RMUTP Research Journal Special Issue
The 5th Rajamangala University of Technology National Conference

# เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบครึ่งบริดจ์สำหรับทองเหลือง

# An Induction Furnace With Half Bridge Resonant Inverter For Brass

**สายชล ชุดเจือจีน[1*] วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ[2] และ วิโรจน์ เพชรพันธุ์ศรี[1]**

[1]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ [2]อาจารย์ ภาควิชาไฟฟ้าและโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพฯ 10120

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องหลอมทองเหลืองแบบใช้หลักการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าในการให้ความร้อนด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบครึ่งบริดจ์ที่มีโหลดต่อแบบอนุกรม โดยการถ่ายเทพลังงานความร้อนผ่านเบ้าหลอมแกรไฟต์ทำให้ทองเหลืองหลอมปริมาณ 300 กรัม ภายในระยะเวลา 10 นาที ระบบมีการควบคุมให้ทำงานที่ความถี่สูงกว่าเรโซแนนซ์ตลอดการทำงาน โดยรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ ผ่านวงจรเรียงกระแสเป็นแรงดันกระแสตรงจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบครึ่งบริดจ์สวิตช์ทำงานที่ความถี่ประมาณ 35 กิโลเฮิรตซ์เป็นแหล่งจ่ายให้กับชุดขดลวดเหนี่ยวนำ มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 4.5 กิโลวัตต์

## Abstract

This research presents the design and construction of molten brass to form the basis of induction heating. It is heated by the half-bridge voltage source in series resonant load by transferring the heat energy through the graphite crucible for 300 grams melting of the brass in 10 minutes. The system is controlled to operate at a higher frequency than the resonance frequency mode with the input three-phase AC voltage 380 V, 50 Hz, through a rectifier into a DC voltage to be supplied to the inverter supply voltage half-bridge about 35 kHz switching frequency at the rated power 4.5 kW

**คำสำคัญ** : อินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ เรโซแนนซ์แบบอนุกรม งานหลอมแบบเหนี่ยวนำ

**Keywords** : Half-bridge resonant inverter, series resonant, induction melting.

[*]*ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ c_somchl2@hotmail.com โทร. 08 9664 6669*

# 1. บทนำ

จากความต้องการของอุตสาหกรรมรถยนต์ อุสาหกรรมหลอมโลหะ ไปจนถึงการหลอมโลหะเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในประเทศไทย มีความจำเป็นที่จะต้องการความร้อนที่ชิ้นงานสูงมาก โดยในปัจจุบันได้มีการนำเอาหลักการของการเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating) มาใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น งานเชื่อม (Brazing) ชุบแข็ง (Surface Hardening) เป็นต้น ซึ่งในแต่ละงานจะเลือกใช้ความถี่ที่แตกต่างกัน [1-3] โลหะที่ใช้หลอมแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ โลหะแบบมีสารแม่เหล็ก เช่น เหล็กที่มีส่วนผสมคาร์บอน เป็นต้นและโลหะไม่มีสารแม่เหล็กซึ่งได้แก่ ทองแดง ดีบุก เงิน ทองเหลืองเป็นต้น ซึ่งพฤติกรรมการหลอมโลหะทั้ง 2 แบบจะแตกต่างกันคือ โลหะแบบไม่มีสารแม่เหล็กจะมีความต้านทานที่ต่ำกว่าโลหะแบบมีสารแม่เหล็กทำให้การหลอมโลหะแบบไม่มีสารแม่เหล็กยากกว่าเนื่องจากอัตราส่วนความต้านทานระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานอุตสาหกรรมเครื่องประดับในชุมชน โดยส่วนใหญ่จะเป็นงานหลอมโลหะที่ไม่มีสารแม่เหล็กซึ่งได้แก่ ทอง ดีบุก เงิน และทองเหลือง

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมานี้ทองเหลืองได้รับความนิยมมากขึ้นในกลุ่มสถาปนิก มัณฑนากร รวมทั้งผู้บริโภคทั่วไป โดยนำมาใช้งานสถาปัตยกรรมและงานตกแต่งภายในทั้งอาคารพาณิชย์และบ้านเรือนได้รับความนิยมทั่วโลก เนื่องจากทองเหลืองเป็นโลหะที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะทั้งทองแดงและสังกะสีซึ่งเป็นส่วนประกอบของทองเหลืองต่างก็ผลิตขึ้นมาด้วยกระบวนการที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ที่สำคัญยิ่งกว่านั้นคือในบรรดาโลหะที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมทั้งหลาย ทองเหลืองจัดเป็นโลหะประเภทหนึ่งที่นำมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด จนแทบจะไม่มีการทิ้งวัสดุหรืออุปกรณ์ทองเหลืองที่ไม่ใช้แล้วไปโดยเปล่าประโยชน์ เพราะสามารถนำกลับมาหลอมใหม่เพื่อใช้ประโยชน์ต่อไปได้อีกหลายครั้ง ปัจจุบันโรงงานด้านอุตสาหกรรมได้นำหลักการเหนี่ยวนำ (Induction Heating) มาใช้ในกระบวนการผลิตอย่างแพร่หลาย เช่น ในงานหลอมโลหะต่างๆซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อหลอมโลหะที่เหลือใช้เพื่อนำกลับไปใช้ใหม่หรือหลอมขึ้นรูปแบบต่างๆตามที่นำไปใช้งานซึ่งในอดีตการหลอมโลหะจะทำโดยใช้เตาหลอมจากเปลวไฟซึ่งจะก่อให้เกิดเขม่าของควันไฟ และไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างสม่ำเสมอ จึงได้มีการพัฒนาเอาหลักการเหนี่ยวนำเข้ามาใช้กระบวนการหลอมโลหะและเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย เพราะไม่มีเขม่าควันไฟจากการเผาไหม้และสามารถลดระยะเวลาในการผลิตได้ การเหนี่ยวนำความร้อนที่ใช้ในงานหลอมโลหะนั้นจะใช้สารกึ่งตัวนำมาเป็นสวิตช์จะทำงานอยู่ในรูปของวงจรอินเวอร์เตอร์ สำหรับงานที่ขนาดกำลังไฟฟ้าไม่สูงมาก เพื่อให้ขนาดของเครื่องไม่ใหญ่โตมาก อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานการเหนี่ยวนำความร้อน

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับงานหลอมทองเหลืองที่เบ้าหลอมแกรไฟต์ด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบครึ่งบริดจ์ที่ถูกควบคุมให้ทำงานที่ความถี่สูงกว่าเรโซแนนซ์เล็กน้อยเพื่อให้เกิดการสูญเสียน้อยสุดซึ่งทำให้สวิตช์ทำงานในโหมดนำกระแสที่แรงดันเป็นศูนย์ โดยจะศึกษาการทำงานที่ความถี่ 33 กิโลเฮิรตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ และมีพิกัดกำลังขนาด 4.5 กิโลวัตต์ สามารถหลอมทองเหลืองปริมาณ 300 กรัม ได้ภายในระยะเวลา 10 นาที

# 2. วิธีการทดลอง

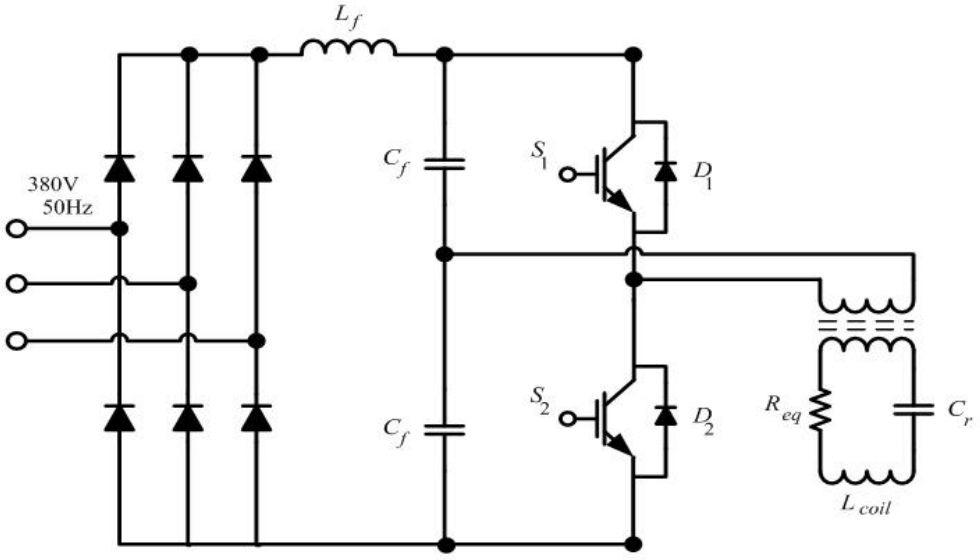
## 2.1 เตาหลอมทองเหลืองแบบเหนี่ยวนำ

2.1.1 ระบบเครื่องหลอมทองเหลืองแบบเหนี่ยวนำ

ในการออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับในโครงงานนี้ ได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนต่างๆ ดังนี้

1. วงจรเรียงกระแส
2. อินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน
3. หม้อแปลงความถี่สูง
4. ชุดโหลดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

ระบบทั้งหมดของเครื่องต้นแบบเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อหลอมทองเหลืองใช้แรงดันด้านเข้า 3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้าด้านเข้าประมาณ 4.5 กิโลวัตต์ จ่ายให้กับวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายเข้าไปยังอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง จ่ายให้หม้อแปลงความถี่สูงเพื่อปรับอิมพีแดนซ์ของโหลดให้เหมาะสมกับกำลังของอินเวอร์เตอร์ และจ่ายเข้าชุดโหลดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ดังแสดงในรูปที่ 1 **โดยที่** $V_{in} = 380V$ , $L_f = 1.35mH$ , $C_f = 220\mu F$ , $C_r = 6\mu F$ , $L_{Coil} = 4.5\mu H$ และ $R_{eq} = 0.123\Omega$



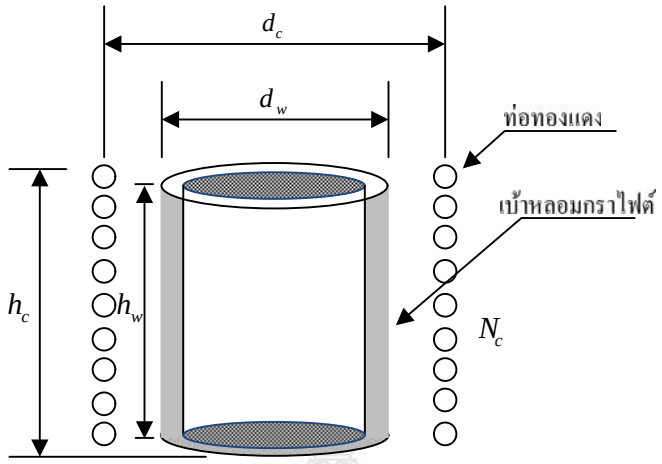

**รูปที่ 1** เตาหลอมทองเหลืองแบบเหนี่ยวนำ

## 2.2 การออกแบบชุดโหลดเรโซแนนซ์

2.2.1 การออกแบบขดเหนี่ยวนำความร้อน ($L_{coil}$)

โดยทั่วไปแล้วขดลวดเหนี่ยวนำจะทำขึ้นจากท่อทองแดงกลวง ทั้งนี้เพราะทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดีทำให้มีกำลังสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำต่ำ ซึ่งจะมีผลทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงอย่างไรก็ดีเนื่องจากความหนาแน่นของกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าสูง ความร้อนที่เกิดจากกระแสที่ไหลในขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่ามาก ดังนั้นจึงต้องใช้ท่อทองแดงกลวง เพื่อให้สามารถระบายความร้อนโดยใช้ของเหลว เช่น น้ำ ผ่านเข้าไปในท่อได้ เป็นต้น

สำหรับเบ้าหลอมแกรไฟต์ที่ใช้เป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. สูง 100 mm. โดยมีระยะห่างระหว่างเบ้าหลอมแกรไฟต์กับผิวภายในของขดลวดเหนี่ยวนำให้เหมาะสมและให้สะดวกในการวางเบ้าหลอม ส่วนขดเหนี่ยวนำเป็นท่อทองแดงกลวงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1/4" สามารถพันได้ทั้งหมด 9 รอบ จากนั้นนำไปเชื่อมต่อกับแผ่นทองแดงเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้า และใช้น้ำระบายความร้อนภายในขดลวดทองแดง เนื่องจากกระแสที่ขดเหนี่ยวนำมีค่าสูง ขดเหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 2




**รูปที่ 2** ขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบและสร้าง

โดยที่ $N_c$ คือ จำนวนรอบของท่อทองแดงขดเหนี่ยวนำ
$h_w$ คือ ความสูงของชิ้นงาน
$h_c$ คือ ความสูงของท่อทองแดงขดเหนี่ยวนำ
$d_c$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อทองแดงขดเหนี่ยวนำ
$d_w$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน

2.2.2 การออกแบบตัวเก็บประจุ ($C_r$)

จากขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบไปในหัวข้อที่ผ่านมานำไปวัดด้วยเครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณ ในโครงงานนี้ได้ใช้เครื่องวัดรุ่น HIOKI 3532-50 LCR HITESTER โดยเลือกใช้ความถี่ที่เครื่องวัดมีอยู่ $33kHz$ ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้มีค่าโดยประมาณ $L_{coil} \approx 4.5«H$ ค่าที่ได้นี้อาจมีความคลาดเคลื่อนจากเครื่องวัด ดังนั้นจึงไปเลือกขนาดของค่าตัวเก็บประจุที่ความถี่เรโซแนนซ์ $33kHz$ ดังนี้

จาก
$$f = \frac{1}{2®\sqrt{LC}}$$

ดังนั้น
$$C_r = \frac{1}{4®^2 f^2 L}$$

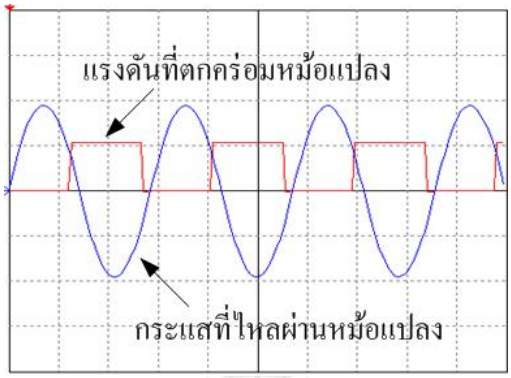
$$C_r = \frac{1}{4®^2 \left(35\times10^3\right)^2 \left(4.5\times10^{-6}\right)}$$

$$C_r \equiv 4.53«F \approx 5«F$$

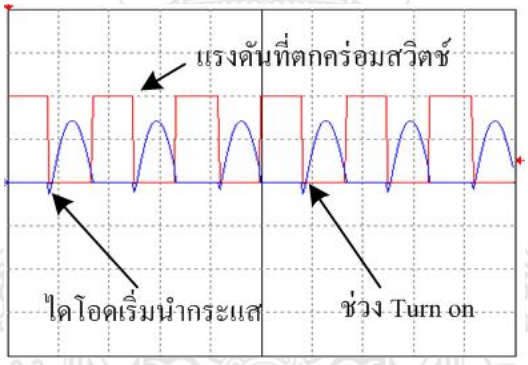
จะได้ค่าตัวเก็บประจุประมาณ $5«F$ เพราะฉะนั้นจะใช้ตัวเก็บประจุขนาด $3«F$ จำนวน 2 ตัว ค่าที่ได้นี้จะต่างกับค่าที่คำนวณได้ เนื่องมาจากค่าของตัวเก็บประจุที่มีใช้อยู่ และลักษณะการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ขดลวดเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่า $6«F$

### 2.3 ผลการจำลองการทำงานเตาหลอมทองเหลืองแบบเหนี่ยวนำ

หลังจากทำการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำและคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมเรียบร้อยแล้วจำทำการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งผลการจำลองถูกแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งผลจำลองแสดงสอดคล้องกับหลักการของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันชนิดครึ่งบริดจ์




**รูปที่ 3** รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมหม้อแปลงและกระแสหลังหม้อแปลงความถี่สูง



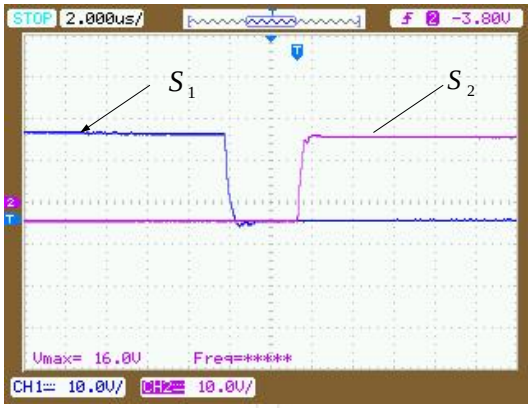

**รูปที่ 4** รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ตกคร่อมสวิตช์

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

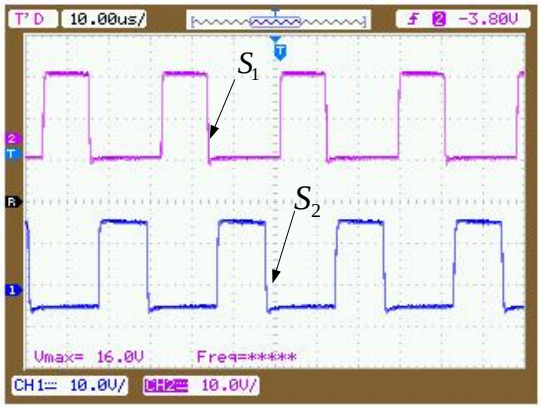
เครื่องต้นแบบถูกออกแบบให้ทำงานที่ความถี่สวิตช์อยู่ในย่าน 33 kHz ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้ แรงดันที่จ่ายเข้าวงจรเรียงกระแส $V_{in} = 380V$ , $L_f = 1.35mH$ , $C_f = 220«F$ , $C_r = 6«F$ , $L_{Coil} = 4.5«H$ และ $R_{eq} = 0.123\Omega$ ทดสอบโดยการให้ความร้อนกับเบ้าหลอมแกรไฟต์ทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร ทำการบันทึกรูปคลื่นแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $v_o$ ) กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $i_o$ ) กำลังไฟฟ้าทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $P_{out}$ ) แรงดันที่ขดเหนี่ยวนำ ( $v_{coil}$ ) และกระแสที่ขดเหนี่ยวนำ ( $i_{coil}$ ) แรงดันที่หลังหม้อแปลงไฟฟ้า ( $v_{tran}$ ) และกระแสที่หลังหม้อแปลงไฟฟ้า ( $i_{tran}$ )

### 3.1 การทดสอบภาคควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์

การทดสอบสัญญาณขับเกตของไอจีบีทีทั้งสองตัวนั้นจะต้องมีช่องว่างของ Dead time อยู่เล็กน้อยเพื่อป้องกันการลัดวงจรของอินเวอร์เตอร์ โดยในที่นี้มีค่าอยู่ประมาณ 3.5 *us* แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเหมาะกับค่า Turn-on delay time และ Turn-off delay time ของไอจีบีที ลักษณะสัญญาณขับไอจีบีทีทั้งสองตัวที่ได้จากการวัดแสดงในรูปที่ 6



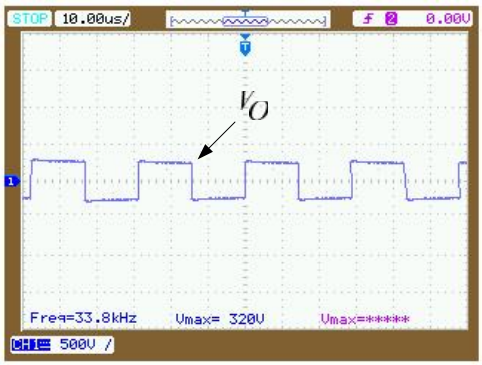

**รูปที่ 5** รูปสัญญาณขับไอจีบีที 2 ตัว และแสดงช่วง Dead Time




**รูปที่ 6** รูปสัญญาณขับไอจีบีที 2 ตัว ในอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันครึ่งบริดจ์

## 3.2 การทดสอบภาคควบคุมกำลังโดยการทดสอบสภาวะไม่มีโหลด

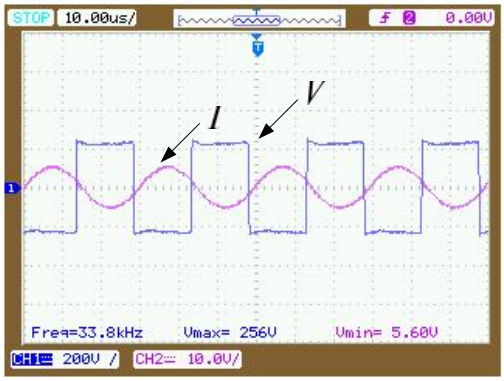
ดประสงค์เพื่อตรวจสอบการทำงานของวงจรควบคุมกำลังในสภาวะไม่มีโหลดเพื่อทดสอบสวิตซ์ไอจีบีทีที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบครึ่งบริดจ์โดยวัดสัญญาณรูปคลื่นออกจากด้านเอาท์พุทซึ่งสัญญาณที่ได้แสดงในรูปที่ 7



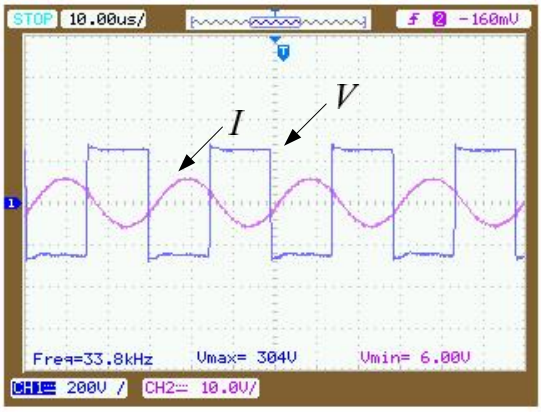

**รูปที่ 7** รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่เอาท์พุทจากการทดสอบในสภาวะไม่มีโหลด

### 3.3 การทดสอบการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน

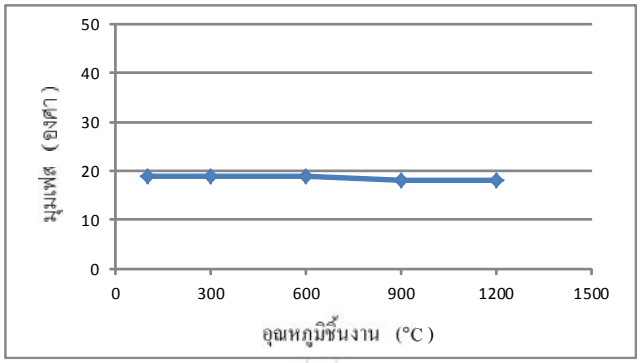
จุดประสงค์เพื่อทดสอบการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้มีกระแสด้านขาออกให้ไม่เกินจากค่าที่ตั้งไว้โดยการเลื่อนมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสออกไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชิ้นงาน เช่น ความต้านทานจำเพาะและความซึมซาบแม่เหล็กสัมพันธ์ ทำให้ค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง การทดสอบวัดอุณหภูมิตั้งแต่เริ่มตั้งแต่ 100 – 1200 °C โดยศึกษาการทำงานของอินเวอร์เตอร์มีมุมเฟสของแรงดันนำหน้ากระแสตลอดเวลา เพื่อทำการทดสอบเฟสเมื่อค่าพารามิเตอร์ของโหลดมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 8 – 11




**รูปที่ 8** รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสที่ออกจากเอาท์พุทควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์มีมุมเฟสของแรงดันนำหน้ากระแสคงที่จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C




**รูปที่ 9** รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสที่ออกจากเอาท์พุทควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์มีมุมเฟสของแรงดันนำหน้ากระแสคงที่จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 1200 °C




**รูปที่ 10** กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฟสแปรผันตามอุณหภูมิ

จากรูปที่ 10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฟสแปรผันตามอุณหภูมิซึ่งแสดงให้เห็นว่ามุมเฟสมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และทำการวัดอุณหภูมิที่เบ้าหลอมได้ประมาณ 1280 องศาแสดงดังรูปที่ 11

**รูปที่ 11** วัดความร้อนอุณหภูมิของทองเหลืองหลังทำการเหนี่ยวนำด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟาเรด

## 4. สรุป

การทำงานของเครื่องหลอมทองเหลืองแบบเหนี่ยวนำความร้อนโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบครึ่งบริดจ์ สามารถให้หลอมทองเหลืองหลอมปริมาณ 300 กรัม ภายในระยะเวลา 10 นาที ที่กำลังไฟฟ้า 4.5 กิโลวัตต์ การทำงานที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ทำให้สามารถให้ความร้อนมีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีการทำงานของสวิตช์นำกระแสที่แรงดันเป็นศูนย์ทำให้การสูญเสียที่สวิตช์น้อย การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสระหว่างกระแสและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยขณะให้ความร้อนชิ้นงานเนื่องชิ้นงานเป็นโลหะชนิดไม่มีสารแม่เหล็ก

## 5. เอกสารอ้างอิง

สายชล ชุดเจือจีน. 2547. **เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสแบบเต็มบริดจ์สำหรับงานขึ้นรูปโลหะ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธีรพงษ์ จันทร์สว่าง, เริงชัย สุขวงษ์จันทร์. 2552. **เครื่องหลอมดีบุกแบบเหนี่ยวนำความร้อน.** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.

ภาณุพงษ์ ขุนจ่าศาล, ศุภธัช จินตนายากานนท์. 2553. **เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับชุบแข็งผิว.** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.

วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ สายชล ชุดเจือจีน วิโรจน์ เพชรพันธุ์ศรี บุญญฤทธิ์ ทองจันทร์ และอนุชิต โชคชัยลิขิตสกุล 2555. **การมอดูเลตความหนาแน่นพัลส์เพื่อควบคุมกำลังในเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสำหรับชุบแข็ง.** UTK ENGINEERING JOURNAL ISSN 2286 – 8097 หน้า 7-11

S. Chudjuarjeen, A. Sangswang, and C. Koompai, An improved LLC resonant inverterfor induction heating applications with asymmetrical control. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 7, pp. 2915–2925, Jul. 2011.

Nam-Ju Park, Dong-Yun Lee, and Dong-Seok Hyun, 2007, .A Power-Control Scheme with Constant Switching Frequency in Class-D Inverter for Induction-Heating Jar Application. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 3, pp. 1252-1260.

Ahmed, N, 2011, High Frequency Soft Switching AC Conversion Circuit with Dual Mode PWM/PDM Control Strategy for High Power IH Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, No. 4, pp. 1440–1448.