



เครื่องหลอมสแตนเลสแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

High Frequency Induction Melting for Stainless Steel

กฤษฎา ทองงาม , ธีรภัทร ธีญลักษณ์เดโช, ไชยยันต์ ทองสองยอด

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 73170

E-mail: chaiyan.tho@rmutr.ac.th, chaiyan8849@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้กล่าวเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบในการหลอมสแตนเลสแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง ความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นโลหะเกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current) จากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก เครื่องต้นแบบขนาด 8 กิโลวัตต์ ความถี่ 30 กิโลเฮิรตซ์ ออกแบบให้ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า 3 เฟส 380 โวลท์ ภายในเครื่องประกอบไปด้วย วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับ ซึ่งวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับที่ออกแบบนี้ จะแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้มีความถี่สูงขึ้น วงจรเรโซแนนซ์แบบ LLC มีหน้าที่ทำให้สวิตช์ทำงานแบบนุ่มนวลและช่วยลดความสูญเสียของสวิตช์ โดยมีเงื่อนไขการทำงานแบบสวิตช์ซึ่งในขณะที่แรงดันเป็นศูนย์ วงจรควบคุมในการปรับความถี่ในการสวิตช์ ใช้ไอซี KA3525A เป็นตัวกำเนิดสัญญาณความถี่ หม้อแปลงความถี่สูงที่อัตราส่วนหม้อแปลง 17:1 ใช้เป็นตัวส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากการทดลองวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับ ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับ ขณะทำงานเต็มพิกัดโหลด ประมาณ 97 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับ, สวิตช์ในขณะที่แรงดันเป็นศูนย์, วงจรเรโซแนนซ์แบบ LLC

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้งานวัสดุอยู่มากมายหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นในงานก่อสร้าง เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ ซึ่งวัสดุที่ใช้จะเลือกให้ตรงกับกรนำไปใช้งานนั้น โดยเฉพาะ “สแตนเลส” ที่เรารู้จักกันดีคือโลหะผสมซึ่งจะมีส่วนผสมเพื่อทำให้โลหะมีคุณสมบัติที่ดีหลายๆ อย่างเข้าด้วยกัน เช่น ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนอุณหภูมิสูง ซึ่งสแตนเลส เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีราคาสูง ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ก้าวหน้า “สแตนเลส” จึงเป็นตัวเลือกหนึ่งที่ผู้ประกอบการเลือกเป็นวัสดุในการผลิต ซึ่งในกระบวนการผลิตบางครั้งขึ้นงานอาจไม่ได้ตามความต้องการ เสียหาย หรือมีเศษเหลือจากการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยจะนำสิ่งที่เหลือเหล่านั้นไปแปรรูป และนำกลับมาใช้ใหม่ จึงได้นำเสนอ การสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อหลอมสแตนเลส ซึ่งใช้หลักการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำที่ความถี่สูง มาใช้ในการหลอมละลายสแตนเลส เพื่อให้ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย หรือนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม การหลอมโลหะได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. การเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating) [1]

การเหนี่ยวนำโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าในการเหนี่ยวนำเป็นเทคนิคการทำความร้อนสำหรับวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ (โลหะ) การเหนี่ยวนำความร้อนถูกนำมาใช้มากในกระบวนการให้ความร้อนหลายอย่าง เช่น การละลายโลหะและการทำให้โลหะร้อน คุณสมบัติที่สำคัญของการเหนี่ยวนำความร้อน คือ ความร้อนจะถูกสร้างขึ้นจากวัสดุที่สามารถสร้างความร้อนได้ด้วยตัวเอง สามารถให้ความร้อนได้เฉพาะที่ที่ต้องการ ความเร็วในการทำความร้อนจะสูงมากเป็นผลมาจากความหนาแน่นของพลังงานงานสูง

การเหนี่ยวนำความร้อนเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้า (eddy-current) เหนี่ยวนำในชิ้นงานที่เป็นตัวนำไฟฟ้า สำหรับกระบวนการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำให้มีประสิทธิภาพและในการปฏิบัติ มีความสัมพันธ์กับความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และคุณสมบัติของชิ้นงานที่มีความเหมาะสม พื้นฐานธรรมชาติของการเหนี่ยวนำความร้อน คือ การเกิดกระแสไหลวนขึ้นบริเวณด้านนอกหรือผิวของชิ้นงานที่เรียกว่า "skin effect" เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงานเกือบทั้งหมด กระแสที่ไหลวนตามชิ้นงานทรงกระบอกจะมีมากที่รอบนอกของพื้นผิว ในขณะที่กระแสจะอยู่ตรงกลางเล็กน้อย ระดับความลึกของความร้อนจะขึ้นอยู่กับความถี่ของสนามไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า และความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน เพื่อวัตถุประสงค์ในทางปฏิบัติ ผลกระทบจากความร้อนที่ผิว (การอ้างอิงระดับความลึก) ถูกกำหนดเป็นความลึกที่ประมาณ 86% ความร้อนเนื่องจากความต้านทานของกระแสที่เกิดขึ้น สามารถสรุปได้จากสมการที่ 1 ของแมกซ์เวลล์สำหรับโหลดทรงกระบอกได้ดังนี้

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad [m] \tag{1}$$

δ = ความลึกผิวที่ใช้งาน [m]

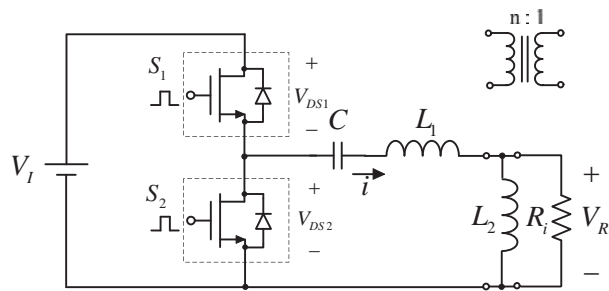
ρ = ความต้านทานไฟฟ้า [$\Omega \cdot m$]

μ = ความซึมซาบแม่เหล็ก [H / m] $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$)

f = ความถี่ที่ใช้งาน [Hz]

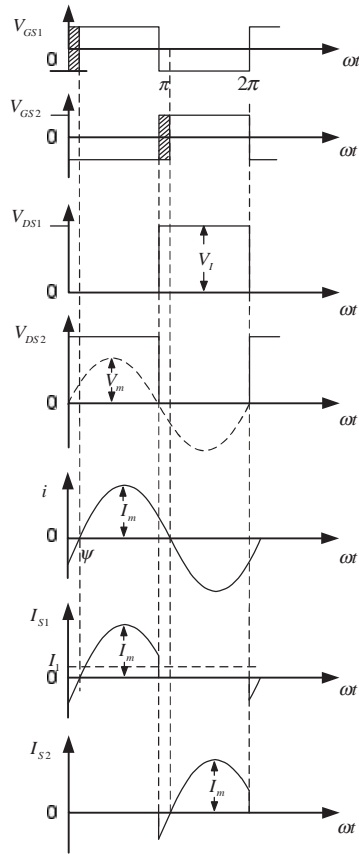
2.2 วงจรเรโซแนนซ์คลาสดีแบบแอลแอลซี (Class D LLC Resonant Circuit) [2]

อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบ LLC แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย สวิตช์สองตัว S_1 , S_2 และวงจรเรโซแนนซ์ $C-L_1-L_2$ ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2 โหลดต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ L_2 ภายในสวิตช์ประกอบด้วยไดโอดในตัว และขับโดยคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมจากแหล่งจ่ายแรงดัน V_{GS1} และ V_{GS2} โดยสวิตช์แต่ละตัวจะนำกระแสชุกและกระแส ซิกลจะสลับกันทรานซิสเตอร์จะถูกขับโดยคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมจากแหล่งจ่ายแรงดัน V_{GS1}, V_{GS2} สวิตช์ S_1, S_2 จะสลับการทำงานกันที่ความถี่สวิตซ์ $f = \omega / 2\pi$ ค่าดีวีดีไซเคิลเป็น 50% ตัวเหนี่ยวนำ L_2 สามารถแทนโดยหม้อแปลงไอโซเลต หรือแอมพลิฟูดเป็นแรงดันไฟฟ้าสลับ ในกรณีนี้ ตัวเหนี่ยวนำแม่เหล็กของหม้อแปลงสามารถใช้ตัวเหนี่ยวนำ L_2 โดยช่องว่างแกบตัวเหนี่ยวนำแม่เหล็กต่ำ หม้อแปลงในรูปแบบของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมและอินเวอร์เตอร์แบบ LLC จะคล้ายกัน แตกต่างกันอย่างเดียวคือ ตัวเหนี่ยวนำแม่เหล็กในวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมจะมีค่ามาก แต่ค่าเหนี่ยวนำแม่เหล็กแบบ LLC ในอินเวอร์เตอร์จะมีค่าน้อย

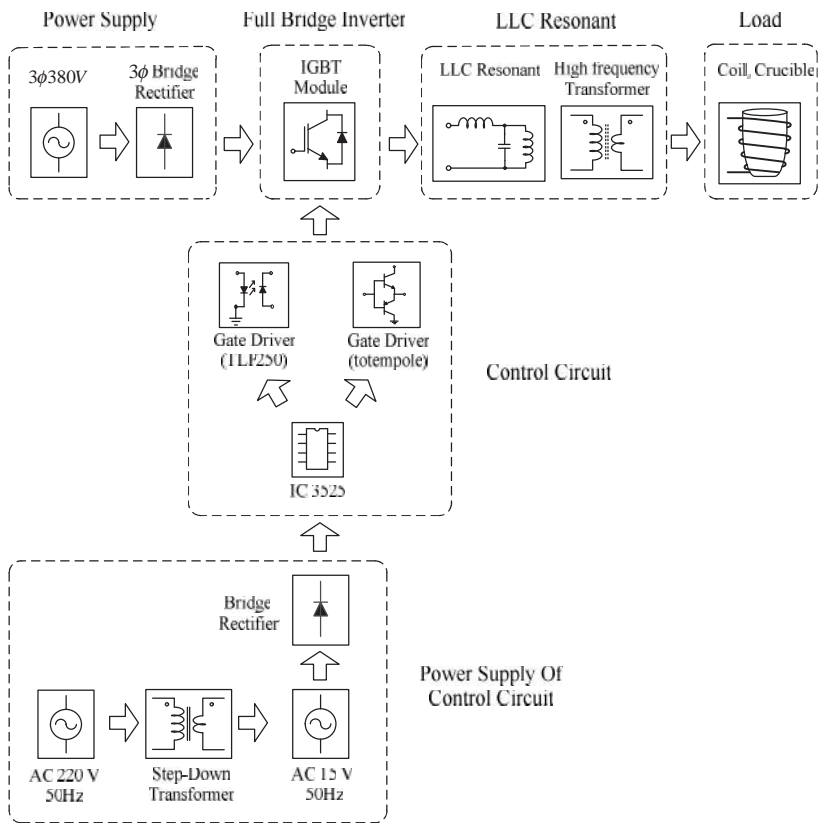


รูปที่ 1 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบ LLC

คลื่นสัญญาณของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบ LLC, $f > f_r = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$ จะเหมือนกับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ดังรูปที่ 2 ในทางปฏิบัตินิยมใช้อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์มากกว่า เพราะการกลับคืนสู่ภาวะปกติของไดโอดภายในมอสเฟตจะไม่เกิดผลกระทบต่อการทำงานของวงจร แรงดันขาเข้า V_{DS2} ของวงจรเรโซแนนซ์ จะเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม (square wave) เป็นที่ยอมรับตัวประกอบคุณภาพของโหลด Q_r ที่ความถี่เรโซแนนซ์สูง กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะเข้าไปสู่รูปคลื่นไซน์ และไหลผ่านสวิตช์ S_1, S_2 สลับกัน



รูปที่ 2 สัญญาณของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบ LLC



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องหลอมสแตนเลสแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

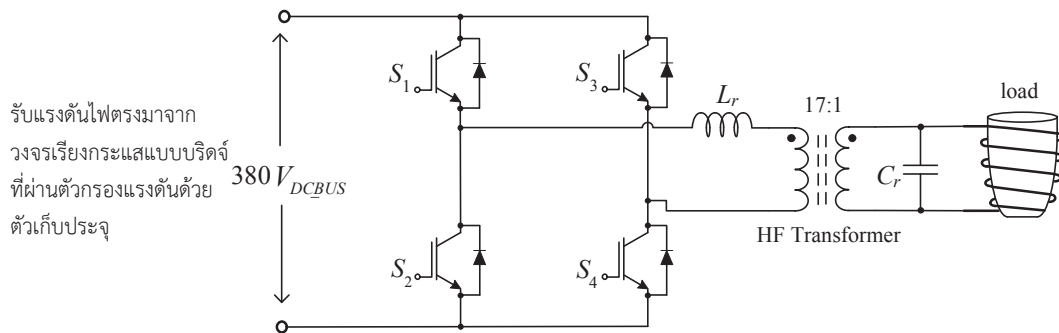
3. การออกแบบวงจร

การออกแบบวงจรมันจะต้องมีการออกแบบในการเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้ได้วงจรที่เป็นไปตามความต้องการ ซึ่งจะมีตั้งแต่ส่วนจ่ายไฟไปยังวงจรอื่นๆ และอุปกรณ์ต่างๆ

บล็อกโคอะแกรมจากรูปที่ 3 แสดงการทำงานของเครื่องทำลายสแตนเลสแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยประกอบไปด้วย ส่วนของแหล่งจ่ายไฟของภาคกำลัง (Power Supply) ซึ่งใช้ไฟ 3 เฟสต่อกับวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์พร้อมด้วยตัวเก็บประจุ เพื่อป้อนให้กับวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์แบบ LLC เรโซแนนซ์ แล้วส่งผ่านกำลังโดยผ่านหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อลดกระแสต้านเข้าให้กับขดลวดปฐมภูมิ ซึ่งวงจรควบคุมในการขับการสวิตช์ให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งใช้ไอซี 3525 สร้างสัญญาณและวงจรขับสวิตช์เพื่อให้สวิตช์สามารถทำงานได้ ซึ่งวงจรควบคุมในการขับสวิตช์จะใช้แหล่งจ่ายไฟตรงซึ่งได้รับมาจากไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า 220 โวลต์ ผ่านหม้อแปลงให้ไฟลงเหลือ 15 โวลต์ หลังจากนั้นจะเข้าสู่วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์พร้อมด้วยตัวเก็บประจุเพื่อทำให้เป็นแรงดันไฟตรง เพื่อนำไปจ่ายให้กับส่วนของวงจรควบคุม โดยสัญญาณที่ออกจากส่วนของอินเวอร์เตอร์จะป้อนเข้าที่วงจรเรโซแนนซ์ไปสู่ส่วนของคอยล์เป็นส่วนที่เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้น

3.1. วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

เนื่องจากวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์สามารถให้กำลังไฟฟ้าได้มากกว่าวงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ จึงได้เลือกวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ดังในรูปที่ 4 โดยหลักการทำงานคือ สวิตช์ ทั้ง 4 ตัวจะสลับการทำงานกันเป็นคู่คือ S_1 และ S_4 จะนำกระแสพร้อมกันในสัญญาณช่วงครึ่งคาบแรกส่วนในครึ่งคาบหลัง S_2 และ S_3 นำกระแสแทนส่วน S_1 และ S_4 หุดย่นกระแสทำให้แรงดันเอาต์พุตจากอินเวอร์เตอร์ที่ขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ซึ่งมีค่าขดถึงขดเป็นสองเท่าของแรงดันไฟตรงที่ป้อนเลี้ยงวงจรในภาคกำลังและมีความถี่เท่ากับการทำงานของสัญญาณพัลส์ที่ขับให้สวิตช์ทำงาน ในการเลือกพิกัดของสวิตช์จะใช้วิธีพิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์และกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์นั้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์หรือวงจร



รูปที่ 4 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบ LLC

จากรูปที่ 4 วงจรที่ออกแบบขึ้นเป็นวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบ LLC ซึ่งเป็นการนำวงจรเรโซแนนซ์มาใช้เพื่อลดการสูญเสียของสวิตช์ขณะทำการสวิตช์ซึ่งความถี่สูงและทำให้วงจรมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล L_r ของหม้อแปลงที่พันไว้ที่อัตราส่วนหม้อแปลง 17:1 มาใช้ในการคำนวณเพื่อหาตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ C_r และการใช้ความถี่สวิตช์ที่เหมาะสมกับวงจร

ในที่นี่ได้ใช้ไอจีบีทีโมดูลเป็นสวิตช์ เนื่องจากต้องการใช้กำลังไฟฟ้ามักและต้องการให้มีความสูญเสียน้อยกว่า เนื่องจากใช้สายไฟที่ต่อให้กับสวิตช์แต่ละตัวลดลง และถ้าเปรียบเทียบกับขนาดกำลังไฟฟ้าที่เท่ากันมอสเฟตจะมีราคาสูงกว่าไอจีบีที

การเลือกพิกัดของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ควรเลือกค่าให้มากกว่า โดยเลือกค่าที่มากกว่า 400 V 30 A จึงได้เลือกไอจีบีทีโมดูลที่ค่ากระแสสูงสุด I_{DS} เท่ากับ 100 แอมแปร์ แรงดัน V_{DS} เท่ากับ 1,200 โวลต์มาใช้งาน

3.2. การหาตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์

กำหนดความถี่สวิตช์ 30 kHz โดยค่าตัวเหนี่ยวนำที่วัดได้มีค่า 0.00234 mH จากสมการ (2)

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

แทนค่าในสมการ

$$30 \times 10^3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.00234 \times 10^{-3} \times C}}$$

ย้ายข้างเพื่อหาตัวเก็บประจุ

$$C = \frac{1}{(2\pi 30 \times 10^3)^2 0.00234 \times 10^{-3}}$$

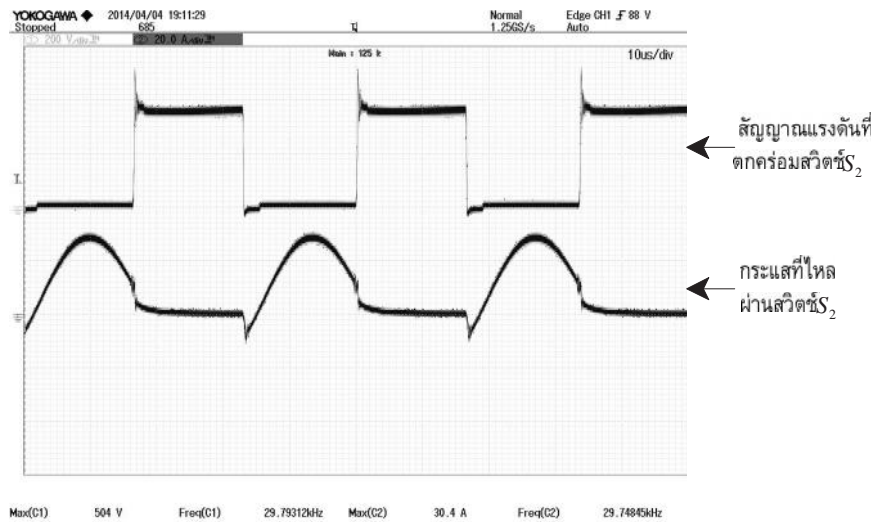
จะได้ค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์เท่ากับ 12 μF

เนื่องจากตัวเก็บประจุที่มีขายไม่มีค่าตัวเก็บประจุที่มีค่าตรงตามความต้องการอาจจะใช้ค่าใกล้เคียงได้แต่ต้องไม่น้อยกว่า 12 μF โดยค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ คือ 13.8 μF

4. ผลการทดลอง

4.1 สัญญาณแรงดันที่ตกรวมและกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์

การสวิตช์ในขณะที่แรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) เพื่อลดค่าความสูญเสียของสวิตช์ที่เกิดขึ้นขณะสวิตช์ โดยแรงดันที่ตกรวมสวิตช์จะต้องเป็นศูนย์ก่อนที่สวิตช์จะเริ่มนำกระแส ซึ่งสัญญาณที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 สัญญาณแรงดันที่ตกรวมสวิตช์และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์

4.2 ประสิทธิภาพของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

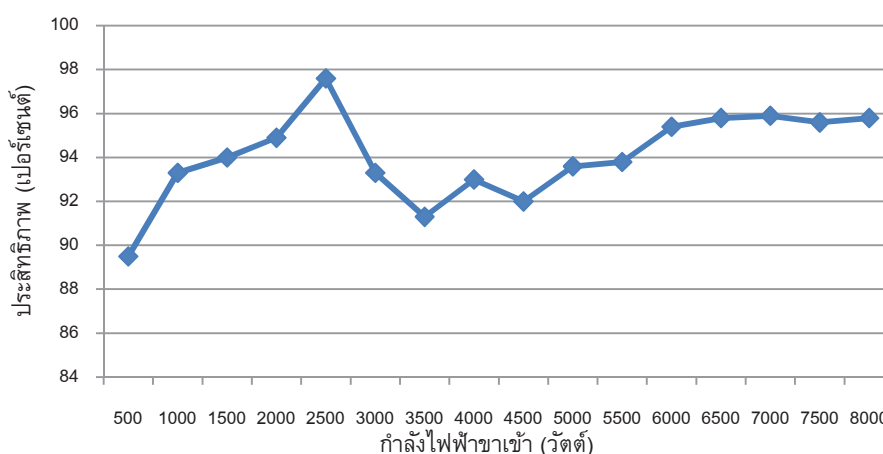
การทดลองวัดโดยกำหนดกำลังไฟฟ้าขาเข้าของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบ LLC เพื่อดูประสิทธิภาพของวงจร โดยเพิ่มที่ละ 500 วัตต์ ซึ่งเริ่มที่ 500 วัตต์ จนถึง 8,000 วัตต์ พบว่า วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบ LLC มีประสิทธิภาพการทำงานของวงจรได้สูงสุดถึง 97% ที่กำลังไฟฟ้าขาเข้า 2,500 วัตต์ ได้ค่าเป็นไปตามตารางที่ 1

จากรูปที่ 6 ประสิทธิภาพต่ำสุดของวงจรมีค่าเป็น 89% ที่กำลังไฟฟ้าขาเข้า 500 วัตต์ เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าไปเรื่อยๆ จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นจนมีค่าสูงสุดถึง 97.5% ที่กำลังไฟฟ้า 2500 วัตต์ หลังจากนั้นประสิทธิภาพจะลดต่ำลงและเพิ่มขึ้น จนถึงที่กำลังไฟฟ้าขาเข้า 6,000 วัตต์ ประสิทธิภาพจะเริ่มมีค่าคงที่อยู่ที่ประมาณ 95% จนถึง 8,000 วัตต์

ตารางที่ 1 การทดลองวัดเพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบ LLC

กำลังไฟฟ้าขาเข้า (วัตต์)	กำลังไฟฟ้าด้านเข้าวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (วัตต์)	กำลังไฟฟ้าด้านออกวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (วัตต์)	ประสิทธิภาพของวงจร (เปอร์เซ็นต์)
500	510	444	89.5
1,000	1,060	980	93.3
1,500	1,522	1,430	94
2,000	2,090	1,977	94.9
2,500	2,564	2,502	97.6
3,000	3,086	2,879	93.3

กำลังไฟฟ้าขาเข้า (วัตต์)	กำลังไฟฟ้าด้านเข้าวงจร ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (วัตต์)	กำลังไฟฟ้าด้านออกวงจร ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (วัตต์)	ประสิทธิภาพของวงจร (เปอร์เซ็นต์)
3,500	3,550	3,241	91.3
4,000	4,130	3,840	93
4,500	4,516	4,150	92
5,000	5,080	4,754	93.6
5,500	5,563	5,218	93.8
6,000	6,110	5,828	95.4
6,500	6,570	6,294	95.8
7,000	7,089	6,798	95.9
7,500	7,564	7,231	95.6
8,000	8,036	7,698	95.8



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพและกำลังงานขาเข้าของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์แบบ LLC

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการสร้างเครื่องต้นแบบในการหลอมสแตนเลสแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำความถี่สูงให้กับชิ้นงานที่เป็นโลหะ เครื่องต้นแบบนี้ออกแบบให้ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า 3 เฟส 380 โวลต์ ภายในเครื่องประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (bridge rectifier) เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หลังจากนั้นจะเข้าสู่วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับ (inverter) เพื่อเปลี่ยนความถี่ให้สูงขึ้นโดยควบคุมการสวิตช์โดยใช้สัญญาณจากไอซี KA3525A ในการควบคุมความถี่ในการสวิตช์แล้วส่งกำลังผ่านวงจรโซแนนซ์แบบ LLC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวงจร ไปสู่ขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อนำไปใช้ในการเหนี่ยวนำไปยังโหลด เพื่อให้โหลดเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งโหลดในที่นี้คือ เบ้าหลอมกราไฟท์ เมื่อเบ้าหลอมเกิดความร้อนสูงมากก็จะถ่ายโอนความร้อนไปยังสแตนเลสที่อยู่ภายในเบ้าหลอม จนทำให้สแตนเลสเกิดการหลอมละลายได้ ในการทดลองเครื่องต้นแบบโดยจ่ายกำลังไฟฟ้า 8 กิโลวัตต์ ความถี่ที่ใช้ คือ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถทำให้สแตนเลสหลอมละลายได้ โดยวงจรอินเวอร์เตอร์โซแนนซ์แบบ LLC ทำงานภายใต้เงื่อนไข คือ สวิตช์ในขณะที่มีแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) และมีประสิทธิภาพของวงจรสูงสุดถึง 97%

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณเงินรายได้ พ.ศ. 2555 ทำให้สามารถดำเนินการวิจัยครั้งนี้ได้สำเร็จเรียบร้อย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASM International (2013, Jun 15). Theory of heating by induction [Online]. Available: <http://www.asminternational.org/documents/10192/3451119/ACFAA5C.pdf/98899692-8a69-446d-ac9a-38b8fab3a160>.
- [2] Marian K. Kazimierzczuk and Dariusz Czarkowski, "Resonant Power Converters," pp. 267-29, 1995.