

เครื่องหลอมโลหะให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ

PWM Three-level Inverter for Induction Heating

บัญชา หิรัญสิงห์¹ วีระศักดิ์ ชื่นตา² และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ³

¹โปรแกรมวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
hirunsing@yahoo.com

²โปรแกรมวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
Weerasak.cheunta@gmail.com

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
kjanuwat@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นนำเสนอเครื่องหลอมโลหะให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ โดยเครื่องต้นแบบมีหลักการทำงานคือจ่ายแรงดันอินพุต 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ผ่านวงจรรีเฟอเพื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้ โดยปรับแรงดันไฟฟ้าไว้ที่ 0-220 โวลต์และจ่ายให้กับวงจรเรกติไฟเออร์เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงและกรองสัญญาณให้เรียบ และจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับทำการสวิตซ์ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับออกมาซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นสามระดับที่มีความถี่สูงใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ โดยมีความถี่สวิตซ์ 16 กิโลเฮิร์ตซ์ พิกัดกำลังไฟฟ้า 3 กิโลวัตต์ โดยใช้ไอจีบีทีโมดูล ใช้หม้อแปลงแบบแกนเฟอร์ไรต์ที่ลดการสูญเสียขณะใช้งานที่ความถี่สูงและช่วยเพิ่มกระแสให้สูงขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับเทียบกับเวลาทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กและเกิดกระแสไหลวนขึ้นที่ขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน เมื่อทำการทดสอบแล้วสามารถให้ความร้อนแก่บ้ำหลอมและหลอมชิ้นงานได้เป็นที่น่าพอใจและตามวัตถุประสงค์ โครงการนี้ได้อธิบายหลักการทำงานของวงจร การออกแบบ พร้อมทั้งได้ทำการแสดงผลของการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/simulink และผลของการทดลอง เพื่อเป็นการยืนยันตามแนวคิดที่ได้นำเสนอ

คำสำคัญ: การให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้า, อินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ

Abstract

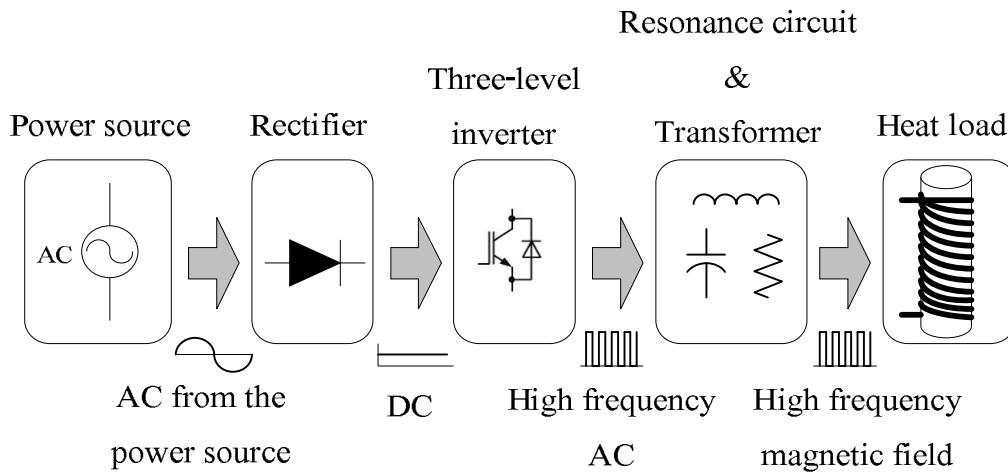
This paper presents the PWM three-level inverter for induction heating. The project design with AC voltage source 220 Vrms 50 Hz with variable AC voltage 0-220 Vrms by dimmer circuit. The induction heating using a PWM three-level inverter obtain DC voltage source by diode full wave rectifiers and low ripple with bulkiness capacitor. The proposed inverter to generate stable high frequency three-level AC output and operated at nearly resonance frequency. The switching frequency is 16 kHz with power rated 3 kW using IGBT module. We also use ferrite core for the matching transformer in order to minimize all losses during operation at high frequency. The magnetic flux induction is applied for induction furnace. Induction voltage and eddy current in crucible are produced by the derivation of electromagnetic flux caused by AC voltage during the period of time. As the result, heat produced by eddy current can heat the work piece as requirement also show a good response to the purpose. The principle and design procedure are illustrated in this project. Both simulation results using MATLAB/simulink and experimental results are shown to verify the validity of the proposed concept.

Keywords: Induction Heating, Three-Level (TL) Inverter

1. บทนำ

ในปัจจุบันการให้ความร้อนโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำ ได้ถูกนำมาใช้งานในภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือนอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น เตาทอดโลหะ เตารีดรูปชิ้นงานโลหะ เตาชื่อมชิ้นงาน เตาทิ้งต้ม เป็นต้น เนื่องจากการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่กล่าวมานี้ยังมีราคาแพงและยังต้องซื้อจากต่างประเทศ จึงได้มีการศึกษาเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำขึ้นสำหรับแหล่งจ่ายพลังงานที่ใช้ในการเหนี่ยวนำความร้อนนี้ สามารถใช้ได้กับความถี่สูง 10 กิโลเฮิร์ตขึ้นไป โดยในการใช้งานที่ความถี่สูงนี้ สามารถช่วยลดขนาดของอุปกรณ์ลงไปได้อย่างมากและยังสามารถให้กำลังงานได้ในระดับสูงๆ ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีและอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ได้มีการพัฒนาไปมากซึ่งรวมถึงการศึกษาวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงโดยการใช้อุปกรณ์ประเภทมอสเฟตหรือไอจีบีที ซึ่งมีความไวในการสวิตซ์สูง และเนื่องจากโพลความร้อนเหนี่ยวนำจะมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำ ดังนั้นจึงใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสามระดับแบบเรโซแนนซ์ซึ่งใช้หลักการเรโซแนนซ์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานในการส่งผ่านพลังงานสูงสุดไปยังโหลดได้ทำให้ประสิทธิภาพในการแปรผันพลังงาน อีกทั้งการใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับยังช่วยให้สามารถจะจ่ายกำลังงานไฟฟ้าได้สูง และให้แรงดัน กระแสตกคร่อมสวิตซ์มีค่าต่ำ จึงมีการสูญเสียจากการสวิตซ์ในอุปกรณ์สวิตซ์น้อย ทำให้การเลือกใช้อุปกรณ์สวิตซ์มีค่าพิกัดกำลังน้อยและมีราคาถูกด้วย [1]

สำหรับโครงสร้างของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเสนอสามารถแสดงได้ในบล็อกไดอะแกรมของภาพที่ 1 จะเห็นได้ว่าประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ซึ่งต่อไปยังวงจรเรียงกระแสเพื่อเปลี่ยนให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงและถูกต่อไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับเพื่อทำหน้าที่สร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูงจ่ายให้ขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลที่ผิวของโหลดเนื่องจากปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) ส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นในขดลวดและชิ้นงานในที่สุด [2]



ภาพที่ 1 บล็อกไดอะแกรมแสดงองค์ประกอบของวงจรให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้านำเสนอ

2. หลักการให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้า

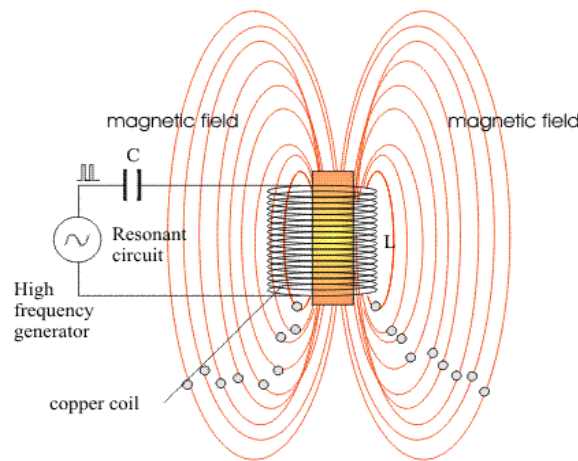
ในการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นหลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็นโลหะตัวนำไฟฟ้า โดยสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงคล่องผ่านชิ้นงานจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลวนก่อให้เกิดความร้อนขึ้นในชิ้นงานและความหนาแน่นกระแสลดลงมาเป็นประมาณ 0.368 เท่าของค่าความหนาแน่นกระแสที่ผิวของชิ้นงานที่ค่าความลึกผิว ความร้อนขึ้นกับปริมาณของกระแสไหลวนและความต้านทานของชิ้นงาน ความร้อนลึกลงไปในผิว ความต้านทานจำเพาะ ความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน และความถี่ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้ค่าตัวแปรในสมการเปลี่ยนไป เพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้นจึงใช้การระบายความร้อนด้วยน้ำไหลผ่านขดลวดที่ให้ความร้อนกับชิ้นงาน (work coil) สมการที่ 1 แสดงสมการความถี่ผิว

$$\sqrt{\frac{\rho}{\mu f \pi}} \tag{1}$$

เมื่อ

- δ คือ ความร้อนลึกลงไปในเนื้อผิว
- ρ คือ ความต้านทานจำเพาะ
- μ คือ ความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน
- f คือ ความถี่

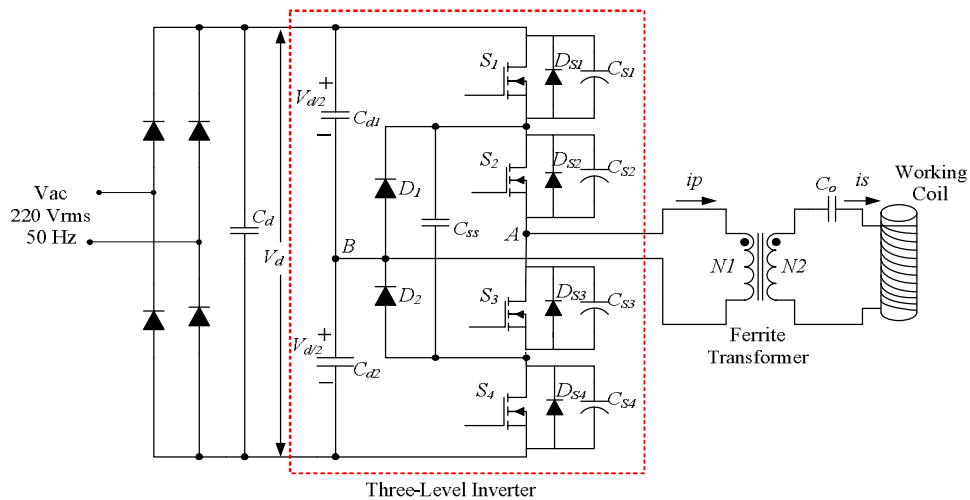
ภาพที่ 2 แสดงให้เห็นถึงเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กคล้องผ่านเข้าหลอมและไปตัดผ่านชิ้นงาน ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กนี้สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนได้ ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะเป็นเสมือนขดปฐมภูมิของหม้อแปลง ที่มีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ส่วนเข้าหลอมจะเปรียบเทียบกับขดทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีจำนวนรอบหนึ่งรอบ และชิ้นงานเป็นโหลดซึ่งความต้านทานสมมูลของชิ้นงานค่อนข้างต่ำ แต่เข้าหลอมจะมีค่าสูงเนื่องจากเป็นวัสดุที่ทำมาจากกราฟไฟต์ ดังนั้นความต้านทานสมมูลในวงจรจึงเป็นผลของเข้าหลอมเป็นส่วนใหญ่



ภาพที่ 2 พื้นฐานการเหนี่ยวนำความร้อน

3. โครงสร้างของวงจร

3.1 วงจรหลัก



ภาพที่ 3 โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่นำเสนอ

ภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับสำหรับการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่นำเสนอ ซึ่ง วงจรสมมูลดังกล่าวจะประกอบไปด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอินพุต 1 เฟส V_{ac} ตัวเก็บประจุ C_d กรองระลอกคลื่นของ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเก็บประจุ $C_{d1}-C_{d2}$ แบ่งแรงดันด้านอินพุตให้เหลือครึ่งหนึ่ง สวิตช์ S_1-S_4 โดยเลือกไอจีบีทีกำลังเป็น สวิตช์ซึ่งจะมีไดโอด $D_{S1}-D_{S4}$ ต่อขนานอยู่ภายในและตัวเก็บประจุ $C_{S1}-C_{S4}$ แผงอยู่ในสวิตช์ สำหรับทางด้านเอาต์พุต ประกอบด้วยโหลดขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ C_o และมีหม้อแปลงความถี่สูงต่อแมตซ์ซึ่งต่ออยู่

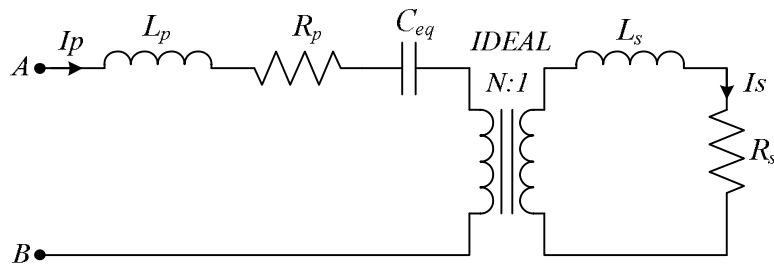
3.2 หลักการทำงาน

ในการวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่นำเสนอนั้น เริ่มจากการวิเคราะห์วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถยึดหลักการวิเคราะห์ที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้า กล่าวคือขดลวด เหนี่ยวนำเปรียบเสมือนด้านปฐมภูมิ ส่วนชิ้นงานเปรียบเสมือนด้านทุติยภูมิ ภาพที่ 4 แสดงวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ โดยที่ ตัวเหนี่ยวนำ L_s และตัวต้านทาน R_s เป็นพารามิเตอร์ด้านทุติยภูมิ ส่วนตัวเหนี่ยวนำ L_p ตัวต้านทาน R_p เป็น พารามิเตอร์ด้านปฐมภูมิ และค่าพารามิเตอร์อื่นๆ หาได้ดังสมการที่ (2)-(4) เมื่อ N คือจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วน n คืออัตราส่วนของหม้อแปลง การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรที่นำเสนอนี้ มีโหมดการทำงาน 10 ช่วงการทำงานใน 1 ไซเคิล รูปคลื่นสัญญาณและโหมดการทำงานสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5 [3]

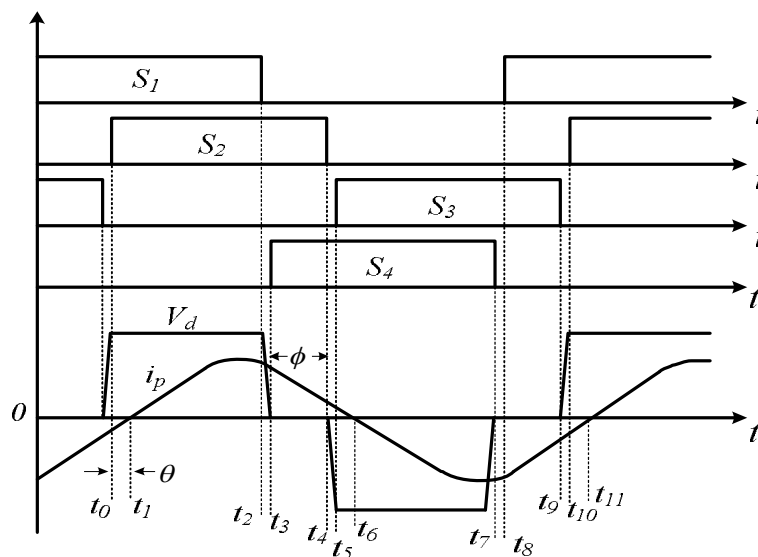
$$L_{eq} = L_p + N^2 L_s \tag{2}$$

$$R_{eq} = R_p + N^2 R_s \tag{3}$$

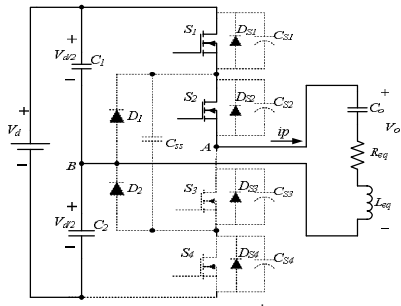
$$C_{eq} = C_o n^2 \tag{4}$$



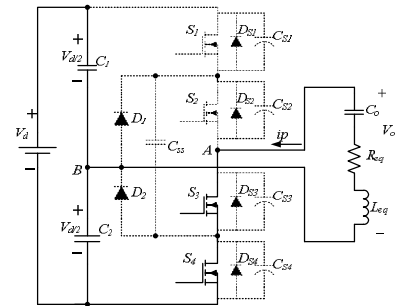
ภาพที่ 4 รูปแบบการทำงานของวงจร



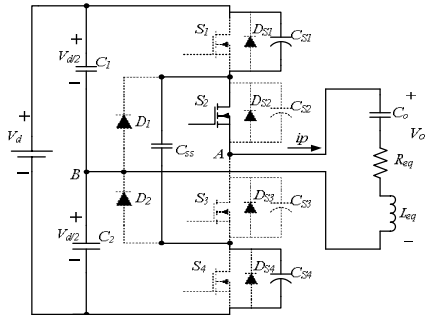
ภาพที่ 5 รูปแบบการทำงานของวงจร



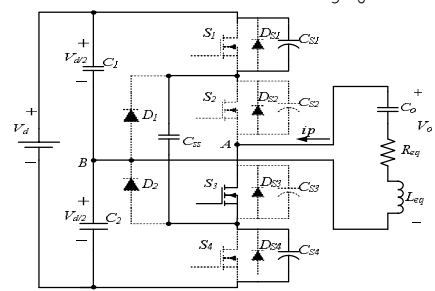
(ก) โหมดการทำงานที่ 1 (t_0-t_1)



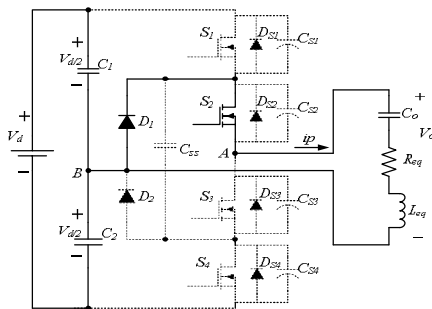
(ฉ) โหมดการทำงานที่ 6 (t_5-t_6)



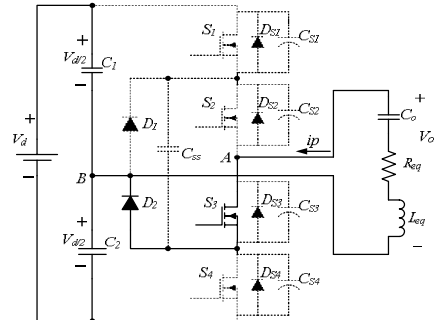
(ข) โหมดการทำงานที่ 2 (t_1-t_2)



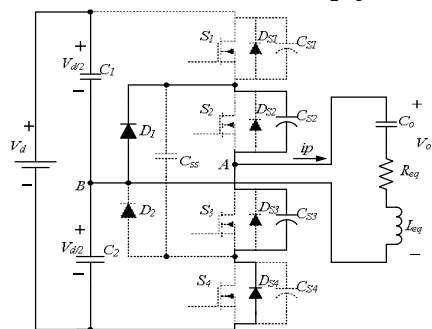
(ช) โหมดการทำงานที่ 7 (t_6-t_7)



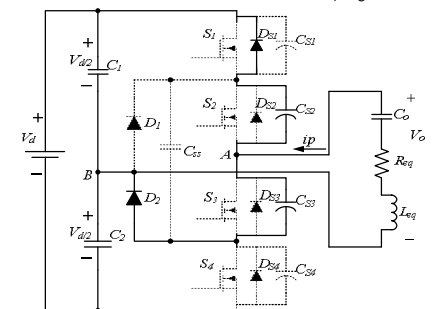
(ค) โหมดการทำงานที่ 3 (t_2-t_3)



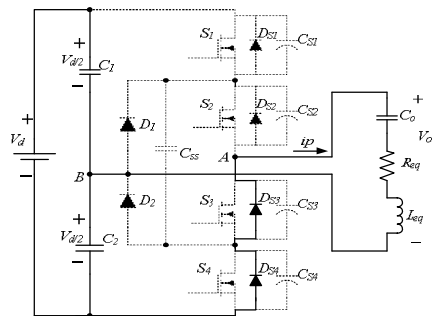
(ฅ) โหมดการทำงานที่ 8 (t_7-t_8)



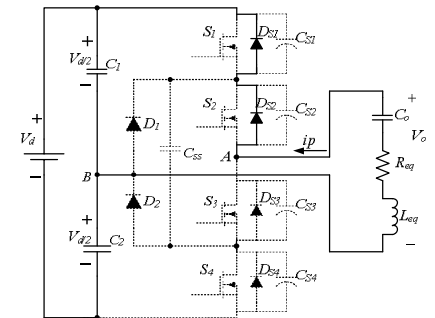
(ง) โหมดการทำงานที่ 4 (t_3-t_4)



(ฉ) โหมดการทำงานที่ 9 (t_8-t_9)



(จ) โหมดการทำงานที่ 5 (t_4-t_5)



(ฉ) โหมดการทำงานที่ 10 (t_9-t_{10})

ภาพที่ 6 โหมดการทำงาน

โหมดการทำงานที่ 1 ($t_1 < t < t_2$) ในโหมดการทำงานนี้ สวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 นำกระแส จะทำให้พลังงานไหลจากด้านอินพุตส่งถ่ายสู่ด้านเอาต์พุตของวงจร ทำให้ได้แรงดันที่ตกคร่อมโหลดที่มีค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำ R_{eq}, L_{eq}, C_{eq} มีค่าเท่ากับ $V_{d/2}$ ซึ่งเท่ากับครึ่งหนึ่งของ V_d วงจรการทำงานแสดงดังภาพที่ 6 ก)

โหมดการทำงานที่ 2 ($t_2 < t < t_3$) ในโหมดการทำงานนี้ สวิตช์ S_1 หยุดนำกระแส กระแสด้านปฐมภูมิจะไหลจากด้านอินพุตสู่ด้านเอาต์พุต ตัวเก็บประจุ C_{S1} ชาร์จประจุ และตัวเก็บประจุ C_{S4} คายประจุผ่านตัวเก็บประจุ C_{SS} วงจรการทำงานแสดงดังภาพที่ 6 ข)

โหมดการทำงานที่ 3 ($t_3 < t < t_4$) ในโหมดการทำงานนี้ ตัวเก็บประจุ C_{S1} และ ตัวเก็บประจุ C_{S4} ชาร์จประจุและคายประจุเสร็จสิ้นสมบูรณ์ตามลำดับ กระแสด้านปฐมภูมิจะไหลพรีวิลลิ่งผ่านไดโอด D_1 และสวิตช์ S_2 วงจรการทำงานแสดงดังภาพที่ 6 ค)

โหมดการทำงานที่ 4 ($t_4 < t < t_5$) ที่เวลา t_4 สวิตช์ S_2 เริ่มหยุดนำกระแส และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{S2} เพิ่มขึ้นจนถึงครึ่งหนึ่งของแรงดัน V_d ส่วนแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{S3} ลดลงเป็นศูนย์ ไดโอด D_{S4} เริ่มนำกระแส วงจรการทำงานแสดงดังภาพที่ 6 ง)

โหมดการทำงานที่ 5 ($t_5 < t < t_6$) ที่เวลา t_5 กระแสด้านปฐมภูมิจะไหลพรีวิลลิ่งผ่านไดโอด D_{S3} และ D_{S4} ซึ่งสวิตช์ S_3 และสวิตช์ S_4 จะเริ่มนำกระแส ซึ่งเป็นการนำกระแสภายใต้สภาวะแรงดันศูนย์ ZVS วงจรการทำงานแสดงดังภาพที่ 6 จ)

โหมดการทำงานที่ 6 ($t_6 < t < t_7$) ที่เวลา t_6 กระแสในระบบจะไหลกลับข้างโดยจะไหลผ่านสวิตช์ S_3 และสวิตช์ S_4 ทำให้กระแสเข้าสู่โหลดไหลกลับข้างด้วยเช่นกัน ทำให้แรงดันด้านเอาต์พุตตกคร่อมโหลดกลับข้าง สิ้นสุดโหมดการทำงานนี้แรงดันด้านเอาต์พุตตกคร่อมโหลดมีค่าเป็นลบหรืออยู่ในซีกลบของรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต วงจรการทำงานแสดงได้ดังในภาพที่ 6 ฉ)

โหมดการทำงานที่ 7 ($t_7 < t < t_8$) ที่เวลา t_7 สวิตช์ S_3 เริ่มหยุดนำกระแส และสวิตช์ S_4 ยังคงนำกระแส กระแสด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงจะชาร์จประจุ ตัวเก็บประจุ C_{S4} และคายประจุตัวเก็บประจุ C_{S1} ผ่านตัวเก็บประจุ C_{SS} วงจรการทำงานแสดงได้ดังในภาพที่ 6 ช)

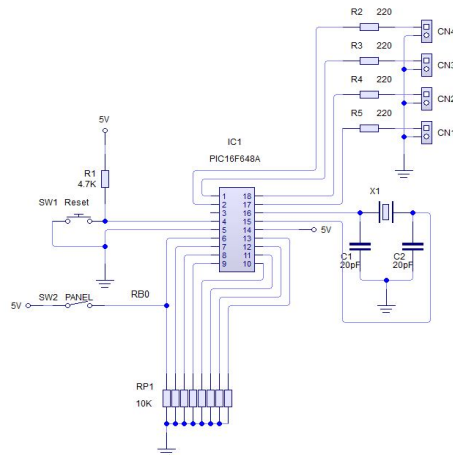
โหมดการทำงานที่ 8 ($t_8 < t < t_9$) ในโหมดการทำงานนี้ ตัวเก็บประจุ C_{S4} และตัวเก็บประจุ C_{S1} ชาร์จประจุและคายประจุเสร็จสิ้นสมบูรณ์ตามลำดับ กระแสด้านปฐมภูมิจะไหลพรีวิลลิ่งผ่านไดโอด D_2 และสวิตช์ S_3 สิ้นสุดเวลานี้ สวิตช์ S_1 จะเริ่มนำกระแส วงจรการทำงานแสดงได้ดังในภาพที่ 6 ซ)

โหมดการทำงานที่ 9 ($t_9 < t < t_{10}$) ที่เวลา t_9 สวิตช์ S_3 หยุดนำกระแส แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{S4} เข้าสู่ครึ่งหนึ่งของแรงดันอินพุต V_d และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{S2} ลดลงจนเป็นศูนย์ ส่วนไดโอด D_{S1} นำกระแส วงจรการทำงานแสดงดังในภาพที่ 6 ฌ)

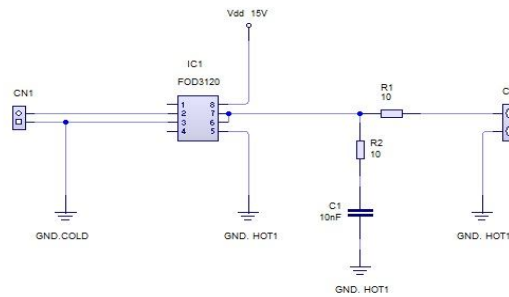
โหมดการทำงานที่ 10 ($t_{10} < t < t_{11}$) ที่เวลา t_{10} กระแสด้านปฐมภูมิจะไหลพรีวิลลิ่งผ่านไดโอด D_{S1} และ D_{S2} ซึ่งสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 จะเริ่มนำกระแสภายใต้สภาวะแรงดันศูนย์ ZVS วงจรการทำงานแสดงดังภาพที่ 6 ฎ)

3.3 วงจรควบคุม

ในงานวิจัยนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F648A เป็นตัวควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ โดยจะสร้างสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มในการควบคุมออกมาทั้งหมด 4 สัญญาณ ขนาดความสูง 0 โวลต์ ถึง 5 โวลต์ ความถี่ 16 กิโลเฮิร์ตต์ วงจรสร้างสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F648A แสดงดังภาพที่ 7 ส่วนวงจรขับขาเกทของโมดูลไอจีบีทีแสดงดังภาพที่ 8 ซึ่งทำหน้าที่รับสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มจากไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F648A มาเพิ่มขนาดของแรงดันพร้อมทั้งแยกกราวด์กันระหว่างภาควงจรกำลังและวงจรควบคุมเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่จะเกิดแก่กันและป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์ โดยใช้ไอซี FOD3120



ภาพที่ 7 วงจรสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F648A



ภาพที่ 8 วงจรขับเกท

4. การออกแบบ

เครื่องต้นแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่นำเสนอ มีการกำหนดคุณลักษณะดังนี้

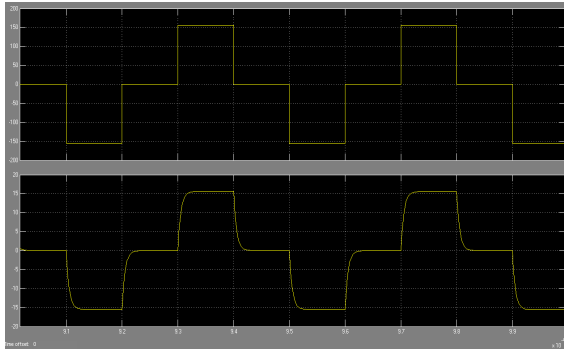
กำลังไฟฟ้าด้านออก (P_o)	3,000 W
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านอินพุต (V_{in})	$310 \pm 5\% V$
แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_{out})	35 V
ความถี่สวิตซิ่ง (f_s)	16 kHz
ดีวตี้ไซเคิล (D)	49 %
มุมเฟส (\square)	45°
อุปกรณ์สวิตช์ (S_1-S_4)	2MBI200L-060 (IGBT MODULE)
ไดโอด D_1, D_2	RHRG30120
ตัวเก็บประจุ C_d	2,200 μF
ตัวเก็บประจุ C_{ss}	3 μF
ตัวเก็บประจุ C_o	2.7 nF
ตัวเก็บประจุ ($C_{s1} - C_{s4}$)	440 pF (Parasitic capacitors of IGBT)
อัตราส่วนหม้อแปลง (n)	$N_p / N_s = 5$ (Transformer cores: EE-110 \times 2 cores)
ขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction coil)	$L_{eq} = 2.4 \mu H$, $R_{eq} = 23 \Omega$

5. ผลการทดสอบและประเมินผล

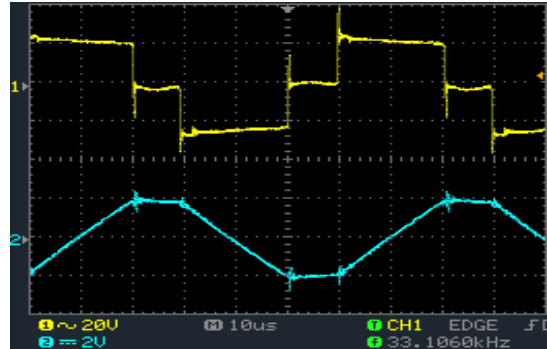
การทดสอบเครื่องหลอมโลหะให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับที่นำเสนอ โดยการทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

5.1 ทดสอบกับโหลดขดลวดเหนี่ยวนำ

ภาพที่ 9 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่แรงดันอินพุต 220 โวลต์ (แรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสตรง 310 โวลต์) โหลดขดลวดเหนี่ยวนำ (ก) จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB /simulink รูปบนเป็นแรงดันและรูปล่างเป็นกระแส ที่ทำงานที่ความถี่สูง (ข) จากการทดลองเครื่องต้นแบบกับโหลดขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศ (ที่ไม่มีโลหะบรรจุในเข้าหลอม)

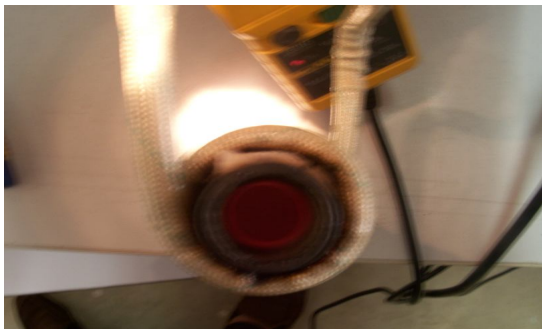


(ก)

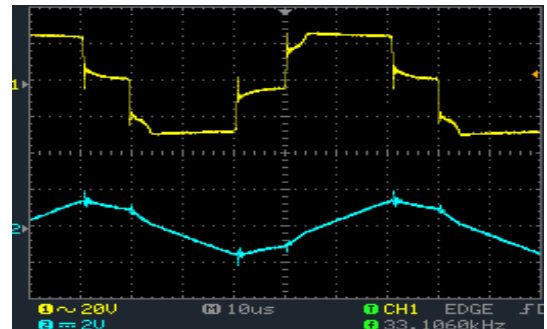


(ข)

ภาพที่ 9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่แรงดันอินพุต 220 โวลต์ โหลดขดลวดเหนี่ยวนำ (ก) จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB /simulink (ข) จากการทดลองเครื่องต้นแบบ



(ก)

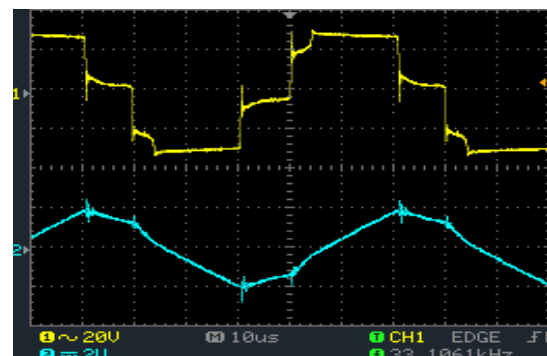


(ข)

ภาพที่ 10 การหลอมตะกั่วที่แรงดันอินพุต 220 โวลต์

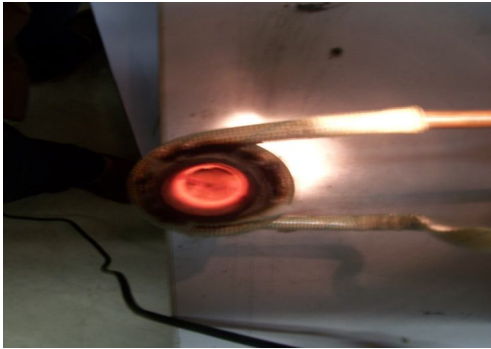


(ก)

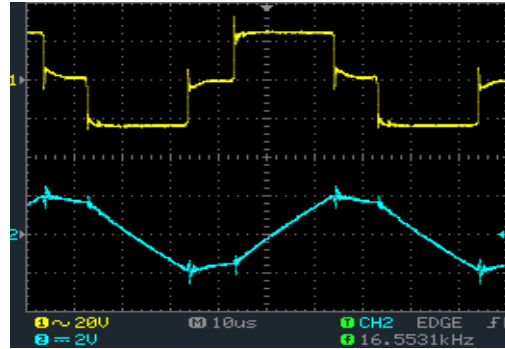


(ข)

ภาพที่ 11 การหลอมอะลูมิเนียมที่แรงดันอินพุต 220 โวลต์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 12 การหลอมเงินที่แรงดันอินพุต 220 โวลต์

5.2 การทดสอบกับโพลิตดลวดเหนี่ยวนำบรรจุโลหะ

การทดสอบเครื่องต้นแบบกับโพลิตที่เป็นโลหะชนิดต่างๆ เช่น ตะกั่ว อะลูมิเนียมและเงิน ตามลำดับ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอินพุต 220 โวลต์ (แรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสตรง 310 โวลต์) ภาพที่ 10 (ก) แสดงการหลอมตะกั่ว (ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสตกคร่อมโพลิต ส่วนภาพที่ 11 (ก) แสดงการหลอมอะลูมิเนียม (ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสตกคร่อมโพลิต และภาพที่ 12 การหลอมเงิน (ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสตกคร่อมโพลิต ส่วนตารางที่ 1 แสดงการทดสอบระยะเวลาของเครื่องต้นแบบด้วยการหลอมโลหะต่างๆ จะเห็นว่าระยะเวลาของการหลอมโลหะจนถึงจุดหลอมละลายของโลหะต่างมากน้อยแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับจุดหลอมเหลวกับโลหะชนิดต่างๆ เช่น ตะกั่วจุดหลอมเหลวเท่ากับ 327.6 °C ส่วนอะลูมิเนียมจุดหลอมเหลวเท่ากับ 660.25 °C และเงินจุดหลอมเหลวเท่ากับ 961 °C

ตารางที่ 1 การทดสอบระยะเวลาของเครื่องต้นแบบด้วยการหลอมโลหะชนิดต่างๆ

ชนิดของโลหะ	มวลของโลหะที่ใช้ในการทดสอบ (กรัม)	ระยะเวลาที่ใช้ในการหลอม (นาที)
ตะกั่ว	10	0.42
อะลูมิเนียม	10	0.55
เงิน	10	1.45

6. สรุปผลการทดสอบ

เครื่องหลอมโลหะให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับที่นำเสนอ ใช้หลักการสร้างไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ที่สภาวะเรโซแนนซ์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กและเกิดกระแสไหลวนขึ้นที่ขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน แล้วสามารถให้ความร้อนแก่เป้าหมายหลอมและหลอมชิ้นงานได้เป็นที่น่าพอใจ โดยวงจรทำงานที่ความถี่สวิตซ์ 16 กิโลเฮิร์ตซ์ พิกัดกำลังไฟฟ้า 3 กิโลวัตต์ โดยไอจีบีทีโมดูล บทความนี้ได้อธิบายหลักการทำงานของวงจร การออกแบบ พร้อมทั้งได้ทำการแสดงผลของการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/simulink และผลของการทดลอง เพื่อเป็นการยืนยันตามแนวคิดที่ได้นำเสนอ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ธรรมฉัตร กงวิรัตน์ และวิริยะ พิเชฐจำเริญ, “การวิเคราะห์อุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงที่มีค่าเพาเวอร์ที่แคเตอร์ด้านเข้าไฟสลับเป็น 1” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29, ชลบุรี, ฉบับที่ 1, 9-10 พฤศจิกายน 2549, หน้า 393-396.
- [2] บัญชา ทิรัญสิงห์, ชาญกิต บัวศรี, ภพ จันทร์เจริญสุข และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, “การออกแบบและวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ LCC สวิตซ์ขณะแรงดันเป็นศูนย์สำหรับการประยุกต์ใช้งานในเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32, ปราชินบุรี, ฉบับที่ 1, 29-30 ตุลาคม 2552.
- [3] A. Jangwanitlert, J. Songboonkaew, W. Thammasiroj and J.C. Balda, “Analysis of Three-Level ZVS PWM Inverter for Induction Heating Applications”, The Proceeding of the IEEE International ROBIO conference, Bangkok, 2006.