

เครื่องหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำขนาดเล็กทำงานด้วยความหนาแน่นพัลส์

A SMALL INDUCTION FURNACE WITH PULSE DENSITY MODULATION

อนุวัฒน์ จางวนิชเดช *

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ เครื่องหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำขนาด 1.58 kW 75 kHz วงจรอนุกรมแบบเรโซโนนซ์ เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก อาศัยความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงโดยให้กระแสไฟฟ้าสับความถี่สูงไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ จะมีผลให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำที่บ้าหลอมและถ่ายเทความร้อนไปยังโลหะ โดยใช้หลักการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยด้วยความหนาแน่นพัลส์ ซึ่งจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงาน

บทความนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ทำลังงานของทางไฟฟ้า เปรียบเทียบกับผลจากเครื่องมือวัดและแสดงรูปคลื่นเพื่อยืนยันกับผลทางทฤษฎี เครื่องหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำให้กำลังงานที่พิกัดและสามารถให้อุณหภูมิที่บ้าหลอมได้ถึง 862 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัวภายในระยะเวลา 7.2 นาที

Abstract

This paper presents a 1.58 kW, 75 kHz induction furnace with series resonance used in small industries. The principle of this depends on induction heating from high frequency electromagnetic. The high frequency electric currents pass through induction coil so as to induce current at crucible and transfer heat into metal. The control uses average voltage which is from pulse density modulation generated from microcontroller.

In addition to, this paper analyzes output power compared with the results from the instrument and the waveforms are shown to verify the theory. An Induction furnace gives rated output power and makes temperature rise to 862 °C at crucible in steady state within 7.2 min.

* อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กทม. 10520

1. บทนำ

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ สามารถแบ่งตามความถี่ในการใช้งานได้ดังนี้ ความถี่สูงมักนำไปใช้ในการชุบพิวเพ็งเหล็ก ความถี่ต่ำและความถี่ปานกลางใช้ในการขีดรูปโลหะหรือหลอมโลหะ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความลึกผิวของโลหะดังนี้คือ

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (1)$$

โดยที่ δ คือ ค่าความลึกผิว (skin depth)

ρ คือ ความหนาแน่นของโลหะ

μ คือ ค่าความซึมซาบของโลหะ

ω คือ ความถี่ซึ่งมุมphaseที่ใช้งาน = $2\pi f$

ถ้าจะพิจารณาในการหลอมโลหะ โดยการเหนี่ยวนำโดยใช้ความถี่ปานกลางหรือความถี่ต่ำ โดยมากมักออกแบบให้คลื่นไฟฟ้าที่ให้กับเบ้าหลอม มีการต่อโดยตรงกับอินเวอร์เตอร์ เพราะถ้าจะใช้มือแปลงจะต้องพิจารณาในเรื่องแกนของหม้อแปลงว่ามีการสูญเสียมากน้อยเท่าใด สำหรับมือแปลงแกนเหล็กและการใช้หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์ ไม่เหมาะสมนักเนื่องจากขนาดแกนที่มีให้กันในปัจจุบันมีขนาดเล็ก มีค่าความหนาแน่นสูงและมีความถี่สูงกว่าเดิม เนื่องจากแกนเหล็ก ซึ่งมักจะเหมาะสมกับการใช้งานที่มีความถี่สูงมากกว่า [1]

จากปัญหาดังกล่าว การหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ จึงออกแบบที่ความถี่สูงโดยอาศัยมือแปลงแกนเฟอร์ไรต์ เป็นตัวส่งกำลังงาน และให้มีกำลังมากพอที่จะให้ความร้อนแก่เบ้าหลอม (เฟอร์ไรต์) เพื่อถ่ายเทความร้อนที่ได้ให้แก่โลหะที่ต้องการหลอม

นอกจากปัญหาดังกล่าวแล้ว ยังมีปัญหาในการควบคุมกำลังงานให้กับโหลด ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้การควบคุมแบบความถี่ พัลส์วิคเมอคูลาชัน (PWM) การควบคุมเฟส (phase-shift control) การควบคุมดิวตี้ (duty control) แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมลักษณะดังกล่าว จะมี

การสูญเสียเพิ่มขึ้นในการสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ และมีสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากการลื้นช้ำของความถี่สูง และที่อุปกรณ์ในการสวิตช์จะไม่เริ่มนำกระแส และหยุดนำกระแสที่สภาวะกระแสเป็นศูนย์ (zero current) [2]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเน้นการควบคุมกำลังงานไปที่โหลดด้วยการควบคุมแบบความหนาแน่นพัลส์ (Pulse Density Modulation; PDM) ซึ่งจะให้ข้อดีดังนี้คือ ความถี่ในการทำงานของอินเวอร์เตอร์ไม่เปลี่ยน และการทำงานจะเริ่มนำกระแสที่ศูนย์ของสวิตช์ (Zero Current Switch; ZCS) ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียในช่วงการสวิตช์

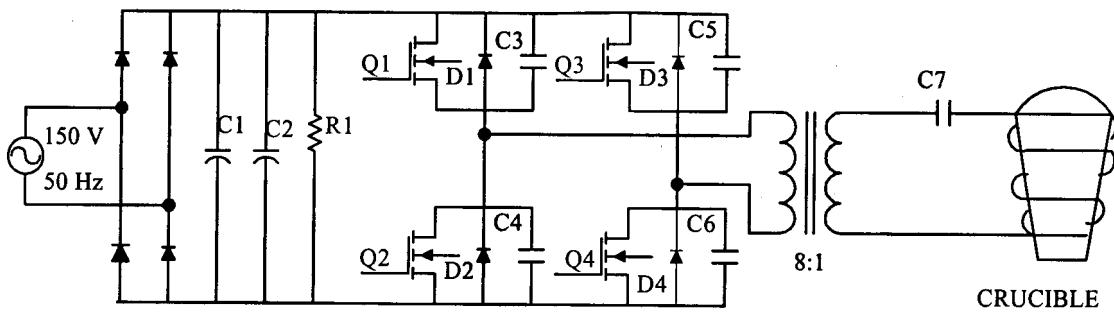
2. หลักการของระบบ

รูปที่ 1 แสดงระบบของเครื่องหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแส โดยใช้ไดโอดแบบบริดจ์ วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงซึ่งเป็นวงจรแหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage Source) โดยใช้มอเตอร์กำลังเป็นสวิตช์ ทำงานด้วยความถี่สูง 75 kHz ต่อ วงจรแบบบริดจ์เติม (Full-Bridge) ข้ามอกของอินเวอร์เตอร์ต่อเข้ากับหม้อแปลงกำลังความถี่สูงอัตราส่วนหม้อแปลง 8:1 และเป็นวงจรแบบอนุกรมเรโซแนนซ์ (Series Resonance) ส่งผ่านกำลังงานสู่เบ้าหลอมที่ทำมาจากสารกราไฟต์ ซึ่งถือว่าเป็นสารแม่เหล็ก (ferromagnetic material) ดังนั้นจึงสามารถถ่ายเทพลังงานความร้อนที่ได้ไปยังโลหะที่ใช้หลอมได้ง่าย กว่าเนื่องจากโลหะที่ใช้หลอมไม่ใช่สารแม่เหล็ก (Nonferromagnetic material)

3. การออกแบบ

3.1 การออกแบบคลื่นไฟฟ้าความร้อน

ในการออกแบบคลื่นไฟฟ้าความร้อนนั้นต้องพิจารณาจากเบ้าหลอมก่อน โดยทำการวัดขนาดของเบ้าหลอม แล้วจึงออกแบบคลื่นไฟฟ้าให้มีความกว้าง



รูปที่ 1 ระบบของหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ

โดยที่ $C_1 = 3000 \mu\text{F} 500 \text{ V}$, $C_2 = 0.47 \mu\text{F} 630 \text{ V}$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega 20\text{W}$, Q1-Q4 เบอร์ FCA50BC50,
 D1-D4 เบอร์ 60HFU, $\text{C3-C6} = 2200 \text{ pF} 1000 \text{ V}$, $\text{C7} = 1 \mu\text{F} 500 \text{ V}$

เส้นผ่านศูนย์กลางให้พอดีที่จะสอดเข้าหลอมลงไปได้ อุปกรณ์ที่ใช้เป็นเบ้าหลอม (crucible) เป็นคาร์บอนที่เรียกว่ากราไฟต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 4.2 ซม. หนา 8 มม สูง 12.5 ซม. มีเซรามิกเป็นผนังหุ้มเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 7.2 ซม. โดยการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำใช้ท่อทองแดงกลวงเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 6.5 มม. หนา 2 มม. นำมารัดเป็นคอยล์ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.2 ซม. และความสูง 9 ซม. เพื่อจะได้ให้เบ้าหลอมส่วนเข้าไปพอดีในขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อให้การถ่ายเทพลังงานจากขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนไปยังเบ้าหลอมได้รับพลังงานสูงสุด

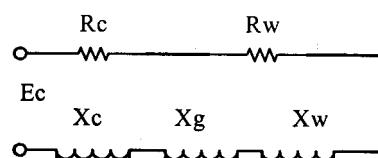
สภาพการทำงานของขดลวดเหนี่ยวน้ำจะมีกระแสไฟฟ้าสูงไหลผ่านจึงทำให้มีอุณหภูมิที่ขดลวดเหนี่ยวนามีอุณหภูมิสูงด้วย จึงได้ทำการหล่อเย็นด้วยน้ำหล่อเย็นผ่านท่อทองแดงดังกล่าว เพื่อเป็นการระบายความร้อนในขดลวดเหนี่ยวน้ำ

การหาค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ของขดลวดเหนี่ยวน้ำ ได้จากสมการ $L(\mu\text{H})$ [3]

$$L(\mu\text{H}) = \frac{0.394 r^2 N^2}{9r + 10l} \quad (2)$$

โดยที่ r คือ รัศมีของขดลวด 3.6 ซม.
 N คือ จำนวนรอบที่พัน 10 รอบ
 L คือ ความสูงของขดลวด 9 ซม.

ดังนั้นจะได้ว่า $L = 4.17 \mu\text{H}$ ซึ่งเป็นค่าความเหนี่ยวน้ำแกนอากาศ เมื่อนำขดลวดเหนี่ยวน้าไปวัดค่า R , L ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวน้ำ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์อินพิดเอนซ์ (Impedance Analyzer) ในการหาพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวน้ำ ที่สร้างขึ้นมาที่ความถี่ต่างๆ จะได้ว่าที่ความถี่ 75 kHz เป็นความถี่ที่ให้ค่า $L = 4.17 \mu\text{H}$, $R = 0.24 \Omega$ ซึ่งจะถือว่าเป็นความถี่ที่เหมาะสมต่อการใช้งานและได้ทำการวัดเพิ่มเติมเพื่อหาค่า L , R ของเบ้าหลอมปรากฏว่า L เบ้าหลอมรวมกับ L ของว่างอากาศ = $4.86 \mu\text{H}$, R ขดลวดรวมกับเบ้าหลอม = 0.452Ω ดังนั้นจะได้ว่าวงจรสมมูลทางไฟฟ้าจะเป็นดังนี้ [4]



รูปที่ 2 วงจรสมมูลโหลดทางไฟฟ้า

โดยที่ R_c = ความต้านทานของคลื่น Ω

R_w = ความต้านทานของเบ้าหลอม Ω

X_c = รีแอคแทนซ์ของคลื่น Ω

X_g = รีแอคแทนซ์ของช่องว่างอากาศ Ω

X_w = รีแอคแทนซ์ของเบ้าหลอม Ω

3.2 การออกแบบให้เกิดวงจรอนุกรมแบบเรโซแนนซ์

จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าประกอบไปด้วยตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ ที่ความถี่ 75 kHz จะให้ตัวประกอนกำลังที่ได้เท่ากับ 0.18 ซึ่งมีค่าต่ำ ดังนั้นการทำให้ตัวประกอนกำลังของระบบมีค่ามากขึ้น และเพื่อให้เกิดวงจรอนุกรมแบบเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 75 kHz จะต้องใช้ค่า C ตามสมการ [5]

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} \quad (3)$$

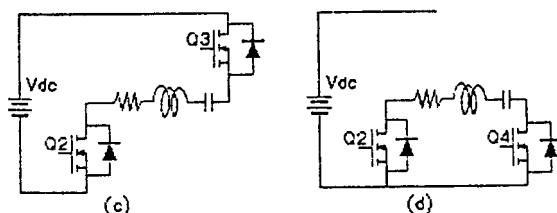
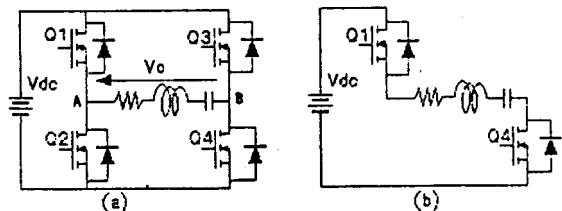
ดังนั้นจะได้ $C = 0.93 \mu F$ โดยจะใช้ C ที่มีค่าใกล้เคียงคือ $1 \mu F$ ต่ออนุกรณฑ์ค้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

4. หลักการความหนาแน่นของพัลส์ (PDM)

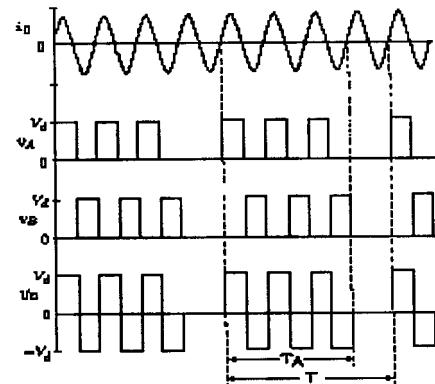
ในอินเวอร์เตอร์มีการสวิตช์เพียง 2 โหมดเท่านั้น โหมด 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3 (b,c) ขณะที่ PDM ที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์จะมีโหมดที่ 3 ดังในรูป 3(d) เพิ่มเติมเข้ามาซึ่งจะให้แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์มีค่าเป็นศูนย์ในโหมดที่ 3 นี้กระแสเรโซแนนซ์จะไหลอย่างต่อเนื่องที่ mosfet ก็ง่าลง และได้โอดกิงล่ามด้านใดด้านหนึ่ง

รูปที่ 4 แสดงรูปแบบการสวิตช์ของ PDM เพื่อให้ได้อินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีขนาด (amplitude) V_d สำหรับ 3 รอบเรโซแนนซ์ และแสดงแหล่งจ่ายแรงดันที่เป็นศูนย์สำหรับ 1 รอบด้วยการจ่ายออก 4 รอบเรโซแนนซ์ แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์จะมีแรงดันเฉลี่ยวๆ ออก $3/4$ รอบ ของ การทำงานเต็มกำลัง กำลังงานขาออกของอินเวอร์เตอร์สามารถที่จะถูกควบคุมด้วย PDM ของแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (square wave) ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับการควบคุม

ความถี่ PDM สามารถที่จะลดการสูญเสียในการสวิตช์ ได้มากกว่า เพราะมอสเฟตกำลังถูกเปิดและปิดที่กระแสค่าเป็นศูนย์ตลอดเวลา (Zero Current) [6]



รูปที่ 3 โหมดการทำงานในอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4 ด้าวอย่างรูปแบบการสวิตช์ของ PDM

5. การวิเคราะห์กำลังงานทางด้านขาออก (Analysis of Output Power)

เมื่อกระแสเรโซแนนซ์และแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ในวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยจะพิจารณาส่วนประกอบหลักนูน (fundamental component) ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ของแรงดันจะได้ สมการ การพิจารณาดังนี้

$$L \frac{di_o}{dt} + \frac{1}{C} \int i_o dt + ri_o = \frac{4Vd}{\pi} \sin \omega t \quad (4)$$

การทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ $\omega_r = 1/\sqrt{LC}$

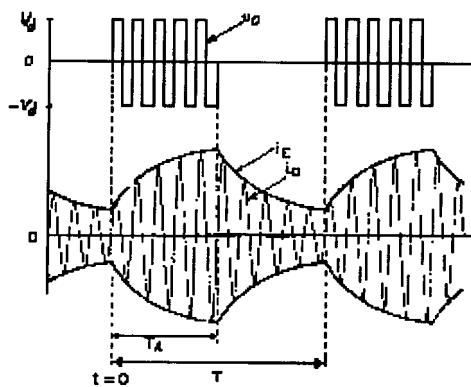
สมมติว่า $2\omega_r L / r = 2Q \gg 1$

กระแสเรโซแนนซ์จะมีค่า

$$i_o = \frac{4Vd}{\pi r} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \sin \omega_r t \quad (5)$$

$$\text{โดยที่ } \tau = \frac{2L}{r} = \frac{2Q}{\omega_r}$$

Q คือตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor)



รูปที่ 5 รูปคลื่นแรงดันและกระแสในรูปแบบ PDM

ในรูปที่ 5 ได้แสดงถึงแรงดันและกระแสขาออก ซึ่งช่วงในการให้แรงดันขาออก T_A เมื่อเทียบกับความเวลา T จะได้ว่า

$$i_E(t) = Imax(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + I_{EO}e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 0 \leq t \leq T_A \quad (6)$$

$$i_E(t) = i_E(T_A)e^{-\frac{t-T_A}{\tau}} \quad T_A \leq t \leq T \quad (7)$$

$$I_{EO} = Imax \frac{1 - e^{-\frac{T_A}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}}$$

โดยที่ $Imax$ คือ กระแสสูงสุดใน PDM และที่ $T_A/T = 1$

I_{EO} คือ ค่าเริ่มต้นของกระแส i_E

ค่าเฉลี่ยของกำลังขาออก $P_{out} = \frac{1}{T} \int_{T_0}^T v_o i_o dt$

$$P_{out} = \frac{1}{T} \int_0^{T_A} \frac{4}{\pi} Vd \sin \omega_r t \cdot i_E(t) \sin(\omega_r t - \phi) dt \quad (8)$$

โดยที่ ϕ คือ มุมที่กระแสล้าหลังแรงดัน

เนื่องจาก $\tau \gg 1/\omega_r$ ดังนั้น สมการ (8) จะเปลี่ยนเป็น

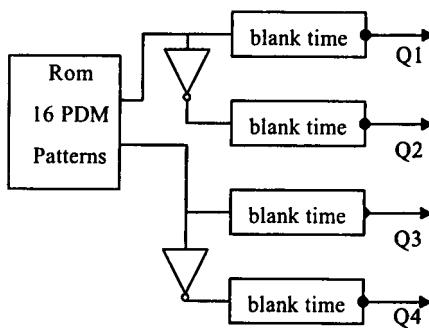
$$P_{out} = \frac{2}{\pi} Vd \cos \phi \frac{1}{T} \int_0^{T_A} i_E(t) dt \quad (9)$$

$$P_{out} = P_{max} \left\{ \frac{T_A}{T} + \frac{\tau}{T} \left(\frac{1 - e^{-\frac{T_A}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \right) \left(e^{-\frac{T_A}{\tau}} - e^{-\frac{T}{\tau}} \right) \right\} \quad (10)$$

โดยที่ $P_{max} = (2/\pi)Vd Imax \cos \phi$

6. ภาคความคุณการขับเกตของมอสเฟตกำลัง

เป็นภาคกำเนิดสัญญาณพัลส์เพื่อใช้ในการขับนำเกตให้กับมอสเฟต ทำงานหรือหยุดนำกระแส ตามสัญญาณพัลส์ที่สร้างขึ้น โดยรูปแบบของสัญญาณพัลส์ที่สร้างขึ้นจะอยู่ในหน่วยความจำที่สามารถอ่านได้เพียงอย่างเดียว (ROM) ซึ่งถูกเลือกรูปแบบและสร้างเป็นสัญญาณพัลส์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8031 ในการควบคุมการทำงานของระบบเพื่อกำเนิดสัญญาณความหนาแน่นของพัลส์ (PDM) เพื่อความคุณการขับเกตให้กับมอสเฟต โดยสัญญาณที่ออกมากจากบอร์ดในไมโครคอนโทรลเลอร์มี 4 ชุด มีช่วงเวลาเพื่อไว้ในโปรแกรม (Blank Time) ดังแสดงเป็นบล็อกໄ/docegramของวงจรความคุณในรูปที่ 6 โดยมีรูปแบบความหนาแน่นพัลส์ 16 รูปแบบ ถูกบันทึกลงใน ROM มีค่า 16 เท่าของความเวลาเรโซแนนซ์ (ในที่นี้ 16 เท่าจะมีความถี่เท่ากับ 75 กิโลเฮิรตซ์) รูปแบบ PDM ที่ได้แสดงดังในรูปที่ 7



รูปที่ 6 วงจรควบคุม

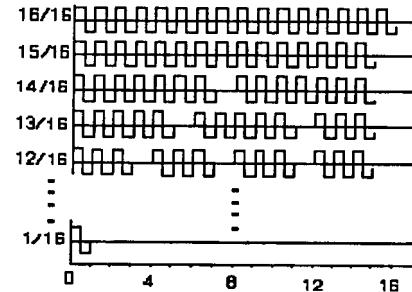
7. ผลการทดลอง

ทำการบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่คำแนะนำต่างๆ ของเครื่องหลอมโลหะโดยการเห็นช่วงเวลา โดยใช้หน้าจอแสดงผลค่าได้ 1 เฟส (variac) ปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาเข้าของวงจรเรียงกระแส และให้วงจรขับนำมอสเฟตทำงานที่ความถี่ 75 kHz และปรับรูปแบบความหนาแน่นพัลส์ตั้งแต่ 1/16 ถึง 16/16 แล้วทำการวัดสัญญาณและรูปคลื่นที่จุดต่างๆ ในที่นี้ขอแสดงเพียงรูปคลื่นที่สำคัญๆ และจำเป็นต่อการวิเคราะห์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 14/16 และ 16/16 โดยที่

V_{in}	คือ แรงดันขาเข้าจากไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz
I_{in}	คือ กระแสขาเข้าจากไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz
PF(in)	คือ ตัวประกอบกำลังขาเข้า
Pin	คือ กำลังงานด้านขาเข้า
V_{pri}	คือ แรงดันขดปฐมนิยมของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง
V_{sec}	คือ แรงดันขดทุกนิยมของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง
PF(out)	คือ ตัวประกอบกำลังขาออก
P_{out}	คือ กำลังงานด้านขาออก
η	คือ ประสิทธิภาพของระบบ

ทดสอบกับโลหะที่ใช้ในการหลอม

ที่กำลังงาน 1.585 kW ที่ PDM 16/16 ใช้เวลาประมาณ 7.2 นาที จนทำให้อุณหภูมิที่เบ้าหลอมโลหะอยู่ในสภาพคงตัวได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 862 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถหลอมโลหะ เช่น อะลูมิเนียมได้ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ 660 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7 รูปแบบ PDM ใน ROM

8. สรุปและวิจารณ์

เครื่องหลอมโลหะโดยการเห็นช่วงนำทำงานด้วยหลักการความหนาแน่นของพัลส์ เพื่อควบคุมการทำงานให้มีอสเฟตในวงจรบริจจ์เติมในอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะเป็นการปรับกำลังเอาเด็พุต ที่ส่งออกไปยังเบ้าหลอมของระบบเครื่องหลอมโลหะด้วยการเห็นช่วงนำ โดยมีกำลังด้านขาออกเติมที่ 1.44 kW ทำงานด้วยความถี่ 75 kHz และหลักการ PDM ข้างช่วยลดลงกำลังการสูญเสียที่เกิดขึ้นในสวิตช์ทำให้ประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณ ประมาณ 88% ที่พิสูจน์

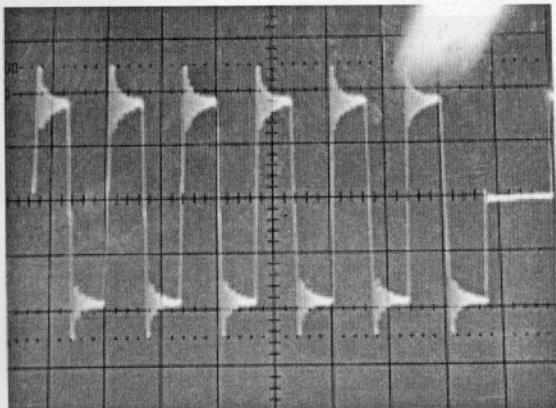
ผลการทดลองที่ได้จากการคำนวณจากสมการ (10) และการวัดจะมีค่าแตกต่างกันบ้างเนื่องจากเบ้าหลอมอยู่ในภาชนะที่ทำด้วยปูนซึ่งจะเก็บความร้อนได้ดี และขณะที่ทำการทดลองอุณหภูมิภายนอกค่อนข้างสูง ทำให้การวัดสูงกว่าการคำนวณ

9. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเครื่องหลอมโลหะโดยการเห็นช่วงนำที่สร้างขึ้นเป็นเครื่องต้นแบบขังต้องได้รับการพัฒนาดึงระดับหนึ่ง ซึ่งถ้าเพิ่มกำลังงานด้านขาเข้ามากขึ้น ก็จะทำให้กำลังงานด้านขาออกมีมากขึ้นตาม จนอุณหภูมิของเบ้าถึง 1064 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมทอง ซึ่งจะทำให้เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาการหลอมทองในอนาคต

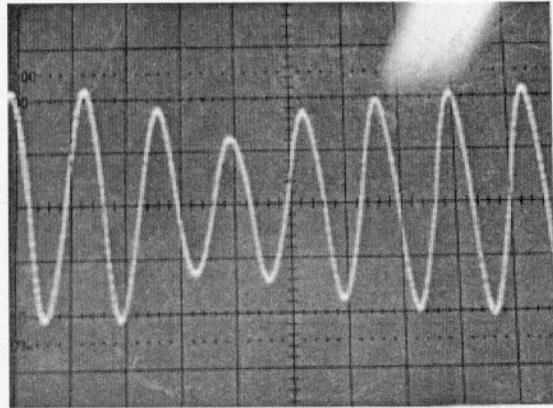
ตารางที่ 1 การทดสอบเครื่องหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ ที่ความหนาแน่นพัลส์ 14/16

Vin(V)	Iin(A)	PF(in)	Pin(kW)	Vpri(V)	Ipri(V)	Vsec(V)	Isec(A)	PF(out)	Pout(kW)	%η
25.3	2.83	0.72	0.052	40	1.4	5	9.9	0.98	0.049	93.3
50.6	5.27	0.75	0.2	75	2.3	9.5	18.4	0.98	0.171	85.7
75.5	7.43	0.77	0.44	105	3.3	14	26.2	0.98	0.359	81.7
100.3	9.8	0.77	0.77	130	4.7	17	36.8	0.98	0.613	79.6
124.9	12.4	0.78	1.22	160	6.4	22	45.7	0.98	0.984	80.8
150.3	15.7	0.78	1.8	195	7.8	24	60.1	0.98	1.414	78.5



รูปที่ 8 แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์

volt/div = 100 V, time/div = 10 μS



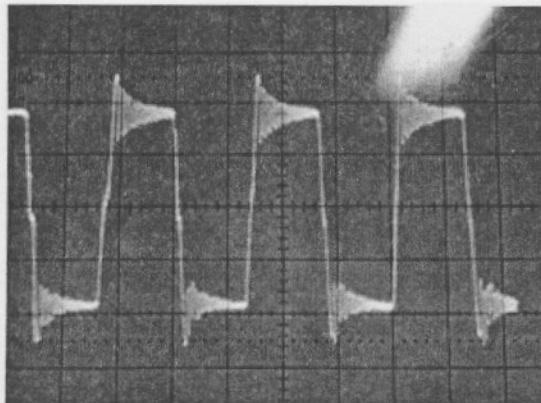
รูปที่ 9 กระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์

แอมป์/ช่อง = 5, time/div = 10 μS

จากผลการทดลอง ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัด และค่าที่ได้จากการคำนวณที่กำลังงานขาออกที่ได้จากสมการที่ (10) ค่ากำลังงานที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า กล่าวคือมีค่าเป็น 0.8 เท่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ

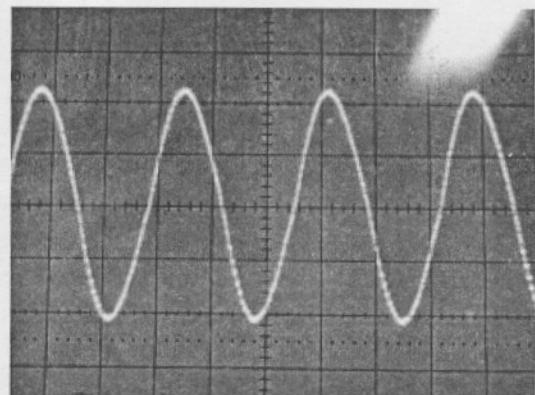
ตารางที่ 2 การทดสอบเครื่องหลอมโลหะโดยการเห็นข้าม ที่ความหนาแน่นพัลส์ 16/16

Vin(V)	Iin(A)	PF(in)	Pin(kW)	Vpri(V)	Ipri(A)	Vsec(V)	Isec(A)	PF(out)	Pout(kW)	%η
25.2	2.56	0.71	0.045	36	1.3	4.5	9.9	0.98	0.044	97.1
50	4.18	0.76	0.16	68	2.6	8	19.8	0.98	0.155	97
75.3	6.2	0.78	0.36	95	3.8	13	26.9	0.98	0.343	95.2
100	8.55	0.78	0.67	130	4.9	17	37.5	0.98	0.643	93.2
125.2	10.9	0.78	1.07	160	6.4	21	48.1	0.98	1.037	92.5
150.1	15.3	0.78	1.8	200	8.5	26	62.2	0.98	1.585	88



รูปที่ 10 แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์

volt/div = 100, time/div = 5 μS



รูปที่ 11 กระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์

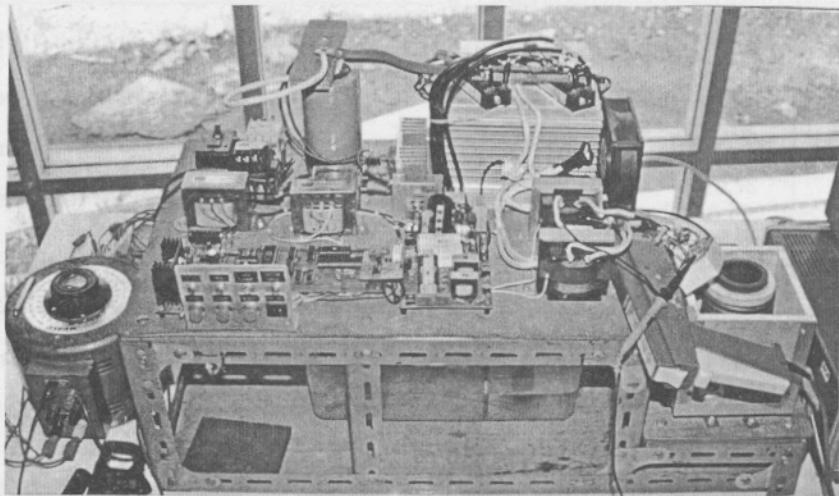
แอมป์/ช่อง = 5, time/div = 5 μS

จากผลการทดลอง ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัด และค่าที่ได้จากการคำนวณที่กำลังงานขาออกที่ได้จากสมการที่ (10) ค่ากำลังงานที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า กล่าวคือมีค่าเป็น 0.9 เท่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ

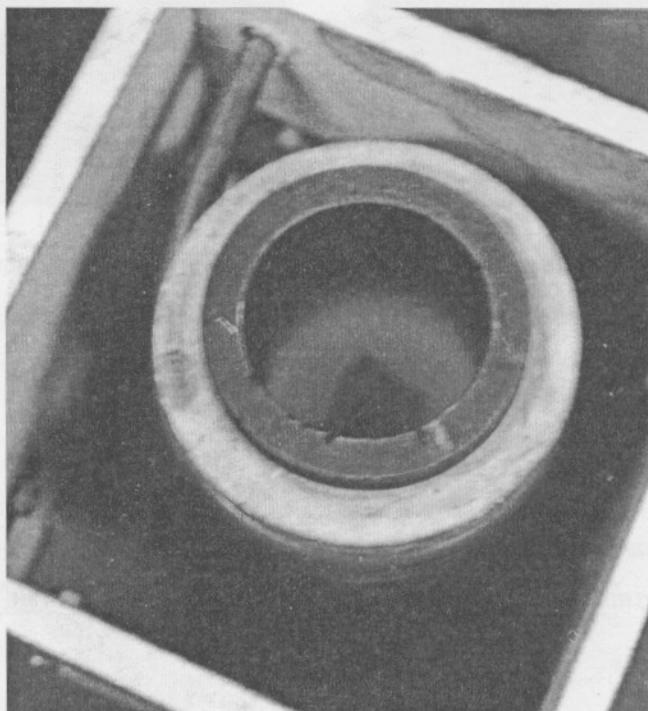
10. เอกสารอ้างอิง

- [1] อนุวัฒน์ จางนิชเลิศ และยุทธนา กุลวิทิต, “เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับการลดความเครียดในแท่งเหล็ก.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2537, หน้า 14-18.
- [2] H. Akagi, T. Sawae and A.Nabae, “130 kHz 7.5 kW Current Source Inverter using Static induction transistors for Induction Heating Applications.” **IEEE Trans. Power Electronics.**, Vol 3, No.3, 1988, pp 303-309.
- [3] P. Neittaanmaki, M. Rudnicki and A. Savini, **Inverse Problems and Optimal Design in Electricity and Magnetism.**, Clarendon Press: Oxford, 1996.
- [4] J. Davies and P. Simpson, **Induction Heating Handbook.**, McGraw-Hill, 1979, pp.3-47.
- [5] P.P. Roy, S.R. Doraldla and S. Deb., “Analysis of the series resonance converter using a frequency domain.” **IEEE/PESC Rec.**, 1991, pp.482-489.
- [6] H. Fujita and H. Akagi, “Pulse Density-Modulated Power Control of a 4 kW, 450 kHz Voltage Source Inverter.” **IEEE Trans. Industry Applications.**, Vol.32, No.2, 1996, pp.279-286.

11. ภาคผนวก



รูปที่ 12 เครื่องหลอมโลหะด้วยการเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้น



รูปที่ 13 เบ้าหลอมอะลูมิเนียมสูงจนร้อนแดงสามารถหลอมอะลูมิเนียม