

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทบทวนวรรณกรรม

หลักการของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำคือทำให้กระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลผ่านขดลวดก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กความถี่สูงตัดผ่านชิ้นงานและเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานนั้น [1] ซึ่งการถ่ายเทพลังงานจากขดลวดมายังชิ้นงานจะเกิดขึ้นกับชิ้นงานที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเท่านั้นโดยที่ขดลวดและชิ้นงานไม่ต้องสัมผัสกัน ทำให้ปลอดภัยในการใช้งาน เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง เช่น การเผาโลหะ การชุบแข็งโลหะ การเชื่อมโลหะ การหลอมโลหะ [2] หรือใช้เป็นเตาหุงต้ม

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีองค์ประกอบหลักอยู่ 3 อย่าง คือ

- 1) วงจรเรียงกระแส ซึ่งจะแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง
- 2) วงจรอินเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง
- 3) โวลต์รีโซแนนซ์ ประกอบไปด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ โวลต์รีโซแนนซ์ทำให้ความสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์มีค่าลดลง ด้วยการทำให้แรงดันหรือกระแสไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ขณะเกิดการสวิตช์ [3]

ในระหว่างกระบวนการทำความร้อนของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปก็จะทำให้ค่าของโวลต์เปลี่ยนไปด้วย [4] ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการที่ใช้ควบคุมอินเวอร์เตอร์เพื่อให้เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ [5]

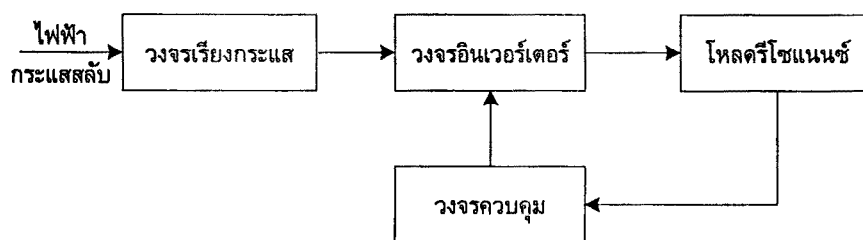
1) แบบปรับความถี่ วิธีนี้ใช้การปรับความถี่สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อความถี่สวิตช์น้อยกว่าหรือมากกว่าความถี่รีโซแนนซ์ จะได้ปริมาณกระแสที่น้อย แต่เมื่อความถี่สวิตช์เท่ากับความถี่รีโซแนนซ์ จะได้กระแสที่มีปริมาณสูงสุด ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดเมื่อความถี่สวิตช์เท่ากับความถี่รีโซแนนซ์และกำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่สวิตช์น้อยกว่าหรือมากกว่าความถี่รีโซแนนซ์

2) แบบปรับการเลื่อนเฟส วิธีนี้ใช้การปรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ด้วยการเลื่อนเฟสของสัญญาณด้านหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ให้ซ้อนทับเป็นบางส่วนกับสัญญาณอีกด้านหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ โดยที่ความถี่สวิตช์จะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเพื่อให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์เสมอ เมื่อการเลื่อนเฟสเป็นศูนย์องศา จะได้ปริมาณกระแสสูงสุด เมื่อการเลื่อนเฟสเพิ่มมากขึ้น กระแสก็จะลดลง

3) แบบ Pulse Density Modulation วิธีนี้ใช้การปรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ด้วยการลดจำนวนลูกคลื่นของคลื่นสี่เหลี่ยมของเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์จากจำนวนมากไปหาน้อย เช่น จาก 16 ลูกคลื่น ไปจนถึง 1 ลูกคลื่น กระแสที่ไหลผ่านโหลดจะมีปริมาณมากที่สุดเมื่อปรับแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ให้มี 16 ลูกคลื่น และกระแสที่ไหลผ่านโหลดจะมีปริมาณลดลงเมื่อแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีจำนวนลูกคลื่นลดลง

โดยทั่วไปอุปกรณ์ที่ใช้ในควบคุมอินเวอร์เตอร์ คือ ไอซีเฟสล็อกกลู๊ป ซึ่งจะทำหน้าที่ติดตามความถี่ของโวลต์รีโซแนนซ์ที่เปลี่ยนไป และมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่จะปรับให้ความถี่สวิตช์มีค่าเท่ากับความถี่ของโวลต์รีโซแนนซ์ [4] ปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาเพื่อนำตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมาใช้อุปกรณ์เพื่อความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น [6]

2.2 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่จะทำการศึกษาและพัฒนาเบื้องต้นประกอบด้วย 4 อย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คือ

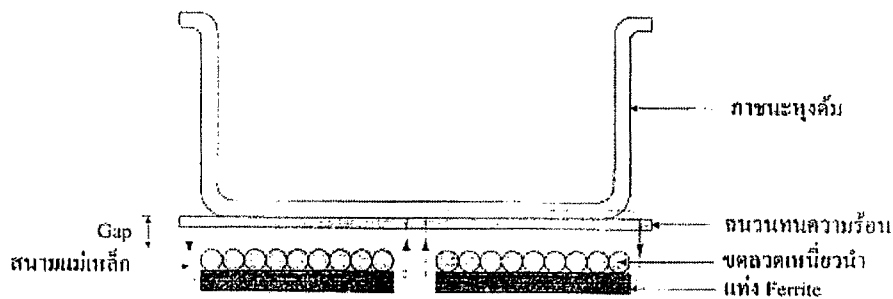
- 1) วงจรเรียงกระแส ซึ่งจะแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง
- 2) วงจรอินเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง
- 3) โหลดรีโซแนนซ์ ประกอบไปด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ โหลดรีโซแนนซ์ทำให้ความสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์มีค่าลดลง ด้วยการทำให้แรงดันหรือกระแสไฟฟ้ามามีค่าเป็นศูนย์ขณะเกิดการสวิตช์

- 4) วงจรควบคุม ซึ่งจะใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นส่วนประกอบหลัก โดยที่วงจรควบคุมจะรับสัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามาจากโหลดรีโซแนนซ์เพื่อทำการวิเคราะห์และประมวลผล แล้วส่งสัญญาณควบคุมไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะผลิตสัญญาณที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของโหลดรีโซแนนซ์เพื่อให้เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

งานวิจัยนี้จะเริ่มต้นจากการศึกษาวงจรอินเวอร์เตอร์และโหลดรีโซแนนซ์แบบต่างๆ และวิธีควบคุม แล้วทำการจำลองในโปรแกรม PSPICE เพื่อเลือกวงจรที่เหมาะสม จากนั้นนำสัญญาณที่ได้จากการจำลองไปทดลองกับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล แล้วสร้างวงจรเรียงกระแส วงจรอินเวอร์เตอร์ และโหลดรีโซแนนซ์เพื่อทดสอบกับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลอีกครั้งหนึ่ง

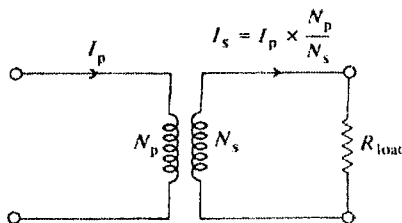
2.3 หลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (Induction Heating) เป็นปรากฏการณ์ทั้งทางไฟฟ้าและทางความร้อนรวมกัน โดยมีสาเหตุจากการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) ปรากฏการณ์ผิว (Skin Effect) และการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) [7] หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ จากรูปที่ 2.2 เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงผ่านเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำที่อยู่ใต้ภาชนะหุงต้ม ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Magnetic Flux) กับภาชนะหุงต้ม ถ้าภาชนะเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นสาร Ferro-Magnetic สนามแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องคล้องกับภาชนะจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ในภาชนะหุงต้มเป็นเส้นทางปิด ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ซึ่งกระแสส่วนมากจะไหลผ่านภาชนะในบริเวณความลึกระดับผิว (Skin Depth) ของภาชนะ เป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นที่ก้นของภาชนะหุงต้ม และจะถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำที่อยู่ภายในภาชนะ ทำให้น้ำเดือดในที่สุด [5] ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่เหนี่ยวนำ และความต้านทานสมมูลของภาชนะที่กระแสไหลผ่าน [7]



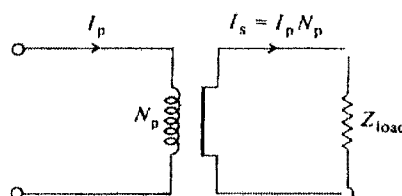
รูปที่ 2.2 หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำของเตาหุงต้ม [5]

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้ ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ภาชนะโดยตรง โดยอาศัยกระแสไหลวนในภาชนะหุงต้ม ทำให้หุงต้มได้ในเวลาอันรวดเร็ว [5] โดยจะมีหลักการพิจารณาเหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งกระแสทุติยภูมิจะขึ้นอยู่กับกระแสต้านปฐมภูมิคูณกับอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป [7]

ถ้าพิจารณาการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับขดลวดตรงกันหอยที่มีชิ้นงานโลหะอยู่เหนือขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้น และถ้าเปรียบทั้งระบบเป็นเสมือนหม้อแปลง จะได้ว่าขดลวดเหนี่ยวนำจะเป็นเสมือนขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง ที่มีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ และชิ้นงานโลหะเปรียบเสมือนขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีจำนวนรอบเป็นหนึ่งรอบ [7] สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงานโลหะ [7]

โดยที่ I_p คือ กระแสที่ป้อนเข้าในขดลวดเหนี่ยวนำ
 I_s คือ กระแสที่ไหลผ่านชิ้นงานโลหะ
 N_p คือ จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ
 Z_{load} คือ ความต้านทานสมมูลของชิ้นงาน

พิจารณารูปที่ 2.4 ถ้า I_p เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า I_s ไหลวนอยู่ในชิ้นงาน จากกฎความสัมพันธ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า จะทำให้กระแสทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$I_s = N_p I_p \quad (2.1)$$

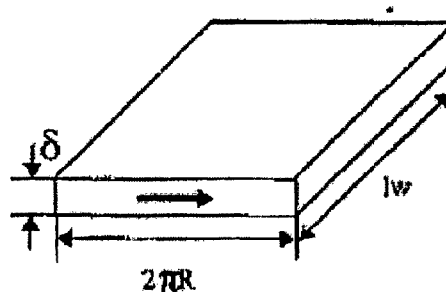
กำลังสูญเสียเป็นความร้อนในชิ้นงานจะมีค่าเท่ากับ

$$P_w = I_s^2 R_w \quad (2.2)$$

แทนค่า (2.1) ลงใน (2.2) จะได้

$$P_w = N_p^2 I_p^2 R_w \quad (2.3)$$

โดยที่ R_w คือ ความต้านทานสมมูลของชิ้นงาน



รูปที่ 2.5 แผ่นคัลล์ของชิ้นงาน [8]

ถ้าหากพิจารณาว่ากระแสส่วนมากไหลอยู่ในระดับความลึกผิว จะสามารถหาความต้านทานสมมูลของชิ้นงานได้โดยการพิจารณาคัลล์ชิ้นงานออก จะเป็นดังรูปที่ 2.5 ซึ่งระยะทางการไหลของกระแสมีค่าเท่ากับขนาดเส้นรอบวงของชิ้นงานที่มีความหนาเท่ากับ ความลึกผิว [7]

ความร้อนส่วนมากจะเกิดขึ้นโดยกระแสไหลวนในโหนดภาชนะหุ้มต้มที่บริเวณชั้นผิววนนอกของกันภาชนะหุ้มต้มที่มีความลึกผิวเท่ากับ δ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของภาชนะหุ้มต้มดังสมการ [8]

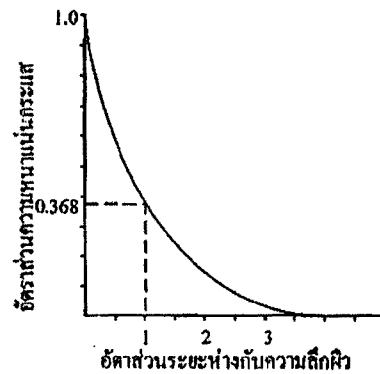
$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu f \pi}} \quad (2.4)$$

โดยที่ δ คือ ความลึกผิว (m)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของภาชนะ (Ωm)

f คือ ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อน (Hz)

μ คือ ค่าความซึมซาบต่อฟลักซ์แม่เหล็กของชิ้นงาน



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากภาชนะหุงต้ม [8]

เนื่องจากปรากฏการณ์ผิว จึงทำให้ความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิวเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลที่ความถี่ระดับผิว ความหนาแน่นของกระแสจะมีค่าเพียง 0.368 เท่าของความหนาแน่นกระแสที่ผิวชั้นงาน จึงประมาณว่ากระแสน้ำมากจะไหลอยู่ในความถี่ระดับผิวนี้ [7]

2.4 วงจรรีโซแนนซ์ [9]

วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ (Resonant) หมายถึง วงจรที่มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของวงจรเท่ากับหนึ่ง นั่นคือกระแสที่ไหลในวงจรจะมีเฟสตรงกันกับแรงดันที่จ่ายให้แก่วงจร และค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจะเหลือแต่ความต้านทานเพียงอย่างเดียวเท่านั้น เพราะค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ (Inductive Reactance) และค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ (Capacitive Reactance) จะหักล้างกันหมดไป ในขั้นพื้นฐานจะสามารถแยกพิจารณาออกเป็น 2 ลักษณะคือวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม และวงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน

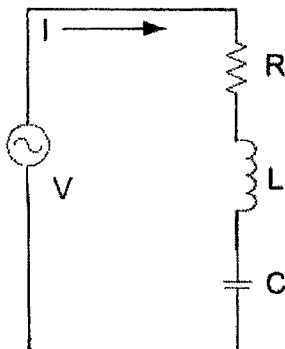
2.4.1 วงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม

ลักษณะพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรมจะมีอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งรีโซแนนซ์ต่ำที่สุด ดังนั้นจะทำให้กระแสไหลผ่านวงจรได้มากที่สุด จึงทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าที่ไหลสูงสุด วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าทำได้โดยการลดหรือเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้วงจร หรือเลื่อนความถี่การใช้งานให้ต่ำหรือสูงกว่าตำแหน่งรีโซแนนซ์ เมื่อพิจารณาในรูปที่ 2.7 ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RLC ที่ต่อแบบอนุกรมจะมีค่าเท่ากับ

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (2.5)$$

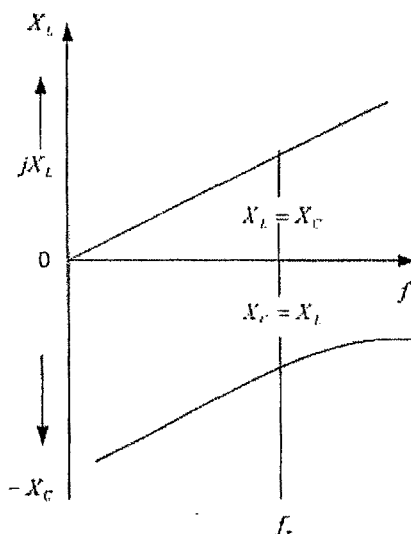
จะสามารถหาค่าความถี่สภาวะรีโซแนนซ์ f_r ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} X_L &= X_C \\ 2\pi f_r L &= \frac{1}{2\pi f_r C} \\ f_r &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \end{aligned} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.7 วงจร RLC แบบอนุกรม [9]

จากสมการ (2.5) จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์จะขึ้นอยู่กับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ เนื่องจากค่า $X_L = 2\pi fL$ และค่า $X_C = 1/2\pi fC$ จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าเมื่อความถี่ของแหล่งจ่ายไฟมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นค่า X_L จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนของค่า X_C จะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นด้วยโดยที่ผลรวมของค่ารีแอคแตนซ์มีค่าเท่ากับ $(X_L - X_C)$ ดังนั้นถ้าหากความถี่ของแหล่งจ่ายไฟมีค่าเท่ากับ ความถี่รีโซแนนซ์ดังสมการ (2.6) ก็จะมีผลทำให้ค่ารีแอคแตนซ์รวมมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นอิมพีแดนซ์รวมของวงจรจึงมีค่าเท่ากับความต้านทาน ($Z = R$)

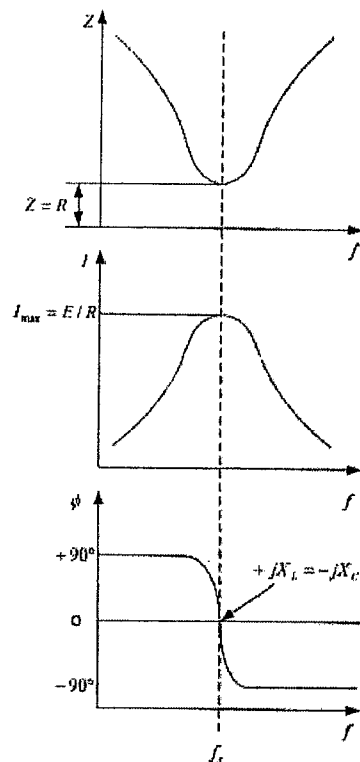


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของ X_L และ X_C ต่อความถี่สำหรับวงจร RLC แบบอนุกรม [9]

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.7)$$

$$I = \frac{V}{Z} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.7) และสมการที่ (2.8) นำค่าอิมพีแดนซ์รวมและกระแสที่ไหลในวงจรที่ความถี่ใดๆ มาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าที่ความถี่รีโซแนนซ์จะได้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรเท่ากับค่าความต้านทานเนื่องจากผลรวมของค่ารีแอคแตนซ์มีค่าเท่ากับศูนย์ และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรสูงสุดในจุดนี้



รูปที่ 2.9 อิมพีแดนซ์รวม และกระแสที่ไหลในวงจร RLC แบบอนุกรม ที่ความถี่ต่างๆ [9]

ค่าของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ความถี่ใดๆ ดังแสดงสมการที่ (2.9) ที่ความถี่รีโซแนนซ์จะพบว่าแรงดัน V_L และ V_C จะกลับเฟสกันอยู่ 180 องศา และแรงดัน V_R จะมีค่ามากที่สุด (แรงดัน V_L และ V_C หักล้างกันมีค่าเป็นศูนย์) แสดงว่าที่สภาวะรีโซแนนซ์จะไม่มีพลังงานสะสม

$$V_R = IR; V_L = IX_L; V_C = IX_C \quad (2.9)$$

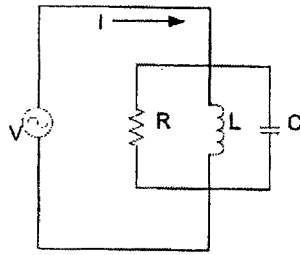
2.4.2 วงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน

พิจารณาในรูปที่ 2.10 จะพบว่า วงจรเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ได้ก็ต่อเมื่อคาปาซิทีฟซ์เซพแตนซ์ (Capacitive Susceptance) มีค่าเท่ากับอินดักทีฟซ์เซพแตนซ์ (Inductive Susceptance) หรือ $B_C = B_L$ ดังนั้นค่าแอดมิตแตนซ์ (Admittance) ของวงจรจะน้อยที่สุด หรือกล่าวได้ว่ามีแต่ค่าความนำเท่านั้น ดังแสดงในสมการที่ (2.11)

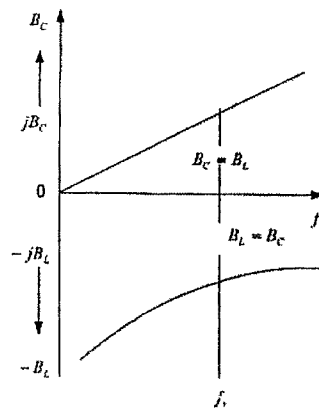
$$Y = G + j(B_C - B_L) \quad (2.10)$$

เมื่อ $B_C = B_L$ จะได้

$$Y = G = \frac{1}{R} \quad (2.11)$$

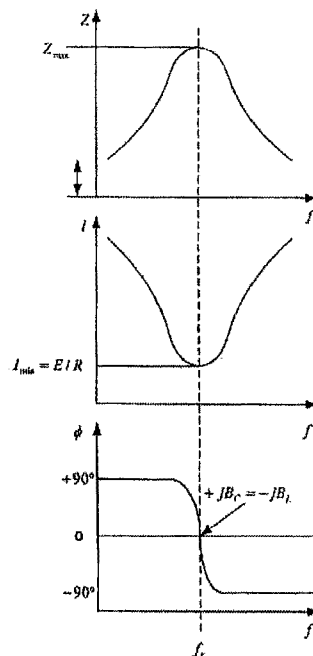


รูปที่ 2.10 วงจร RLC แบบขนาน [9]



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของ B_C และ B_L ต่อความถี่สำหรับวงจร RLC แบบขนาน [9]

เมื่อนำค่าอิมพีแดนซ์รวมและกระแสที่ไหลในวงจร RLC แบบขนานที่ความถี่ใดๆ มาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 อิมพีแดนซ์รวม และกระแสที่ไหลในวงจร RLC แบบขนาน ที่ความถี่ต่างๆ [9]

เมื่อเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ขึ้นในวงจร RLC แบบขนาน กระแสทั้งหมดที่ไหลในวงจรจะมีค่าเท่ากับ กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานเพียงอย่างเดียว ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจะหักล้างกันหมดไป ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะมีค่ามากกว่ากระแสที่ไหลในวงจรมากก็เท่าที่ยอมเป็นไปได้ แต่สุดท้ายค่ากระแสที่ไหลในวงจรจะเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรมและแบบขนาน

วงจรรีโซแนนซ์	ข้อดี	ข้อเสีย
แบบอนุกรม	- โครงสร้างง่ายและราคาถูก - สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเรกติฟายเออร์ โดยไม่ต้องปรับแรงดัน - กำลังไฟฟ้าที่จ่ายสามารถควบคุมได้ง่ายโดยการปรับความถี่ที่อินเวอร์เตอร์	- ขณะที่ป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์ จะเปิดวงจรโหลดไม่ได้ - ไม่สามารถทนการลัดวงจรที่โหลดได้ - ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับความถี่ สวิตช์ให้เลื่อนห่างออกจากความถี่รีโซแนนซ์ ทำให้กระแสไม่ค่อยเป็นไซน์ ซึ่งเป็นผลให้มีฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้น
แบบขนาน	- ขณะที่ป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์ สามารถเปิดวงจรโหลดได้ - สามารถทนการลัดวงจรที่โหลดได้ - อุปกรณ์ L และ C ที่ใช้ในวงจรรีโซแนนซ์ไม่จำเป็นต้องมีพิกัดแรงดันสูง เนื่องจากกระแสเป็นรูปสี่เหลี่ยม จึงมีค่า Peak คงที่ที่ต่ำแก่รีโซแนนซ์	- ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเรกติฟายเออร์ ต้องมีการปรับแรงดันจากการใช้สวิตช์ควบคุม - จำเป็นต้องมี Choke เนื่องจากเป็น Constant Current - มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมี Choke และวงจรควบคุมแรงดันดีซีอินพุตให้กับอินเวอร์เตอร์

โครงการวิจัยนี้เลือกใช้วงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม เนื่องจากโครงสร้างง่าย ราคาถูก และสามารถปรับควบคุมได้ง่าย

2.5 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของวงจร [9]

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่คิดจากหนึ่งคาบของวงจร RLC ที่ต่อกันแบบอนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่แปรผันตามเวลาแบบเส้นกราฟของไซน์ โดยที่กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ

$$P_{av} = I_{rms} V_{rms} \cos \phi \quad (2.12)$$

แทน $I_{rms} = \frac{V_{rms}}{Z}$ และ $\cos \phi = \frac{R}{Z}$ จะได้ว่า

$$P_{av} = \frac{V_{rms}}{Z} V_{rms} \frac{R}{Z} \quad (2.13)$$

$$P_{av} = \frac{V_{rms}^2}{Z^2} R \quad (2.14)$$

และเมื่อแทน

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (2.15)$$

จะได้ว่า

$$P_{av} = \frac{V_{rms}^2 R}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (2.16)$$

ปรับรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$P_{av} = \frac{V_{rms}^2 R}{R^2 + L^2 \left(\omega - \frac{1}{\omega LC}\right)^2} \quad (2.17)$$

คูณด้วย $\frac{\omega^2}{\omega^2}$ จะได้

$$P_{av} = \frac{V_{rms}^2 R \omega^2}{R^2 \omega^2 + L^2 \left(\omega^2 - \frac{1}{LC}\right)^2} \quad (2.18)$$

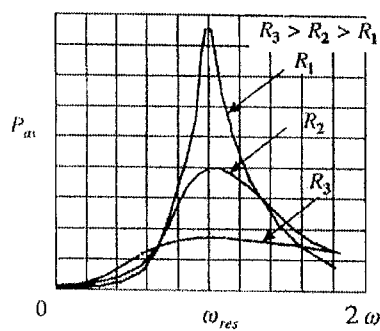
แทน $\frac{1}{LC} = \omega_{res}^2$ จะได้

$$P_{av} = \frac{V_{rms}^2 R \omega^2}{R^2 \omega^2 + L^2 (\omega^2 - \omega_{res}^2)^2} \quad (2.19)$$

ปรับรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$P_{av} = \frac{V_{rms}^2 R}{R^2 + L^2 \omega^2 \left(1 - \frac{\omega_{res}^2}{\omega^2}\right)^2} \quad (2.20)$$

ถ้าเขียนกราฟฟังก์ชันของ P_{av} เป็นฟังก์ชันของ ω จะได้เส้นกราฟตามที่แสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งให้เส้นกราฟที่ค่าความต้านทานต่างๆ กัน 3 ค่า คือ R_1 , R_2 และ R_3 และกำหนดให้ $R_3 > R_2 > R_1$



รูปที่ 2.13 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ค่า ω ต่างๆ กัน [9]

จะเห็นว่าที่ความถี่ที่ใกล้กับ 0 หรือในกรณีที่ $\frac{\omega_{res}^2}{\omega^2} \gg 1$ จะทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าสูง และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าต่ำ แต่เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มมากขึ้นจนทำให้ค่า $\frac{\omega_{res}^2}{\omega^2} \approx 1$ จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าค่อยๆ ลดต่ำลง จึงทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้น จนกระทั่งค่า $\frac{\omega_{res}^2}{\omega^2} = 1$ ซึ่งเป็นสถานะที่ระบบเกิดสภาพรีโซแนนซ์ อันเป็นผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบมีค่าต่ำสุดและองค์ประกอบของระบบจะเหลือเพียงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเพียงตัวเดียวเท่านั้น ผลที่ตามมาคือระบบเกิดกระแสไฟฟ้าไหลมากที่สุดและเกิดเป็นค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุดด้วย จากที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าที่สภาวะรีโซแนนซ์นั้น กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ

$$(P_{av})_{\max} = \frac{V_{rms}^2}{R} \quad (2.21)$$

และเมื่อ ω มีค่าเพิ่มมากขึ้นหรือค่า $\frac{\omega_{res}^2}{\omega^2}$ เริ่มมีค่าต่ำกว่า 1 ไปเรื่อยๆ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยจะมีค่าลดลง ข้อสังเกตอีกอย่างหนึ่งที่นอกเหนือจากค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของตัวต้านทานแล้ว ก็คือความสูงชันหรือความแหลมคมของเส้นกราฟก็จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานด้วยเช่นกัน หากค่าความต้านทานสูงเส้นกราฟก็จะมีค่าสูงชันหรือความแหลมคมน้อยกว่าค่าความต้านทานต่ำ

2.6 อินเวอร์เตอร์ [5]

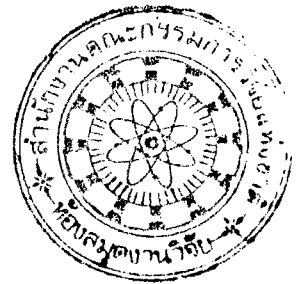
อินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงไฟกระแสตรงให้เป็นไฟกระแสสลับความถี่สูง จากที่กล่าวมาแล้วโหลตเตาหุงต้มเหนียวน่าเป็นวงจรโหลตรีโซแนนซ์แบบอนุกรมโดยมีวงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์และฮาล์ฟบริดจ์ ซึ่งมีข้อแตกต่างกันดังรูปที่ 2.14 (ก) และ 2.14 (ข) ตามลำดับ สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ ฟูลบริดจ์ดังรูปที่ 2.14 (ก) จะมีคู่สวิตช์ S1, S4 และ S2, S3 ทำงานสลับกันเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับความถี่สูง เมื่อวัดแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (V_{AB}) จะได้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีแรงดันสูงสุดเท่ากับ $+V_d$ และแรงดันต่ำสุดเท่ากับ $-V_d$ และกระแสไหลผ่านโหลต (i_L) เป็นรูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 2.15 (ก) ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ดังรูปที่ 2.14 (ข) ทำหน้าที่เหมือนกับวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ แต่จะมีสวิตช์ S1, S2 ทำงานสลับกัน เมื่อวัดแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (V_{S1}) และ (V_{S2}) จะได้ค่าแรงดันสูงสุดเท่ากับ $+V_d/2$ และค่าแรงดันต่ำสุดเท่ากับ $-V_d/2$ และกระแสไหลผ่านโหลต (i_L) เป็นรูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 2.15 (ข) จะเห็นได้ว่าวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์มีแรงดันตกคร่อมโหลตและกระแสไหลผ่านโหลตเป็นครึ่งหนึ่งของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

จาก
$$P = \frac{V^2}{R} \quad (2.22)$$

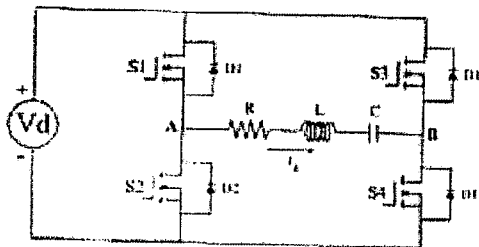
จะได้ว่า
$$P_h = \frac{(V/2)^2}{R} \quad (2.23)$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น
$$P_h = \frac{V^2 / R}{4} \quad (2.24)$$

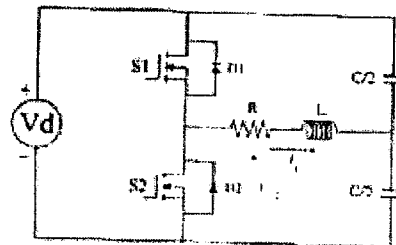
โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้าของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์
 P_h คือ กำลังไฟฟ้าของวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์
 V คือ แรงดันตกคร่อมโหลด
 R คือ ค่าความต้านทานของโหลด



ดังนั้นกำลังไฟฟ้าของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะมากกว่าวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์เป็น 4 เท่าตัวดังแสดงในสมการที่ (2.24) จะเห็นว่าฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ให้กำลังไฟฟ้าได้มาก ซึ่งจะต้องรับแรงดันและกระแสที่มีปริมาณมากได้ แต่ด้วยพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ออกแบบ โครงการวิจัยนี้จึงเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์กับเตาหุงต้มโดยที่ขดลวดเหนี่ยวนำจะถูกจำกัดเนื้อที่ของแผ่นขดลวดให้มีขนาดเท่ากับกันของภาชนะหุงต้ม

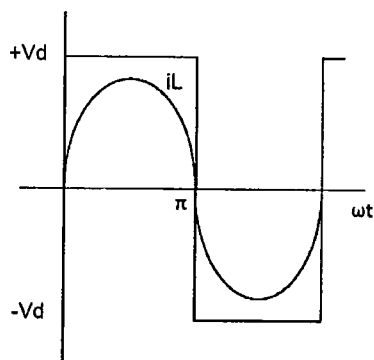


(ก) อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

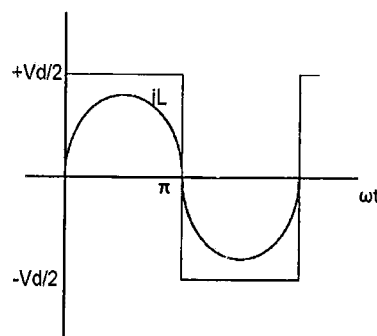


(ข) อินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์

รูปที่ 2.14 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบฟูลบริดจ์และแบบฮาล์ฟบริดจ์ [5]



(ก) อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์



(ข) อินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์

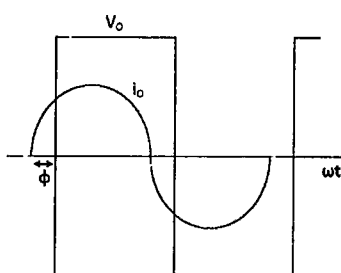
รูปที่ 2.15 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์และแบบฮาล์ฟบริดจ์

2.7 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

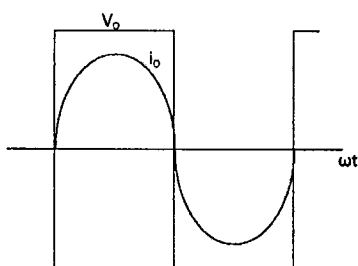
2.7.1 การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับความถี่ [5]

โครงการวิจัยนี้เลือกใช้การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบปรับความถี่ซึ่งสามารถทำได้ง่าย การควบคุมกำลังไฟฟ้าในกรณีนี้ ทำได้โดยปรับความถี่สวิตชิง (f_s) ของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยจะได้ลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่โหลดดังรูปที่ 2.16 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความถี่สวิตชิงน้อยกว่าหรือมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์

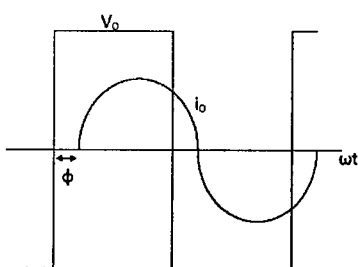
(f) ดังในรูป 2.16 (ก) และรูปที่ 2.16 (ค) จะได้ปริมาณกระแสที่ลดลง ส่วนที่ความถี่สวิตช์เท่ากับความถี่รีโซแนนซ์ดังในรูป 2.16 (ข) จะได้กระแสที่มีปริมาณสูงสุด ดังนั้นเมื่อนำมาเขียนเป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กับค่าความถี่สวิตช์ที่เปลี่ยนแปลงจะได้ดังรูปที่ 2.13 ในหัวข้อ 2.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าสูงสุดที่ความถี่สวิตช์เท่ากับความถี่รีโซแนนซ์ และจะได้กำลังไฟฟ้าลดลงที่ความถี่สวิตช์น้อยกว่าหรือมากกว่าความถี่รีโซแนนซ์ การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนี้มีข้อดีคือ ระบบควบคุมไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัดคือ จะมีการสูญเสียที่ตัวสวิตช์ และเมื่อปรับความถี่สวิตช์ให้มีค่าสูงขึ้น ก็จะทำให้กระแสเพี้ยนไปจากลักษณะรูปคลื่นไซน์มากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้มีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้น



(ก) กรณีที่ $f_s < f_r$



(ข) กรณีที่ $f_s = f_r$

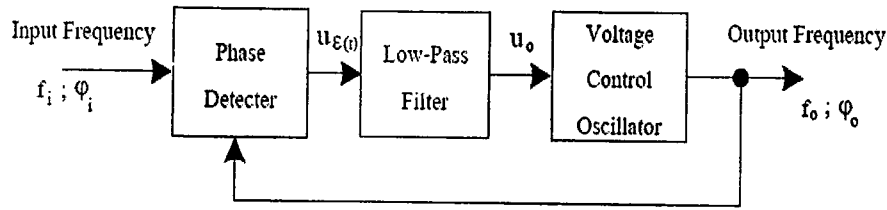


(ค) กรณีที่ $f_s > f_r$

รูปที่ 2.16 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ต่างๆ

2.7.2 การปรับความถี่โดยใช้หลักการทำงานของเฟสล็อกกลูป [10]

เฟสล็อกกลูปเป็นระบบควบคุมความถี่ โดยใช้วิธีเปรียบเทียบเฟสของความถี่ทางด้านเอาต์พุตกับเฟสของความถี่อ้างอิงซึ่งถูกป้อนเข้าทางด้านอินพุตของระบบ ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนผังดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แผนผังของเฟสล็อกกลูป

จากรูปที่ 2.17 เฟสล็อกกลูปประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ

- 1) ภาคตรวจจับเฟส (Phase Detector) มีหน้าที่เปรียบเทียบความแตกต่างของเฟสระหว่าง ϕ_i และ ϕ_o ให้กำเนิดแรงดันคลาดเคลื่อน u_e ออกมาทางเอาต์พุต

$$u_e(t) = K_\phi (\phi_i - \phi_o) \quad (2.25)$$

- 2) ภาคกรองความถี่ต่ำผ่านหรือภาคกรองความถี่ลูป (Low-Pass Filter หรือ Loop Filter) ทำหน้าที่กำจัดส่วนประกอบทางไฟสลบที่ปะปนมากับแรงดันคลาดเคลื่อน และปล่อยให้ส่วนประกอบทางไฟตรงของแรงดันคลาดเคลื่อนผ่านไปยังเอาต์พุต

$$u_o = \frac{1}{T} \int_0^T u_e(t) dt \quad (2.26)$$

3. ภาคกำเนิดสัญญาณควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Oscillator, VCO) ความถี่ f_o ของ VCO จะเปลี่ยนไปตามแรงดัน u_o ทางอินพุต ดังนั้นเมื่อ u_o เปลี่ยนไปก็จะมีผลทำให้ f_o และ ϕ_o เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

$$f_o = K_f u_o \quad (2.27)$$

ในระบบเฟสล็อกกลูป ขนาดของแรงดันคลาดเคลื่อนที่ได้จากการตรวจจับเฟสจะแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของ $f_i - f_o$ และ $\phi_i - \phi_o$ แรงดันคลาดเคลื่อนนี้จะไปควบคุมให้การเปลี่ยนแปลงของ f_o ของ VCO เป็นไปในทิศทางที่ทำให้ผลต่างของความถี่ $f_i - f_o$ มีขนาดลดลง นั่นคือ f_o จะมีค่าเข้าใกล้ f_i มากขึ้น เราเรียกสภาวะของลูปในขณะที่ VCO เริ่มเปลี่ยนความถี่ f_o ว่า “แคปเจอร์” เมื่อ f_o มีค่าเท่ากับ f_i การเปลี่ยนแปลงของ f_o ก็สิ้นสุดลง เราเรียกสภาวะนี้ว่า “เฟสล็อก”

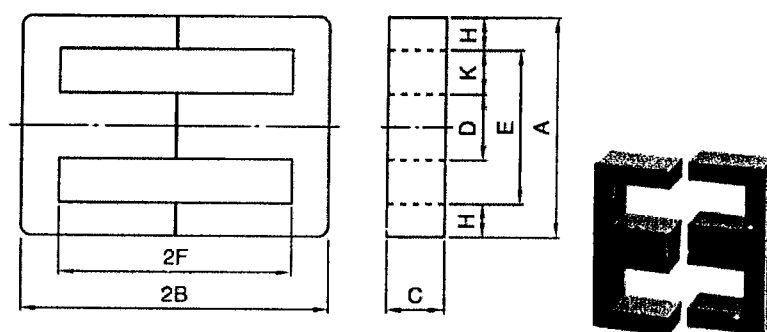
2.8 หม้อแปลงแยกโดด

หม้อแปลงแยกโดดมีหน้าที่หลักในการแยกโวลเทจโซแนนซ์และวงจรอินเวอร์เตอร์ออกจากกัน เพื่อป้องกันทั้งสองส่วนในกรณีที่เกิดการลัดวงจร ไม่ให้เกิดความเสียหายได้ และยังมีหน้าที่ลดทอนแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์ให้ต่ำลง เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงที่จะจ่ายให้โหลดเพิ่มมากขึ้น

2.8.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงแยกโดด

1) แกนเฟอร์ไรต์ [11] เฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic material) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์มีผลทำให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่เกิดบนแกนอากาศมาก เฟอร์ไรต์มีค่าจุดอิ่มตัวฟลักซ์แม่เหล็กค่อนข้างสูง ประมาณ 0.2 เทสลา และเกิดการสูญเสียภายในตัวต่ำที่ความถี่สูงๆ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงเลือกใช้แกนแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ในการออกแบบหม้อแปลง

แกนเฟอร์ไรต์โดยทั่วไปจะถูกผลิตออกมาที่ขนาดและรูปทรงต่างๆ ตามมาตรฐาน เช่น แกนแบบ EI, EE, ETD เป็นต้น ปกติผู้ผลิตจะทำแกนเฟอร์ไรต์ออกมาในลักษณะคู่ประกบ เพื่อความสะดวกในการประกอบเข้ากับบ็อบบิน การประกอบแกนเฟอร์ไรต์เข้ากับบ็อบบินจะทำให้ทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ มีลักษณะเป็นวงบรรจบได้ แกนที่นิยมใช้กันมาก คือ แบบ EE, EI และ ETD เนื่องจากสามารถพันขดลวดรอบแกนบนบ็อบบินได้สะดวก ซึ่งแกนในกลุ่มนี้จะมีขนาดให้เลือกใช้งานเป็นจำนวนมาก และโครงการวิจัยนี้เลือกใช้แกน EE80 ซึ่งเป็นแกนหม้อแปลงเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมกับการใช้งานที่ความถี่สูง



รูปที่ 2.18 ขนาดแกนหม้อแปลงเฟอร์ไรต์ EE

2) บ็อบบิน บ็อบบินหรือแบบรองพัน ปกติจะทำจากพลาสติกชนิดทนความร้อนสูงและไม่ติดไฟ บ็อบบินจะช่วยให้การรองพันขดลวดบนแกนเฟอร์ไรต์สะดวกขึ้นและป้องกันปัญหาการลัดวงจรกับแกนเฟอร์ไรต์ได้

3) ลวดทองแดงอาบน้ำยา การพันขดลวดทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงแยกโดดที่กำลังไม่สูงมากนัก ปกติจะใช้ขดลวดทองแดงอาบน้ำยาพันบนแกนบ็อบบินเพื่อให้ได้จำนวนรอบตามต้องการ ขนาดของขดลวดที่จะใช้พันนั้นขึ้นอยู่กับค่ากระแสสูงสุดที่ผ่านขดลวด ความถี่และผลข้างเคียงอื่นๆ ด้วย

4) เทปฉนวน ใช้สำหรับเป็นตัวรองระหว่างชั้นของขดลวดในหม้อแปลง และมีหน้าที่สำคัญในการแยกส่วนทางไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ วัสดุที่ใช้ทำเทปฉนวนอาจเป็นพวกไมลาร์หรือโพลีเอสเตอร์ที่มีความหนาอยู่ในช่วง 0.05-0.1 มิลลิเมตร

2.8.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง [11]

1) กำหนดค่ากำลังไฟฟ้า ในส่วนนี้จะต้องกำหนดกำลังไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องการ

$$P_o = (V_o + V_H)I_o \quad (2.28)$$

โดยที่ P_o คือ กำลังไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ (W)

V_o คือ แรงดันดันออก (V)

V_H คือ แรงดันตกคร่อมเนื่องจากผลของความต้านทานในขดลวดหม้อแปลงคิดเป็น 10% ของแรงดันด้านออก (V)
 I_o คือ กระแสด้านทุติยภูมิ (A)

2) การเลือกแกนแม่เหล็ก โดยผู้ออกแบบสามารถเลือกขนาดของแกนแม่เหล็กก่อน ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีผลคูณพื้นที่

$$A_p = A_c A_w = \frac{P_o \left(\sqrt{2} + \frac{1}{\eta} \right)}{4JK_w B_m f_s} \quad (2.29)$$

โดยที่ A_p คือ ผลคูณพื้นที่ (mm^4)
 A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน (mm^2)
 A_w คือ พื้นที่ภายในกรอบว่างของแกน (mm^2)
 B_m คือ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (0.2 T)
 J คือ ค่าความหนาแน่นกระแส (3 A/ mm^2)
 K_w คือ ค่า window utilization factor (มีค่า 0.4)
 η คือ ประสิทธิภาพของหม้อแปลง (มีค่า 0.8)
 f_s คือ ความถี่สวิตชิง (Hz)

3) การคำนวณจำนวนรอบในการพัน สามารถหาจำนวนรอบดัดแปลงได้เท่ากับ

$$N_1 = \frac{V_{SS, \max}}{4A_c B_m f_s} \quad (2.30)$$

จากสูตรอัตราส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าจะได้

$$V_o' = V_o + V_{rl} + V_D \quad (2.31)$$

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_o'}{V_{SS, \min} (2D_{\max})} \quad (2.32)$$

โดยที่ N_1 คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ
 N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ
 $V_{SS, \max}$ คือ ค่าแรงดันสูงสุดของแหล่งจ่ายไฟ
 A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์
 A_w คือ พื้นที่ภายในกรอบว่างของแกนเฟอร์ไรต์
 B_m คือ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 0.2 เทสลา
 f_s คือ ค่าความถี่สวิตชิง

$V_{SS,min}$	คือ แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าต่ำสุด
D_{max}	คือ ค่าตัวชี้ไขเกลสูงสุด
V_{rl}	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานในขดลวด
V_D	คือ แรงดันตกคร่อมไดโอดด้านทุติยภูมิ
n	คือ อัตราส่วนหม้อแปลงไฟฟ้า

4) การเลือกขนาดขดลวด ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ

$$I_2 = I_o \sqrt{D_{max}} \quad (2.33)$$

$$I_1 = nI_o \quad (2.34)$$

สำหรับการเลือกขนาดของขดลวดจะหาได้จากสมการ

$$a_1 = \frac{I_1}{J} \text{ และ } a_2 = \frac{I_2}{J} \quad (2.35)$$

โดยที่	a_1	คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านปฐมภูมิ
	a_2	คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านทุติยภูมิ
	J	คือ ค่าความหนาแน่นกระแส มีค่าประมาณ 3 A/mm ²
	I_1	คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสปฐมภูมิ
	I_2	คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสทุติยภูมิ
	I_o	คือ กระแสด้านออก

จะต้องทำการเลือกพื้นที่หน้าตัดของขดลวดให้มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ

5) การตรวจสอบ

$$A_w K_w \geq \sum_{i=1}^m a_i N_i \quad (2.36)$$

โดยที่	A_w	คือ พื้นที่ภายในกรอบว่างของแกน
	K_w	คือ ค่า window utilization factor มีค่าเท่ากับ 0.6

ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขแสดงว่าสามารถพันขดลวดลงพื้นที่หน้าต่างของแกนแม่เหล็กของบริษัทผู้ผลิตได้พอดี

2.8.3 การกำหนดขนาดของขดลวดที่นำมาใช้พัน [11]

ปกติการพันขดลวดหม้อแปลงจะใช้ลวดอบนํ้ายามาใช้ในการพัน ซึ่งในขณะที่หม้อแปลงทำงาน กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดนั้นมีความถี่สูง และที่ความถี่สูงๆ นี้จะทำให้ลวดทองแดงนำกระแสได้เพียงที่ผิว มีผลทำให้พื้นที่หน้าตัดในการนำกระแสของลวดทองแดงลดลง การสูญเสียในขดลวดจะมีมากขึ้นรวมทั้ง

การเรียงซ้อนของขดลวดทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นในขดลวดเช่นกัน กำลังงานที่สูญเสียเหล่านี้จะทำให้ขดลวดร้อน ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น ฉะนั้นจึงต้องกำหนดขนาดและวิธีการพันขดลวดทองแดงให้เหมาะสม เพื่อลดการสูญเสียในขดลวดทองแดงให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งควรพิจารณาจากสาเหตุต่างๆ ดังนี้

1) ผลจากการนำกระแสที่ผิวของทองแดง (Skin effect) ลวดทองแดงเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กไหลวนอยู่ภายในและรอบๆ ตัวลวดทองแดง สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นภายในตัวลวดทองแดงอีกทอดหนึ่ง การไหลวนของกระแสนี้มีผลทำให้กระแสปกติไหลได้เฉพาะที่ผิวของลวดทองแดง ซึ่งการแก้ปัญหาในส่วนนี้นิยมใช้ลวดทองแดงที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับความหนาของผิวตัวนำทองแดงจำนวนหลายๆ เส้น โดยที่แต่ละเส้นจะแยกฉนวนและนำมาตีเกลียวรวมกันจนได้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับตัวนำทองแดงแบบตัน

$$\text{Skin depth, } \Delta = \frac{75}{\sqrt{f_s}} \quad \text{mm} \quad (2.37)$$

โดยที่ f_s คือ ค่าความถี่สวิตชิง

2) ผลจากการเรียงซ้อนของขดลวด ปกติค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรต์จะมีค่าสูงมาก แกนจะจับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดในหม้อแปลงให้วิ่งอยู่ภายในแกนเฟอร์ไรต์เท่านั้น แต่โดยความเป็นจริงแล้วยังมีฟลักซ์บางส่วนสามารถวิ่งออกจากแกนตัดผ่านขดลวดได้ ฟลักซ์เหล่านี้เรียกว่า ฟลักซ์รั่ว (Leakage Flux) ซึ่งฟลักซ์รั่วนี้เกิดขึ้นจากการพันขดลวดโดยตรง

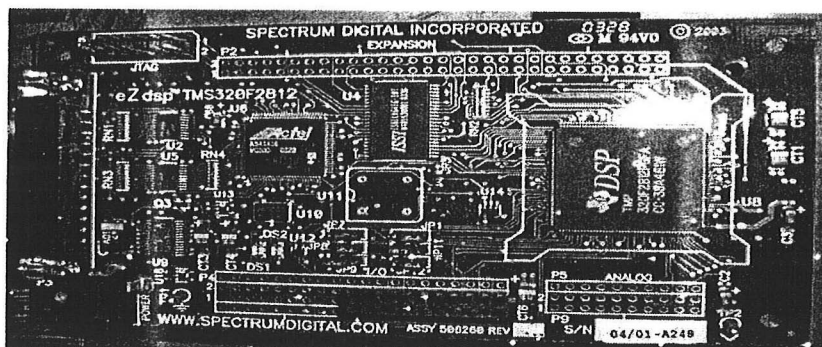
2.9 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320F2812 [12]

โครงการวิจัยนี้เลือกใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812 ซึ่งมีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

- สร้างโดยใช้เทคโนโลยี High-Performance Static CMOS มีความเร็วสัญญาณนาฬิกา 150 MHz หรือ 6.67 ns ต่อหนึ่งรอบสัญญาณนาฬิกา
- หน่วยประมวลผลกลางประสิทธิภาพสูงขนาด 32 บิต ใช้สถาปัตยกรรมบัสแบบฮาร์วาร์ด (Harvard Bus Architecture) ปฏิบัติการแบบ 16×16 และ 32×32
- มีกระบวนการตอบสนองอินเตอร์รัพท์ที่รวดเร็ว
- หน่วยความจำชนิด SARAM และ Flash ขนาด 128K × 16 บิต (แบ่งเป็น 8K×16 สี่ตอนและ 16K×16 หกตอน)
- มี Boot ROM ขนาด 4K × 16 ภายในบรรจุ Software Boot Mode และตารางทางคณิตศาสตร์
- ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลความละเอียด 12 บิตจำนวน 16 ช่องสัญญาณอินพุต
- ลักษณะเป็นแบบมัลติเพล็กซ์ 2 ชุดๆ ละ 8 ช่องสัญญาณสามารถแปลงสัญญาณเพียงช่องเดียวหรือทุกช่องพร้อมกันได้ ซึ่งใช้เวลาในการแปลงสัญญาณเพียงช่องเดียวหรือทุกช่องพร้อมกันได้ซึ่งใช้เวลาในการแปลงสัญญาณเพียง 80 ns ต่อ 1 ครั้ง
- มี Event Manager จำนวน 2 ชุดคือ EVA และ EVB
- ตัวนับขนาด 32 บิต 3 ชุด
- อินพุต / เอาต์พุต พอร์ต 56 ช่อง

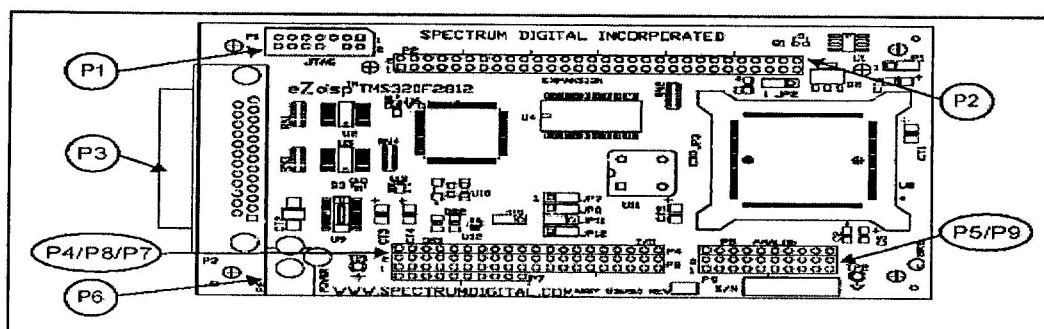
- ชุดติดต่อสื่อสารแบบอนุกรม รองรับสัญญาณอินเทอร์เฟซจากอุปกรณ์รอบข้างจำนวน 45 แหล่ง สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลประกอบอยู่บนบอร์ด eZdsp F2812 ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 บอร์ด eZdsp F2812

บอร์ด eZdsp F2812 [13] มีรายละเอียดของจุดเชื่อมต่องดรูปที่ 2.20 ส่วนประกอบฟังก์ชันต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.20 จุดเชื่อมต่อของบอร์ด eZdsp F2812

ตารางที่ 2.2 ฟังก์ชันของจุดเชื่อมต่องดบนบอร์ด eZdsp F2812

Connector	Function
P1	JTAG Interface
P2	Expansion
P3	Parallel Port / JTAG Controller Interface
P4/P7/P8	I/O Interface
P5/P9	Analog Interface
P6	Power Connector