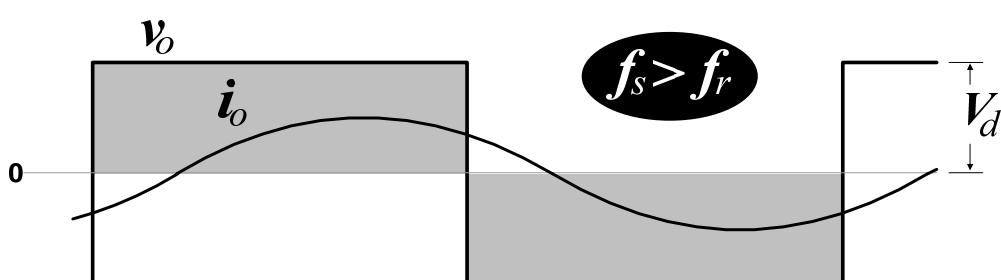
การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าในกรณีนี้ สามารถทำได้โดยปรับความถี่สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยจะได้ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสที่โหลดดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความถี่สวิตช์น้อยกว่าหรือมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ดังรูปที่ 2.22(a) และรูปที่ 2.22(c) จะได้ปริมาณกระแสที่ลดลง ส่วนที่ความถี่สวิตช์เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.22(b) จะได้กระแสที่มีปริมาณสูงสุดดังนั้นเมื่อนำมาเขียนเป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กับค่าความถี่สวิตช์ที่เปลี่ยนแปลงจะได้ดังรูปที่ 2.23 ซึ่งจะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าสูงสุดที่ความถี่สวิตช์เท่ากับความถี่



a) ความถี่สวิตช์มากกว่าความถี่เรโซแนนท์

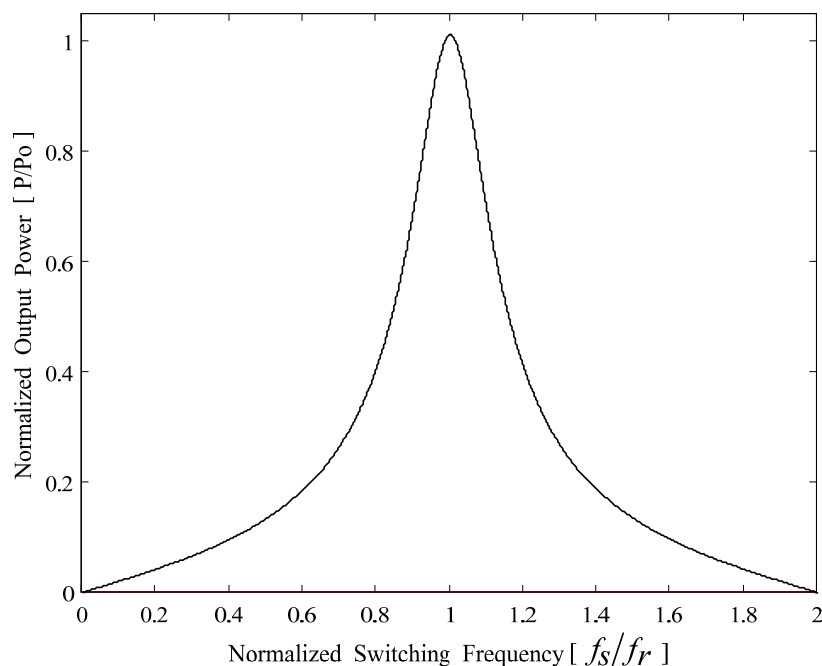


b) ความถี่สวิตช์เท่ากับความถี่เรโซแนนท์



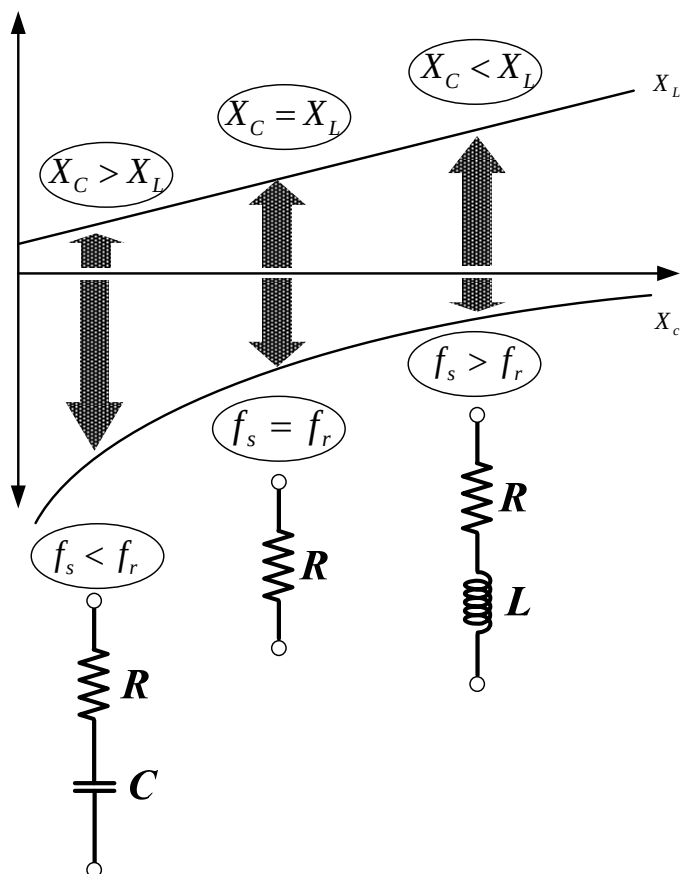
c) ความถี่สวิตช์มากกว่าความถี่เรโซแนนท์

รูปที่ 2.22 คลื่นแรงดันและกระแสทางด้ายเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์กรณีกวควบคุมกำลังไฟฟ้า
ด้วยวิธีการ Pulse Frequency Modulation



รูปที่ 2.23 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ค่าความถี่สวิตช์ต่างๆ

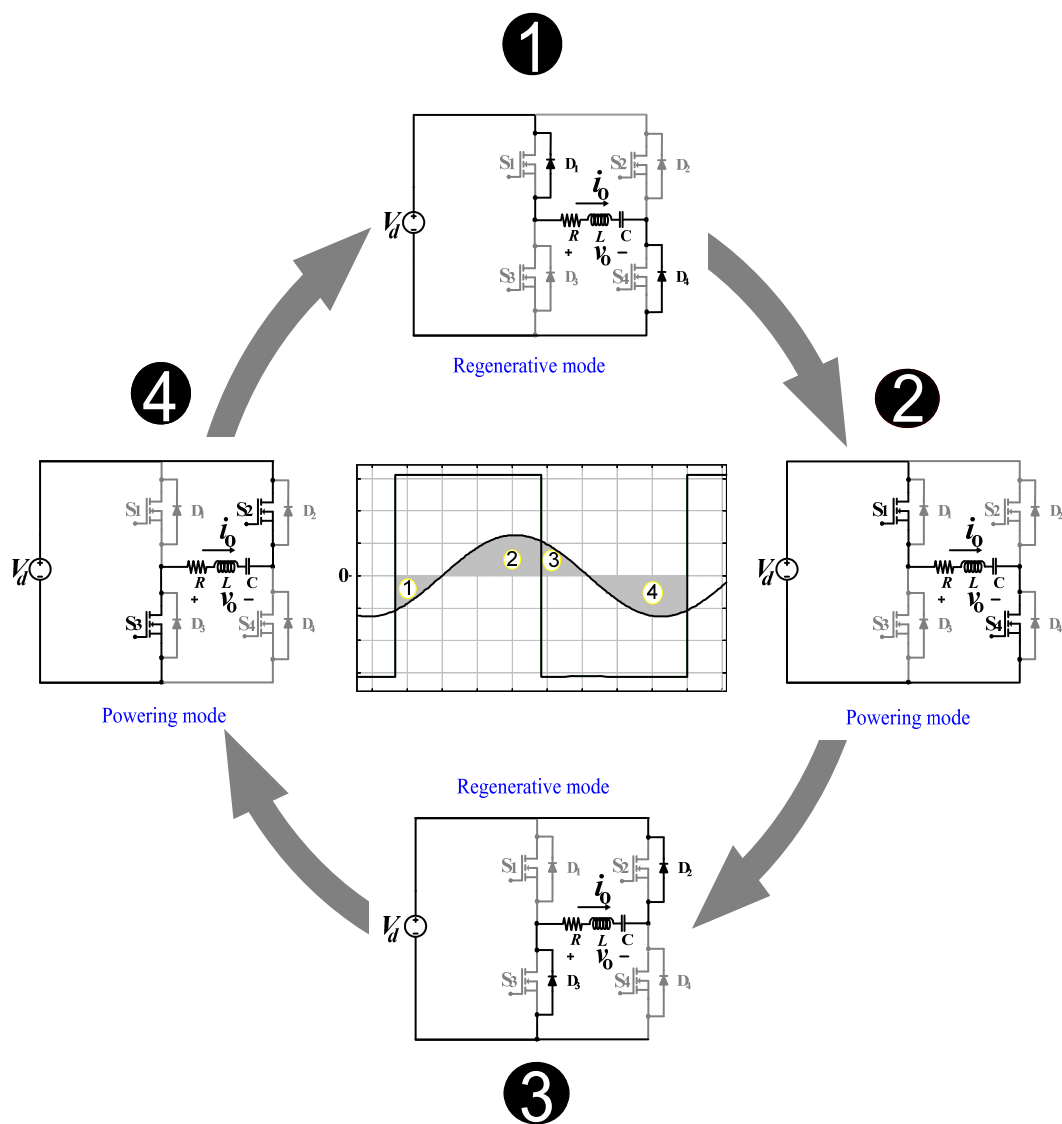
เมื่อทำการปรับความถี่สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ส่งผลทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำสมมูล (X_L) ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ (X_C) และค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z) เปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 2.24 เมื่อความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลง โดยที่ความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์เท่ากับความถี่เรโซแนนท์ของโหลด ($f_s = f_r$) ทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ (X_L) เท่ากับค่ารีแอคแตนซ์ (X_C) ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z) มีค่าเท่ากับค่าความต้านทานสมมูล (R) ซึ่งจะได้ลักษณะคลื่นกระแสโหลดที่เป็นไซน์ที่มีขนาดสูงที่สุดพร้อมทั้งมีมุมเฟสที่ตรงกับคลื่นแรงดัน ดังในรูปที่ 2.22(b) ส่งผลค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์มีค่าสูงสุด ส่วนที่ความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์น้อยกว่าความถี่เรโซแนนท์ของโหลด ($f_s < f_r$) ทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ (X_C) จะมีค่ามากกว่าค่ารีแอคแตนซ์ (X_L) ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z) เท่ากับ (R) รวมกับค่ารีแอคแตนซ์ที่ได้จากค่า $X_C - X_L$ ซึ่งจะได้ลักษณะคลื่นกระแสโหลดที่เพี้ยนไปจากคลื่นไซน์พร้อมทั้งมีขนาดที่ลดลง และมีมุมเฟสหน้าคลื่นแรงดัน ดังในรูปที่ 2.22(a) ส่งผลค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี $f_s = f_r$ และความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์มากกว่าความถี่เรโซแนนท์ของโหลด ($f_s > f_r$) ทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ X_L มากกว่าค่ารีแอคแตนซ์ X_C ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z) เท่ากับ R รวมกับค่ารีแอคแตนซ์ที่ได้จากค่า $X_L - X_C$ ซึ่งจะได้ลักษณะคลื่นกระแสโหลดที่เพี้ยนไปจากคลื่นไซน์พร้อมทั้งมีขนาดที่ลดลงและมีมุมเฟสล่าหลังคลื่นแรงดัน ดังในรูปที่ 2.22(c) ส่งผลค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี $f_s = f_r$ สำหรับการควบคุมกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ จะเลือกใช้วิธีการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย วงจรไม่ซับซ้อนจนเกินไป



รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำสมมูล (X_L) , ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุรีโชนันท์ (X_C) และ ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z) ของโหลดรีโชนันท์ เมื่อความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลง

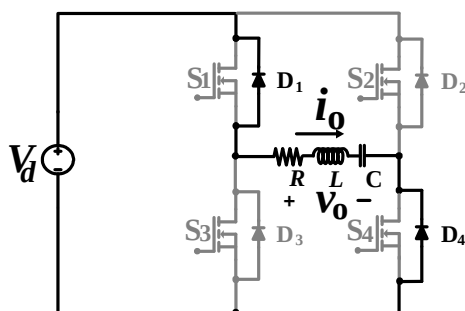
2.6 โหมดการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์รีโชนันท์แบบอนุกรม

จากรูปที่ 2.25 จะเห็นได้ว่าวงจรจะประกอบไปด้วยสวิตช์ทั้งหมด 4 ตัว นั่นคือ สวิตช์ S_1 , S_2 , S_3 และ S_4 โดยจะมีลักษณะการทำงานดังนี้คือ คู่สวิตช์ S_1 , S_4 และ S_2 , S_3 จะทำงาน ON-OFF สลับกันไปเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ซึ่งในทางปฏิบัติจะสามารถทำได้ในย่านที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์ ทั้งนี้เพื่อให้อุปกรณ์สวิตช์ทำงานในสภาวะ Zero Voltage Switching (ZVS) ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดในย่านความถี่สวิตช์ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์ ของวงจรเท่านั้น โดยโหมดการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์รีโชนันท์แบบอนุกรม สามารถแบ่งออกเป็น 4 โหมดการทำงานได้ดังนี้

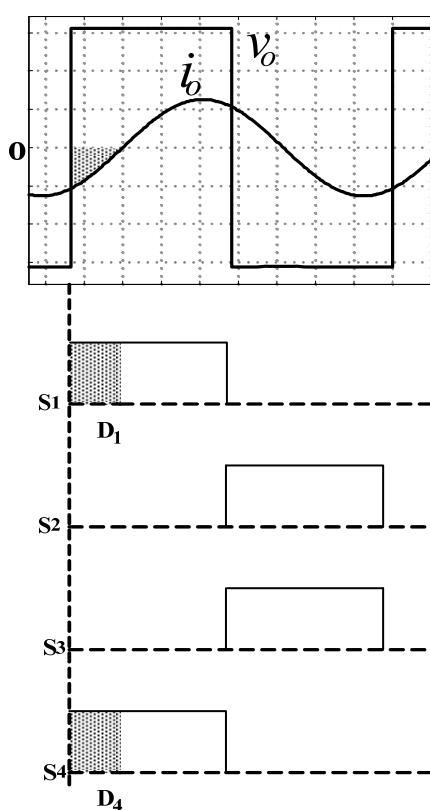


รูปที่ 2.25 โหมดการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

2.6.1 หลักการทำงานของโหมด 1 Regenerative mode



รูปที่ 2.26 Mode 1 Regenerative mode



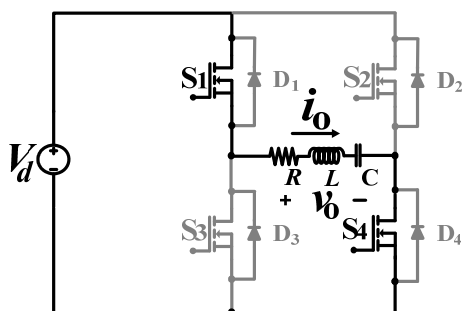
รูปที่ 2.27 คลื่นแรงดันและกระแสทางเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ และคลื่นสัญญาณ

การทำงานของสวิตช์ใน Mode 1 Regenerative mode

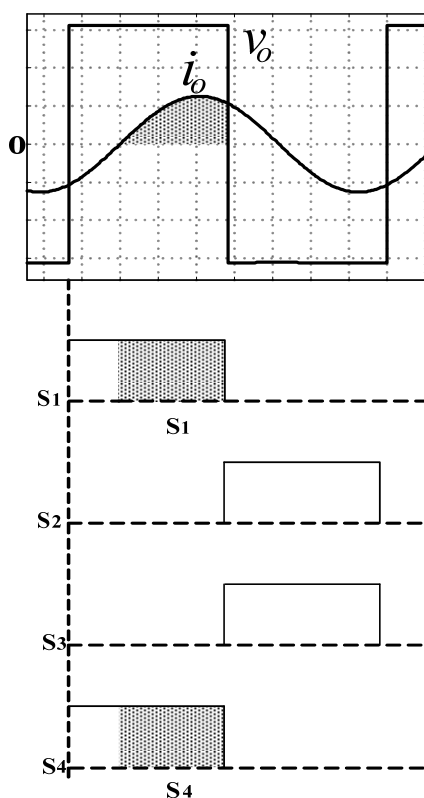
หลักการทำงานของโหมดที่ 1 ซึ่งจะเรียกต่อไปว่า Regenerative mode จากรูปที่ 2.26 ขณะที่สวิตช์ S_2 และ S_3 OFF กระแส (i_o) ยังคงไหลทิศทางเดิมที่มีค่าเป็นลบโดยจะผ่าน D_4 และ D_1 ไปยังแหล่งจ่ายไฟตรง ถึงแม้ว่าจะมีสัญญาณรอกอยู่ที่ขาเกตของสวิตช์ S_1 และ S_4 อยู่ก็ตาม ดังรูปที่ 2.27 แต่สวิตช์ S_1 และ S_4 ยังไม่สามารถ ON ได้เนื่องจาก D_4 และ D_1 ON ทำให้ สวิตช์ S_1 และ S_4 เป็น Reverse bias D_4 และ D_1 จะต่อเชื่อมโหลดกับแหล่งจ่ายไฟตรง ส่งผลทำให้แรงดันตกคร่อมโหลดมีค่าเป็นบวก

ในโหมดนี้โหลดจะทำการจ่ายพลังงานคืนให้กับแหล่งจ่ายเนื่องจากกระแส (i_o) มีค่าเป็นลบและแรงดันตกคร่อมโหลด (v_o) มีค่าเป็นบวกซึ่งจะมีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่ายไฟตรงทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้น จึงเรียกโหมดการทำงานนี้ว่า **Regenerative mode**

2.6.2 หลักการทำงานของโหมด 2 Powering mode



รูปที่ 2.28 Mode 2 Powering mode



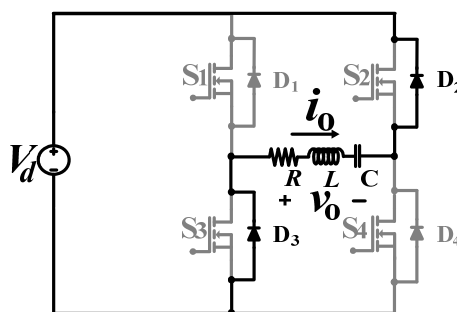
รูปที่ 2.29 คลื่นแรงดันและกระแสทางเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ และคลื่นสัญญาณ

การทำงานของสวิตช์ใน Mode 2 Powering mode

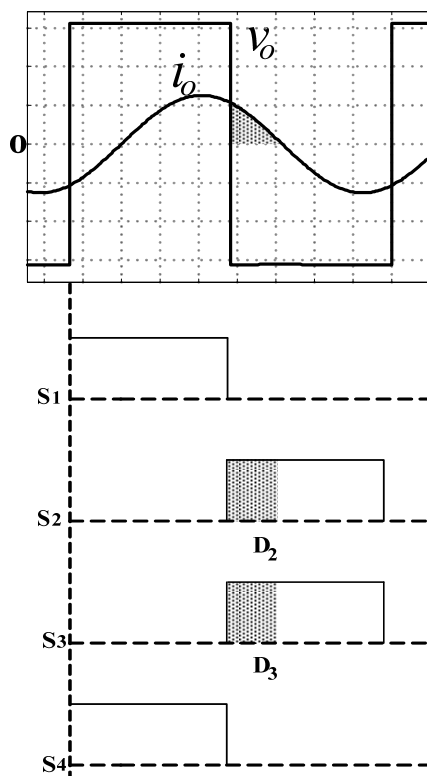
หลักการทำงานของโหมดที่ 2 ซึ่งจะเรียกต่อไปว่า Powering mode จากรูปที่ 2.28 ขณะที่สวิตช์ S_1 และ S_4 ON ในขณะที่สวิตช์ S_2 และ S_3 OFF ทิศทางกระแส (i_o) จะไหลจากแหล่งจ่ายไฟตรงทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ($+V_d$) ผ่านสวิตช์ S_1 และ S_4 ไปยังโหลดกลับสู่แหล่งจ่ายไฟตรงทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ($-V_d$)

ในโหมดนี้แหล่งจ่ายจะจ่ายพลังงานให้กับโหลดเนื่องจากกระแส (i_o) มีค่าเป็นบวกและแรงดันตกคร่อมโหลด (v_o) มีค่าเป็นบวกซึ่งจะมีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่ายไฟตรงทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจึงเรียกโหมดการทำงานนี้ว่า **Powering mode**

2.6.3 หลักการทำงานของโหมด 3 Regenerative mode



รูปที่ 2.30 Mode 3 Regenerative mode



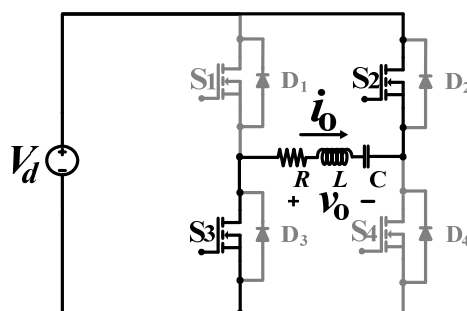
รูปที่ 2.31 คลื่นแรงดันและกระแสทางเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ และคลื่นสัญญาณ

การทำงานของสวิตช์ใน Mode 3 Regenerative mode

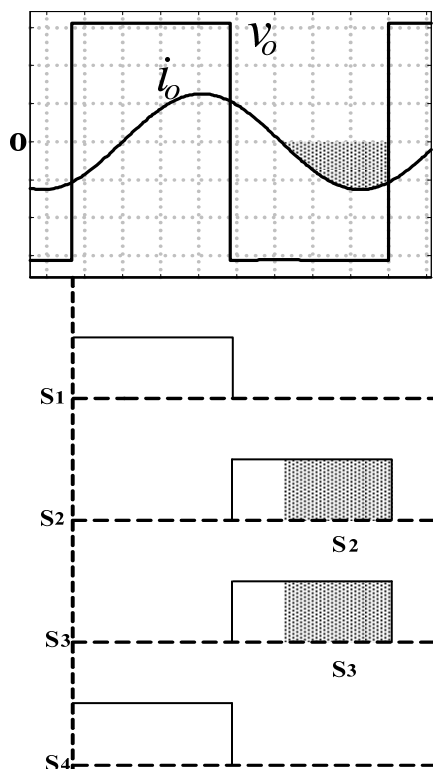
หลักการทำงานของโหมดที่ 3 ซึ่งจะเรียกต่อไปว่า Regenerative mode จากรูปที่ 2.30 ขณะที่สวิตช์ S_1 และ S_4 OFF กระแส (i_o) ยังคงไหลทิศทางเดิมที่มีค่าเป็นบวกโดยจะผ่าน D_3 และ D_2 ไปยังแหล่งจ่ายไฟตรงทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ถึงแม้ว่าจะมีสัญญาณรบกวนอยู่ที่ขาเกิดของ

ในโหมดนี้โหลดจะจ่ายพลังงานคืนให้กับแหล่งจ่ายเนื่องจากกระแส (i_o) มีค่าเป็นบวกและแรงดันตกคร่อมโหลด (v_o) มีค่าเป็นลบซึ่งจะมีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่ายไฟตรงทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจึงเรียกโหมดการทำงานนี้ว่า **Regenerative mode**

2.6.4 หลักการทำงานของโหมด 4 Powering mode



รูปที่ 2.32 Mode 4 Powering mode



รูปที่ 2.33 คลื่นแรงดันและกระแสทางเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ และคลื่นสัญญาณการทำงานของสวิตช์ใน Mode 4 Powering mode

หลักการทำงานของโหมดที่ 4 ซึ่งจะเรียกต่อไปว่า Powering mode จากรูปที่ 2.32 ขณะที่ สวิตช์ S_3 และ S_2 ON ในขณะที่สวิตช์ S_1 และ S_4 OFF ทิศทางกระแส (i_o) จะไหลจากแหล่งจ่ายไฟ ตรงหน้าทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ($-V_d$) ผ่านสวิตช์ S_3 และ S_2 ไปยังโหลดกลับสู่ แหล่งจ่ายไฟตรงหน้าทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ($+V_d$) ในโหมดนี้แหล่งจ่ายจะจ่ายพลังงาน ให้กับโหลดเนื่องจากกระแส(i_o) มีค่าเป็นลบและแรงดันตกคร่อมโหลดมีค่าเป็นลบจะมีค่าเท่ากับ แรงดันแหล่งจ่ายไฟตรงหน้าอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจึงเรียกโหมดการทำงาน

ในโหมดนี้แหล่งจ่ายจะจ่ายพลังงานให้กับโหลดเนื่องจากกระแส(i_o)มีค่าเป็นลบและ แรงดันตกคร่อมโหลด(v_o)มีค่าเป็นลบจะมีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่ายไฟตรงหน้าทางด้านอินพุตของ อินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจึงเรียกโหมดการทำงานนี้ว่า **Powering mode**

2.7 สรุป

จากหลักการพื้นฐานการทำให้เกิดความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงเพื่อใช้ในการ ให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นสามารถทำการสรุปเป็นหัวข้อต่างๆได้ดังนี้

1. ในการทำให้เกิดความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำนั้นจะเป็นการให้ความร้อนกับชิ้นงานใน บริเวณสั้นๆ ดังนั้นจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนที่พันรอบชิ้นงานจึงมีจำนวนรอบ น้อย แรงดันต่ำ กระแสสูง และความถี่สูง ซึ่งความถี่สูงนั้นจะได้มาจากวงจรอินเวอร์เตอร์ แล้วนำมา ผ่านหม้อแปลง Step-down เพื่อแปลงแรงดันให้ต่ำลง ในขณะเดียวกันก็จะเพิ่มปริมาณกระแสที่ไหล ในขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนให้มีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นงานเกิดความร้อนในช่วงระยะเวลาสั้นๆได้

2. ในชุดทดสอบอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงจะมีหลักการทำงานโดย การแปลงกำลังงานไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำไปเป็นกำลังงานไฟฟ้าความถี่สูงโดยมีโครงสร้างของระบบดังนี้

- 1) ภาคแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz และวงจร LC ฟิลเตอร์
- 2) ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
- 3) ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง
- 4) ภาคหม้อแปลงความถี่สูง ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนและชิ้นงาน

3. วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง(Induction Heating) จะเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ เนื่องจากสามารถรับแรงดันและกระแสที่มีปริมาณมากได้ ทำให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์ จึงเหมาะสมในการนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วย การเหนี่ยวนำความถี่สูงประเภท Induction Heating

4. การควบคุมกำลังไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย วงจรไม่ซับซ้อน ต่างจากวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับมุม Phase-Shift ซึ่งขณะทำการปรับมุม Phase-Shift จะต้องทำการปรับเปลี่ยนความถี่ของสวิทช์ไปพร้อมกับการปรับมุม Phase-Shift เพื่อรักษาการทำงานของสวิทช์ให้อยู่ในสภาวะ Zero Voltage Switching (ZVS) ส่วนการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี Pulse Density Modulation และ Asymmetrical Voltage เนื่องจากวงจรควบคุมมีความซับซ้อนมากกว่าวิธีการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบอื่น ถ้านำมาใช้แล้วจะทำให้โครงสร้างของอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) มีขนาดใหญ่ขึ้น

5. โหมดการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์เรโซแนนท์แบบอนุกรมสามารถแบ่งออกเป็น 4 โหมดการทำงาน คือ โหมด 1 Regenerative mode ในโหมดนี้โหลดจะจ่ายพลังงานคืนให้กับแหล่งจ่าย โหมด 2 Powering mode ในโหมดนี้แหล่งจ่ายจะจ่ายพลังงานให้กับโหลด ส่วนในโหมด 3 Regenerative mode โหมดนี้โหลดจะจ่ายพลังงานคืนให้กับแหล่งจ่ายเช่นเดียวกันกับโหมด 1 และ โหมด 4 Powering mode โหมดนี้แหล่งจ่ายจะจ่ายพลังงานให้กับโหลดเช่นเดียวกันกับโหมด 2