

ภาคผนวก ก
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- 1) มงคล บุญยง, วัชรพล วรรณสนธิ์, ประชา คำภักดี, วรการ วงศ์สายเชื้อ และสุริยา โชคสวัสดิ์, “การออกแบบและสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์,” การประชุมวิชาการ ม.อบ.วิจัย ครั้งที่ 3, 28-29 กรกฎาคม 2552, หน้า 232-239
- 2) กรกช เทียกสิบุญ, กิตติ เจริญทัศน์, วรการ วงศ์สายเชื้อ, ประชา คำภักดี และสุริยา โชคสวัสดิ์, “การควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล,” การประชุมวิชาการ มอบ.วิจัย ครั้งที่ 4, 9-10 สิงหาคม 2553, หน้า 268-274

การออกแบบและสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Design and Implementation of Induction Heater Controlled by Microcontroller

มงคล บุญยัง¹, วิชวล วัฒนะสนธิ¹, ประชา คำภักดิ์¹, วรการ วงศ์สายเชื้อ¹, และ สุริยา โชคสวัสดิ์²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ในส่วนของวงจรควบคุมเลือกใช้เทคนิคการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ ระบบถูกออกแบบเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งคลื่นและจัดวงจรเรโซแนนซ์เป็นแบบอนุกรมทางต้านเอาท์พุทโดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง โดยระบบสามารถที่จะปรับกำลังไฟฟ้าได้ด้วยการปรับความถี่ในการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนที่สร้างขึ้นสามารถปรับกำลังไฟฟ้าได้โดยใช้สัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์โดยปรับค่าความถี่ได้จาก 20 kHz - 30 kHz คำสำคัญ เครื่องเหนี่ยวนำความร้อน วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งคลื่น วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

Abstract

This research presents the design and implementation of an induction heater controlled by a microcontroller. The controlling technique is pulse width modulation. The system is designed by using a half bridge inverter in series resonant output circuit via a high frequency transformer. The power can be controlled by varying the switching frequency of the inverter. The testing results show that the power of the prototype can be changed by the control signals from the microcontroller. The frequency can be adjusted between 20 kHz - 30 kHz.

Keywords: induction heater, half bridge inverter, series resonant circuit

บทนำ

ในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนนั้นวิธีการทำอยู่หลายวิธี วิธีหนึ่งที่คุ้นเคยกันดีคือการให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อน โดยความร้อนที่ได้นั้นมาจากกระแสไฟฟ้าความถี่ต่ำ (50 เฮิรตซ์) ที่ไหลอยู่ในขดลวดทำให้เกิดความร้อน ซึ่งวิธีนี้มีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากมีความสูญเสียค่อนข้างมากในขดลวด ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาเป็นการให้ความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า หลักการของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำคือทำให้กระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลผ่านขดลวด ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กความถี่สูงตัดผ่านชิ้นงานและเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานนั้น [1] ซึ่งกระแสไฟฟ้าความถี่สูงจะทำให้ความร้อนส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน การถ่ายเทพลังงานจากขดลวดมายังชิ้นงานจะเกิดขึ้นกับชิ้นงานที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเท่านั้นโดยที่ขดลวดและชิ้นงานไม่ต้องสัมผัสกัน ทำให้ปลอดภัยในการใช้งาน เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง เช่น การเผาโลหะ การชุบแข็งโลหะ การเชื่อมโลหะ การหลอมโลหะ [2] หรือใช้เป็นเตาหุงต้ม

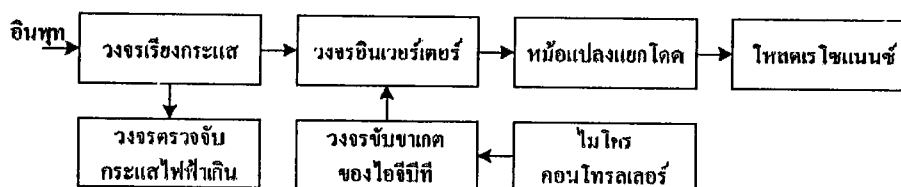
ในการที่จะทำให้อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพที่ดีนั้นจำเป็นต้องมีระบบควบคุมที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยทั่วไปการควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจะใช้วงจรรวมหรือไอซีต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือเมื่อลักษณะงานเปลี่ยนแปลงไปก็ต้องเปลี่ยนไอซีหรือเปลี่ยนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้การควบคุมเหมาะสมกับงานที่เปลี่ยนไปนั้น ทำให้ไม่สะดวกในการใช้งาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแทน เนื่องจากสามารถแก้ไขเพียงโปรแกรมในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เมื่องานมีลักษณะเปลี่ยนไปโดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ทำให้สะดวกกับการใช้งานมากขึ้น อีกทั้งยังง่ายต่อการเพิ่มความสามารถพิเศษอื่นๆ เช่น ระบบเฝ้าระวังและป้องกัน เป็นต้น

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนขนาดเล็กที่ให้กำลังงานความร้อนไม่เกิน 100 W ซึ่งสามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้าได้โดยใช้สัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์โดยปรับค่าความถี่ได้จาก 20 kHz - 30 kHz

อุปกรณ์และวิธีการ**1 โครงสร้างโดยรวมของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์**

แผนผังของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานของแต่ละส่วนดังต่อไปนี้



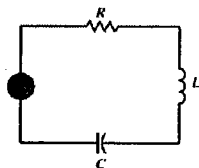
รูปที่ 1 แผนผังของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์



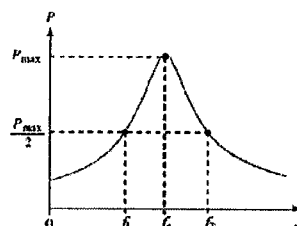
- 1) วงจรเรียงกระแส ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
- 2) วงจรอินเวอร์เตอร์ จะแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 20 kHz - 30 kHz ซึ่งวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นแบบครึ่งคลื่น
- 3) หม้อแปลงแยกโดด มีหน้าที่หลักในการแยกโหลดเรโซแนนซ์และวงจรอินเวอร์เตอร์ออกจากกันเพื่อป้องกันความเสียหายในกรณีที่เกิดการลัดวงจร และยังทำหน้าที่ลดทอนแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงที่จะจ่ายให้โหลดเรโซแนนซ์เพิ่มมากขึ้น
- 4) โหลดเรโซแนนซ์ ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำซึ่งต่อกันแบบอนุกรม ที่สภาวะเรโซแนนซ์ กระแสจะไหลผ่านโหลดมากที่สุดทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ในการทดลองจะใช้เฉพาะตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเท่านั้นเนื่องจากมีค่าความต้านทานแฝงอยู่ในตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำอยู่แล้ว
- 5) วงจรขับเคลื่อนของไอจีบีที อุปกรณ์สวิตชิงไอจีบีทีซึ่งอยู่ในวงจรอินเวอร์เตอร์จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีสัญญาณมาขับเคลื่อน และสัญญาณที่จะนำมาขับเคลื่อนจะต้องอยู่ภายใต้ข้อกำหนดที่ไอจีบีทีต้องการด้วย เช่น ต้องสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการซาร์จขาเกตได้ ซึ่งสัญญาณควบคุมที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถนำมาขับเคลื่อนของไอจีบีทีได้โดยตรง จึงต้องมีวงจรขยายสัญญาณให้สูงขึ้นเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการของขาเกตไอจีบีที
- 6) วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าเกิน ทำหน้าที่ป้องกันอุปกรณ์ไอจีบีทีไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าที่สูงเกินไป โดยใช้ Current Transducer เป็นตัววัดกระแสไฟฟ้าที่จะผ่านเข้าไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่ง Current Transducer จะแปลงกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าแล้วส่งต่อไปยังชุดป้องกันเพื่อตัดวงจรทั้งหมดเมื่อกระแสไฟฟ้าเกิน
- 7) ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นส่วนสร้างสัญญาณที่จะนำไปขับเคลื่อนขาเกตของไอจีบีที ซึ่งในโครงการนี้ได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล ARM7-LPC2148 [3] มาสร้างสัญญาณนี้โดยใช้เทคนิคการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ (PWM: Pulse Width Modulation)

2 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและกำลังไฟฟ้าสูงสุด

วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม [4] ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2 ค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจร คือ $Z = R + j(X_L - X_C)$ สภาวะเรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นเมื่อค่าอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์หรือ $X_L = X_C$ ความถี่ที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์มีค่าเท่ากับ $f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรมีค่าต่ำที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 3 และกำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงกว่าหรือต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์



รูปที่ 2 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังไฟฟ้าของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

3 การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

กำลังไฟฟ้าของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมถูกควบคุมโดยการปรับความถี่สวิตชิงของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งคลื่น ซึ่งจะได้อัตราการสวิตชิงสูงสุดเมื่อความถี่สวิตชิงมีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ และกำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงกว่าหรือต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ในการปรับความถี่สวิตชิงนั้นจะใช้สัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล ARM7-LPC2148 ทางพอร์ท PWM2 และ PWM4 สามารถปรับความถี่ได้จากรีจิสเตอร์ PWMMR0 และปรับ duty cycle ได้จากรีจิสเตอร์ PWMMR1 ถึง PWMMR4 ตัวอย่างเช่น เมื่อต้องการความถี่สวิตชิง $f_s = 25$ kHz และ duty cycle = 40% สามารถกำหนดค่าของรีจิสเตอร์ได้ดังนี้

$$PWMMR0 = \frac{PCLK}{2f_s} = \frac{30,000,000}{2(25,000)} = 600 \text{ เมื่อ PCLK คือ ความถี่ของไมโครคอนโทรลเลอร์}$$

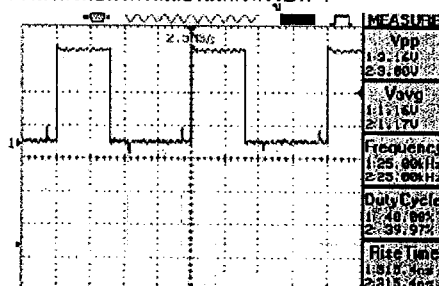
PWMMR1 = 60 ใช้กำหนดจุดที่สัญญาณ PWM2 เปลี่ยนจาก 0 เป็น 1

PWMMR2 = 300 ใช้กำหนดจุดที่สัญญาณ PWM2 เปลี่ยนจาก 1 เป็น 0

PWMMR3 = 360 ใช้กำหนดจุดที่สัญญาณ PWM4 เปลี่ยนจาก 0 เป็น 1

PWMMR4 = 600 ใช้กำหนดจุดที่สัญญาณ PWM4 เปลี่ยนจาก 1 เป็น 0

สัญญาณ PWM2 และ PWM4 ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปที่ 4

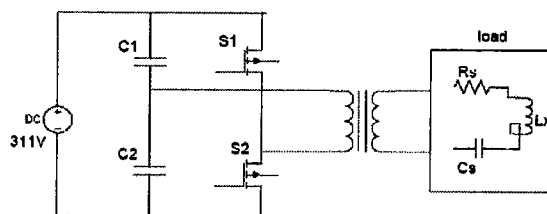


รูปที่ 4 สัญญาณ PWM2 (รูปบน) และ PWM4 (รูปล่าง) ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์

ผลการทดลอง

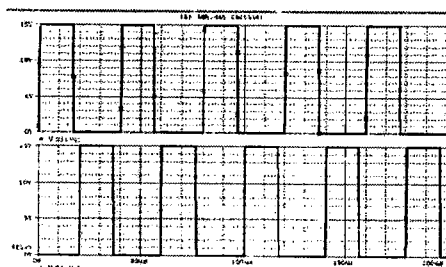
1 จำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม

วงจรอินเวอร์เตอร์ หม้อแปลงแยกโอด และโหลดเรโซแนนซ์ ถูกจำลองขึ้นด้วยโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 5 โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตเป็น 311 V ซึ่งเป็นการสมมติว่าได้ผ่านวงจรเรียงกระแสมาแล้ว พารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าดังนี้ คือ duty cycle = 40%, $f_s = 25 \text{ kHz}$, $R_s = 0.94 \ \Omega$, $L_x = 128 \ \mu\text{H}$, $C_s = 0.3 \ \mu\text{F}$ ซึ่งจะได้ $f_r = 1/(2\pi\sqrt{128 \ \mu\text{H} \times 0.3 \ \mu\text{F}}) = 25.68 \text{ kHz}$ สวิตช์ที่ใช้ในการจำลองเลือกใช้สวิตช์ที่เป็นแบบอุดมคติแทนไอจีบีที สัญญาณขับขาเกทไอจีบีที แรงดันตกคร่อมหม้อแปลง แรงดันตกคร่อมโหลด และกระแสผ่านโหลด แสดงในรูปที่ 6 ถึง 9



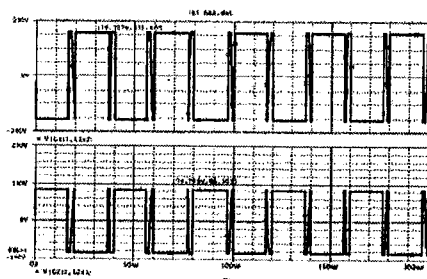
รูปที่ 5 วงจรที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม

จากรูปที่ 6 จุดที่ทำการวัดสัญญาณ คือ วัดคร่อมขาเกทไอจีบีทีของสวิตช์ทั้งสองตัว จะเห็นได้จากสัญญาณว่า สวิตช์ S1 และสวิตช์ S2 จะสลับกันทำงาน โดยที่เมื่อสวิตช์ S1 ทำงาน S2 จะไม่ทำงาน และเมื่อสวิตช์ S2 ทำงาน S1 จะไม่ทำงาน



รูปที่ 6 สัญญาณจำลองขับขาเกทไอจีบีทีของสวิตช์

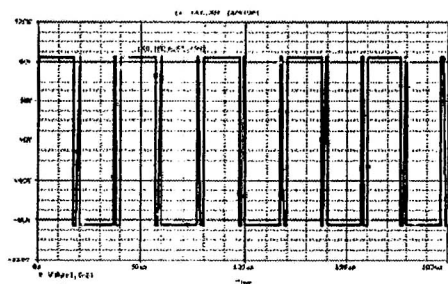
S1 (รูปบน) และ S2 (รูปล่าง)



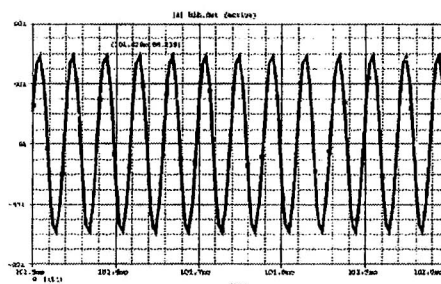
รูปที่ 7 สัญญาณแรงดันตกคร่อมหม้อแปลง

ต้านปรุณภูมิ (รูปบน) และต้านทุติยภูมิ (รูปล่าง)

สัญญาณแรงดันตกคร่อมหม้อแปลงจากรูปที่ 7 จะเห็นว่า สัญญาณที่ได้เป็นรูปสัญญาณพัลส์ที่มีทั้งซิกบวกลบและซิกลบที่เกิดจากการสวิตช์ แต่แรงดันในต้านหุติยภูมิจะมีค่าน้อยกว่าแรงดันต้านปฐมภูมิ เพราะในการออกแบบหม้อแปลงได้ออกแบบให้เป็นหม้อแปลงลดทอนแรงดัน โดยฝั่งปฐมภูมิวัดค่าได้ 155.485 V และฝั่งหุติยภูมิวัดค่าได้ 85.305 V ซึ่งในการออกแบบหม้อแปลงลดทอนแรงดัน ได้ออกแบบให้อัตราส่วนระหว่างหม้อแปลงมีค่าเป็น 1.83 เท่า



รูปที่ 8 สัญญาณจำลองแรงดันตกคร่อมโวลต์

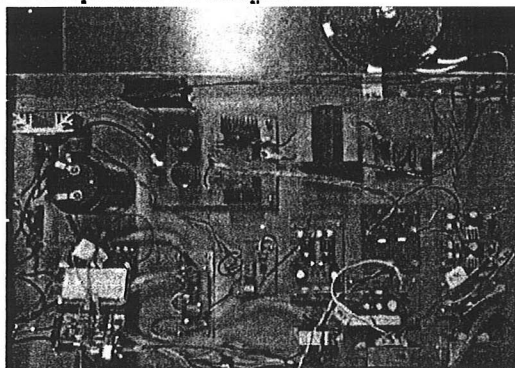


รูปที่ 9 สัญญาณจำลองกระแสที่ไหลผ่านโวลต์

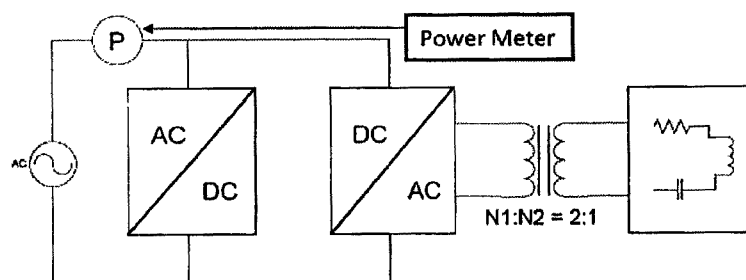
จากรูปที่ 8 สัญญาณแรงดันตกคร่อมโวลต์ที่ได้เป็นรูปสัญญาณพัลส์ที่มีทั้งซิกบวกลบและซิกลบที่มีค่า 85.259 V ซึ่งค่าแรงดันตกคร่อมโวลต์นั้นใกล้เคียงกันกับค่าแรงดันตกคร่อมขดลวดหุติยภูมิของหม้อแปลง ส่วนรูปที่ 9 จะเห็นว่าสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านโวลต์นั้นจะเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีค่า 58 A_{peak}

2 ทดสอบปรับค่ากำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่

หลังจากการจำลองด้วยโปรแกรมแล้ว วงจรต่างๆ ได้ถูกสร้างขึ้นมาประกอบเป็นเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนดังรูปที่ 10 เพื่อทดสอบปรับค่ากำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่โดยกำหนดให้ duty cycle = 40%, $f_s = 20$ kHz - 30 kHz ซึ่งครอบคลุมความถี่เรโซแนนซ์ 25.68 kHz ใช้หม้อแปลงที่มีอัตราส่วนรอบเป็น 2:1 แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตเท่ากับ 120 V แล้วต่อ Power Meter เข้ากับวงจรดังรูปที่ 11 เพื่อวัดค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต(P_i) ค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุต(V_i) และค่ากระแสไฟฟ้าอินพุต(I_i) ซึ่งค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 1 และความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สวิตชิ่งกับค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตแสดงดังกราฟในรูปที่ 12



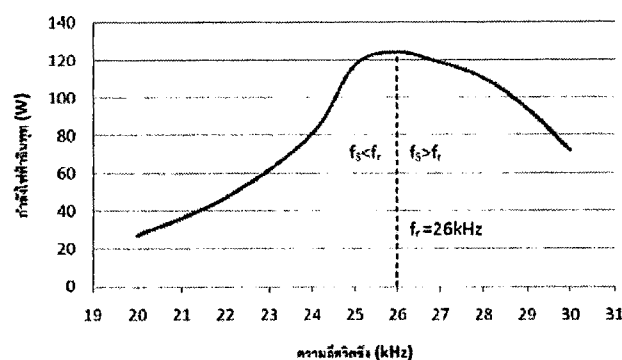
รูปที่ 10 เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สร้างขึ้น



รูปที่ 11 การต่อ Power Meter เพื่อวัดค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต ค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุต และค่ากระแสไฟฟ้าอินพุต

ตารางที่ 1 กำลังไฟฟ้าอินพุต แรงดันไฟฟ้าอินพุต และกระแสไฟฟ้าอินพุตเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 120 V ที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งต่างๆ กัน

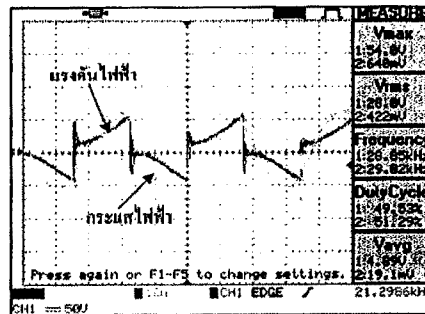
f_s (kHz)	P_i (W)	V_i (V)	I_i (A)
20	27.1	119.6	0.367
22	47.1	121.1	0.524
24	80.9	121.7	1.017
25	117.3	120.5	1.342
26	124.2	120.6	1.448
27	118.7	120.4	1.400
28	110.4	120.2	1.360
29	94.1	122.0	1.133
30	71.9	120.1	0.943



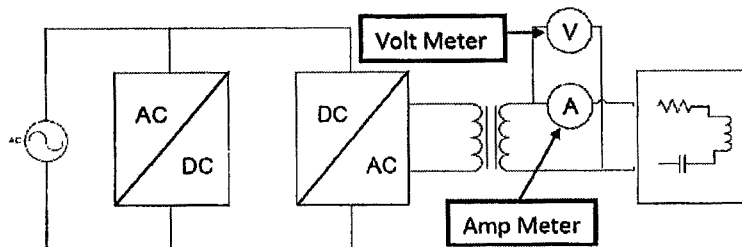
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สวิตซ์ซึ่งกับค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 120 V

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 12 จะเห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเท่ากับ 26 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ทำให้กำลังไฟฟ้าอินพุตมีค่าสูงสุด คือ 124.2 W ที่ความถี่สูงกว่าหรือต่ำกว่า 26 kHz กำลังไฟฟ้าอินพุตจะมีค่าลดลง ซึ่งกราฟที่ได้มีความคล้ายคลึงกับกราฟในทางทฤษฎีในรูปที่ 3 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสที่ไหลผ่านโหลดแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งวัดสัญญาณโดยใช้ฮอสซิลโลสโคปเป็น volt meter และใช้ current probe เป็น amp meter ดังแสดงในรูปที่ 14 สัญญาณแรงดันและกระแสที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณจำลองในรูปที่ 8

และ 9 อันเนื่องมาจากการสวิตช์ของไอจีบีที เนื่องจากผู้วิจัยไม่มีเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าที่ความถี่สูงจึงไม่สามารถวัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตซึ่งมีความถี่ 20 kHz - 30 kHz ได้



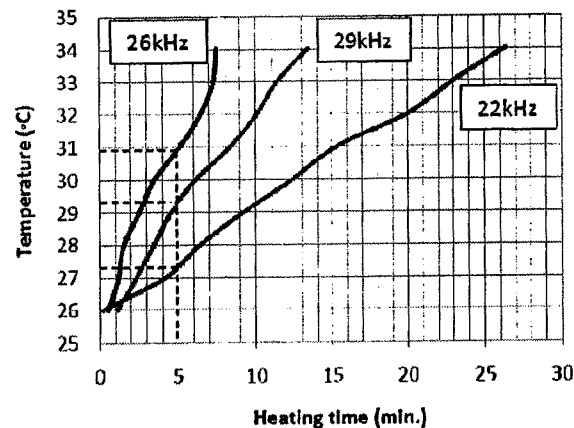
รูปที่ 13 สัญญาณแรงดันตกคร่อมโพลและกระแสที่ไหลผ่านโพล



รูปที่ 14 การวัดสัญญาณแรงดันตกคร่อมโพลและกระแสที่ไหลผ่านโพล

3 ทดสอบการให้ความร้อนกับน้ำที่ความถี่ต่าง ๆ

หลังจากทดสอบปรับค่ากำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่แล้ว เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนต้นแบบได้ถูกนำมาให้ความร้อนกับน้ำ 1 ลิตรจากอุณหภูมิ 26°C ถึง 34°C โดยกำหนดให้ duty cycle = 40%, $f_s = 22\text{ kHz}$, 26 kHz, และ 29 kHz ใช้หม้อแปลงที่มีอัตราส่วนรอบเป็น 2:1 แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตเท่ากับ 120 V ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต ค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุต และค่ากระแสไฟฟ้าอินพุตที่ได้จะมีค่าเท่ากับค่าที่แสดงในตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปที่ความถี่ 22 kHz, 26 kHz, และ 29 kHz แสดงดังกราฟในรูปที่ 15



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปที่ความถี่ 22 kHz, 26 kHz, และ 29 kHz

จากรูปที่ 15 จะเห็นว่าที่ความถี่ 26 kHz ใช้เวลาในการให้ความร้อน 7 นาทีเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจาก 26°C ถึง 34°C ในขณะที่ความถี่ 29 kHz และ 22 kHz ใช้เวลา 13 นาทีและ 26 นาทีตามลำดับ แสดงว่าที่ความถี่ 26 kHz ซึ่งเป็นความถี่เรโซแนนซ์ เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดและที่ความถี่ 29 kHz และ 22 kHz ให้กำลังไฟฟาลดลงตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังไฟฟ้าจากตารางที่ 1 คือ $P_{26\text{ kHz}} (124.2\text{ W}) > P_{29\text{ kHz}} (94.1\text{ W}) > P_{22\text{ kHz}} (47.1\text{ W})$ อย่างไรก็ตามที่พิกัดกำลังไฟฟ้าอินพุตสูงสุด 124.2 W นั้นสามารถให้พลังงานความร้อนออกมาเพียง 29.3 kJ หรือคิดเป็นกำลังงานความร้อนเอาต์พุต 62.75 W จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าเท่ากับ 50.5% ซึ่งยังถือว่ามีค่าต่ำเนื่องจากหม้อแปลงและขดลวดเหนี่ยวนำยังมีค่าไม่เหมาะสม

บทสรุป

เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนที่ออกแบบและสร้างขึ้นประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งคลื่นและวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนความถี่สวิตชิงของอินเวอร์เตอร์โดยใช้สัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7-LPC2148 และสามารถนำเครื่องต้นแบบไปประยุกต์ใช้เป็นเตาหุงต้มได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบในเบื้องต้น เครื่องต้นแบบจึงยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ซึ่งยังคงต้องมีการพัฒนาต่อไปเพื่อปรับปรุงให้ดีขึ้นทั้งในด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, and M. Black, *Handbook of Induction Heating*, Marcel Dekker, New York, 2002.
- [2] Linn High Therm, *Induction Heating Devices for High Frequency Induction Soldering, Brazing and Joining*, 1994.
- [3] Philips Semiconductors, *LPC214x User Manual*, 15 August 2005.
- [4] Allan H. Robbins and Wilhelm C. Miller, *Circuit Analysis: Theory And Practice*, Delmar/Thomson Learning, Albany, NY, 2000.

การควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล Induction Heater Control by Digital Signal Processor

กรกช เทียนสินธุ์¹ กิตติ เจริญทัศน์¹ วรการ วงศ์สายเชื้อ¹ ประชา คำภักดี¹ และ สุริยา ไชยสวัสดิ์²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

* E-mail: worakarn_w@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้ประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งคลื่นและวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม การควบคุมกำลังไฟฟ้าใช้เทคนิคการปรับความถี่ในการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ผ่านตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้าให้อยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ได้โดยอัตโนมัติในช่วงความถี่ 23 kHz - 28 kHz

คำสำคัญ : เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

Abstract

This research presents induction heater control by digital signal processor. The induction heater is composed of a half bridge inverter and a series resonant circuit. The power can be controlled by varying the switching frequency of the inverter via the digital signal processor. The testing results show that the power of the induction heater is in resonant operation automatically in the range of 23 kHz - 28 kHz.

Keywords: induction heater, series resonant circuit, digital signal processor

บทนำ

ในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนนั้นมีการทำอยู่หลายวิธี วิธีหนึ่งที่คุ้นเคยกันดีคือการให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อน โดยความร้อนที่ได้นั้นมาจากกระแสไฟฟ้าความถี่ต่ำ (50 Hz) ที่ไหลอยู่ในขดลวดทำให้ขดลวดร้อน ซึ่งวิธีนี้มีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากมีความสูญเสียค่อนข้างมากในขดลวด ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาเป็นการให้ความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า หลักการของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำคือทำให้กระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลผ่านขดลวด ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กความถี่สูงตัดผ่านชิ้นงานและเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานนั้น [1] ซึ่งกระแสไฟฟ้าความถี่สูงจะให้ความร้อนส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน การถ่ายเทพลังงานจากขดลวดมายังชิ้นงานจะเกิดขึ้นกับชิ้นงานที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเท่านั้นโดยที่ขดลวดและชิ้นงานไม่ต้องสัมผัสกัน ทำให้ปลอดภัยในการใช้งาน เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง เช่น การเผาโลหะ การชุบแข็งโลหะ การเชื่อมโลหะ การหลอมโลหะ [2] หรือใช้เป็นเตาหุงต้ม

ในการที่จะทำให้เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพที่ดีนั้นจำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์ควบคุมที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยทั่วไปการควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจะใช้วงจรรวมหรือไอซีต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือเมื่อลักษณะงานเปลี่ยนแปลงไปก็ต้องเปลี่ยนไอซีหรือเปลี่ยนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้การควบคุมเหมาะสมกับงานที่เปลี่ยนไปนั้น ทำให้ไม่สะดวกในการใช้งาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในการ

ควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแทน เนื่องจากสามารถแก้ไขเพียงโปรแกรมในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเมื่องานมีลักษณะเปลี่ยนไปโดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ทำให้สะดวกกับการใช้งานมากขึ้น อีกทั้งยังง่ายต่อการเพิ่มความสามารถพิเศษอื่นๆ เช่น ระบบเผื่อระวังและป้องกัน เป็นต้น

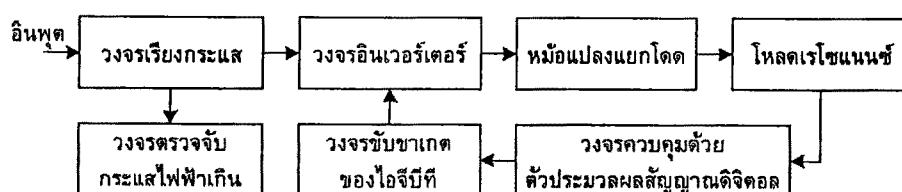
วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างวงจรควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำขนาดเล็กที่ให้อำนาจงานความร้อนไม่เกิน 100 W ซึ่งสามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้าให้อยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ได้โดยอัตโนมัติในช่วงความถี่ 23 kHz - 28 kHz โดยใช้สัญญาณควบคุมจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 โครงสร้างของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

แผนผังของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานของแต่ละส่วนดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 แผนผังของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

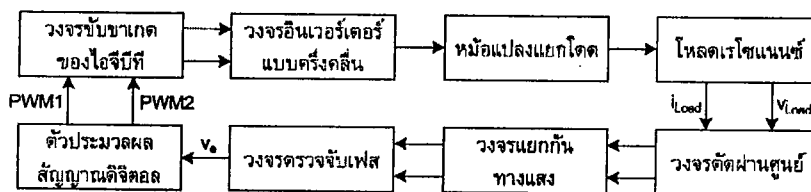
- 1) วงจรเรียงกระแส ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
- 2) วงจรอินเวอร์เตอร์ จะแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 23 kHz - 28 kHz ซึ่งวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นแบบครึ่งคลื่น
- 3) หม้อแปลงแยกโดด มีหน้าที่หลักในการแยกโหลดเรโซแนนซ์และวงจรอินเวอร์เตอร์ออกจากกันเพื่อป้องกันความเสียหายในกรณีที่เกิดการลัดวงจรและยังทำหน้าที่ลดทอนแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงที่จะจ่ายให้โหลดเรโซแนนซ์เพิ่มมากขึ้น
- 4) โหลดเรโซแนนซ์ ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำซึ่งต่อกันแบบอนุกรม ที่สภาวะเรโซแนนซ์ กระแสจะไหลผ่านโหลดมากที่สุดทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ในการทดลองจะใช้เฉพาะตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเท่านั้นเนื่องจากมีค่าความต้านทานแฝงอยู่ในตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำอยู่แล้ว
- 5) วงจรขับเคลื่อนของไอจีบีที อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งไอจีบีทีซึ่งอยู่ในวงจรอินเวอร์เตอร์จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีสัญญาณมาขับเคลื่อนที่ขาเกต และสัญญาณที่จะนำมาขับเคลื่อนนั้นจะต้องอยู่ภายใต้ข้อกำหนดที่ไอจีบีทีต้องการด้วย เช่น ต้องสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการซาร์จขาเกตได้ ซึ่งสัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลไม่สามารถนำมาขับเคลื่อนของไอจีบีทีได้โดยตรง จึงต้องมีวงจรขยายสัญญาณให้สูงขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของขาเกตไอจีบีที
- 6) วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าเกิน ทำหน้าที่ป้องกันอุปกรณ์ไอจีบีทีไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าที่สูงเกินไป โดยใช้ตัวตรวจจับกระแส (current transducer) เป็นตัววัดกระแสไฟฟ้าที่จะผ่านเข้าไปยังวงจร

อินเวอร์เตอร์ ซึ่งตัวตรวจจับกระแสจะแปลงกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าแล้วส่งต่อไปยังชุดป้องกันเพื่อตัดวงจรทั้งหมดเมื่อกระแสไฟฟ้าเกิน

7) วงจรควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล จะรับสัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามาจากโหลดเรโซแนนซ์เพื่อให้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320F2812 [3] ทำการวิเคราะห์แล้วส่งสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของโหลดเรโซแนนซ์ไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

3.2 วงจรควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

แผนผังของวงจรควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลแสดงดังรูปที่ 2 ตัวตรวจจับกระแสและตัวตรวจจับแรงดัน (voltage sensor) จะวัดค่ากระแสไฟฟ้า (i_{Load}) และแรงดันไฟฟ้า (V_{Load}) ของโหลดเรโซแนนซ์แล้วส่งให้วงจรตรวจจับเฟสผ่านวงจรตัดผ่านศูนย์และวงจรแยกกันทางแสง เอาต์พุตของวงจรตรวจจับเฟส (v_o) จะมีค่าแปรผันตรงกับความต่างเฟสระหว่าง i_{Load} และ V_{Load} [4] ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะวิเคราะห์ค่า v_o ที่ได้เพื่อผลิตสัญญาณ PWM1 และ PWM2 ให้มีความถี่ซึ่งจะทำให้ความต่างเฟสระหว่าง i_{Load} และ V_{Load} มีค่าลดลงแล้วส่งไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์ผ่านวงจรขับขาเกตของไอจีบีที เมื่อความถี่ในการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์และความถี่ของโหลดเรโซแนนซ์มีค่าใกล้เคียงกัน ความต่างเฟสระหว่าง i_{Load} และ V_{Load} จะมีค่าน้อยที่สุดซึ่งจะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

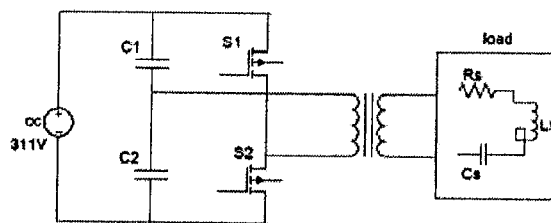


รูปที่ 2 แผนผังของวงจรควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

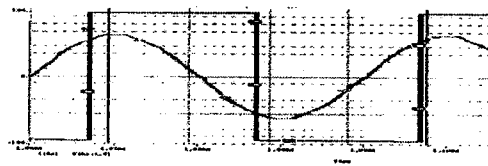
ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมจำลองทางวิศวกรรมไฟฟ้า

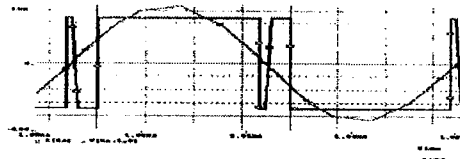
วงจรอินเวอร์เตอร์ หม้อแปลงแยกโดด และโหลดเรโซแนนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3 ถูกจำลองขึ้นด้วยโปรแกรม โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตเป็น 311 V ซึ่งเป็นการสมมติว่าได้ผ่านวงจรเรียงกระแสมาแล้ว พารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าดังนี้ คือ duty cycle = 40%, $R_s = 0.94 \Omega$, $L_x = 128 \mu H$, $C_s = 0.3 \mu F$ ซึ่งจะได้ความถี่เรโซแนนซ์ $f_r = 1 / (2\pi \sqrt{128 \mu H \times 0.3 \mu F}) = 25.68 \text{ kHz}$ หม้อแปลงที่ใช้เป็นแบบลดทอนแรงดันซึ่งมีอัตราส่วนรอบเป็น 1.83:1 สวิตช์ที่ใช้ในการจำลองเลือกใช้สวิตช์ที่เป็นแบบอุดมคติแทนไอจีบีที กระแสผ่านโหลด (คลื่นรูปไซน์) และแรงดันตกคร่อมโหลด (คลื่นรูปสี่เหลี่ยม) เมื่อความถี่ในการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ (f_s) มีค่าเป็น 20 kHz, 25 kHz และ 30 kHz แสดงในรูปที่ 4 ก) ถึง 4 ค) จะเห็นได้ว่าเมื่อ f_s มีค่าใกล้เคียงกับ f_r กระแสจะไหลผ่านโหลดมากและความต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันจะมีค่าน้อยดังรูปที่ 4 ข) เมื่อ f_s มีค่าห่างจาก f_r มากขึ้น กระแสจะไหลผ่านโหลดลดลงและความต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันจะมีค่ามากขึ้นดังรูปที่ 4 ก) และ 4 ค)



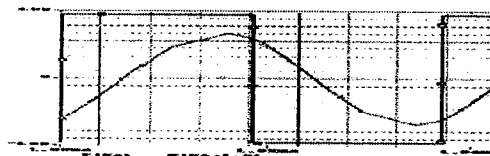
รูปที่ 3 วงจรที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม



ก)



ข)

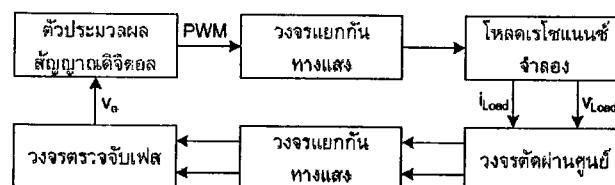


ค)

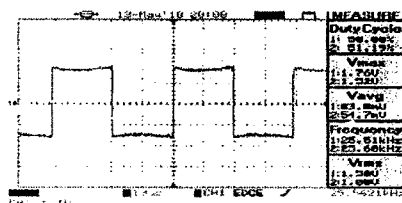
รูปที่ 4 กระแสผ่านโหลดและแรงดันตกคร่อมโหลด เมื่อ $f_s = 25.68$ kHz และ
 ก) $f_s = 20$ kHz, ข) $f_s = 25$ kHz, ค) $f_s = 30$ kHz

4.2 ทดสอบวงจรควบคุมกับโหลดเรโซแนนซ์จำลอง

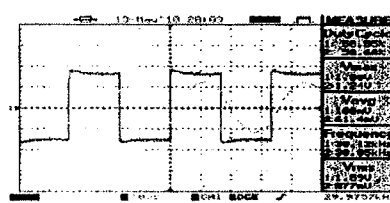
วงจรควบคุมถูกนำมาทดสอบกับโหลดเรโซแนนซ์จำลองดังแสดงในรูปที่ 5 พารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าดังนี้ คือ duty cycle = 50%, $R_s = 400 \Omega$, $L_x = 8.58$ mH, $C_s = 0.0047 \mu\text{F}$ ซึ่งจะได้ความถี่เรโซแนนซ์ $f_r = 1/(2\pi\sqrt{8.58\text{mH} \times 0.0047\mu\text{F}}) = 25.06$ kHz จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อ f_s มีค่าใกล้เคียงกับ f_r ความต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันจะมีค่าน้อยและ V_o ก็มีค่าน้อยด้วยดังรูปที่ 6 ก) และ 6 ข) เมื่อ f_s มีค่าห่างจาก f_r มากขึ้น ความต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันจะมีมากขึ้นและ V_o ก็จะมีค่ามากขึ้นเช่นกันดังรูปที่ 7 ก) และ 7 ข)



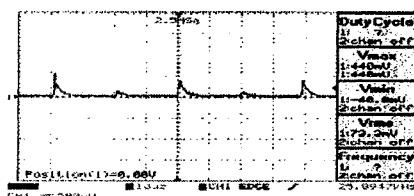
รูปที่ 5 การทดสอบวงจรควบคุมกับโหลดเรโซแนนซ์จำลอง



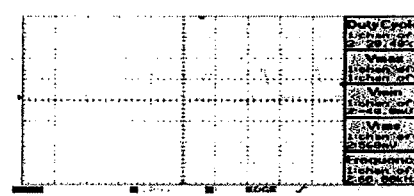
ก)



ก)



ข)



ข)

รูปที่ 6 ผลการทดลองเมื่อ $f_s = 25.5 \text{ kHz}$

ก) กระแสผ่านโหลดและแรงดันตกคร่อมโหลด

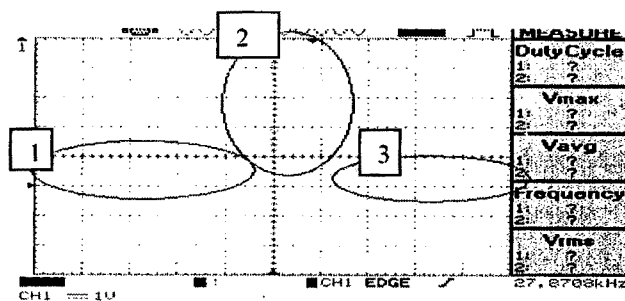
ข) เอาต์พุตของวงจรตรวจจับเฟส

รูปที่ 7 ผลการทดลองเมื่อ $f_s = 30.1 \text{ kHz}$

ก) กระแสผ่านโหลดและแรงดันตกคร่อมโหลด

ข) เอาต์พุตของวงจรตรวจจับเฟส

นอกจากนี้วงจรควบคุมได้ถูกนำมาทดสอบในการปรับความถี่อัตโนมัติ โดยค่าเริ่มต้นของ f_s เท่ากับ 25.5 kHz จากนั้นทำการลดค่า L_x ลง ซึ่งจะทำให้ f_s มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1 kHz ค่าของ v_o ที่ได้แสดงในรูปที่ 8 จะเห็นว่าในระยะที่ 1 v_o มีค่าน้อยซึ่งแสดงว่าระบบอยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ที่ $f_s = 25 \text{ kHz}$ เมื่อความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนไปเป็น 26 kHz เนื่องจากการลดค่าของ L_x ค่าของ v_o จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะที่ 2 ซึ่งเป็นช่วงที่ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลพยายามปรับ f_s ให้มีค่าใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ค่าใหม่ที่ 26 kHz จนกระทั่งถึงระยะที่ 3 เมื่อ f_s มีค่าใกล้เคียงกับ 26 kHz ระบบจึงเข้าสู่สภาวะเรโซแนนซ์อีกครั้ง



รูปที่ 8 เอาต์พุตของวงจรตรวจจับเฟสเมื่อทำการปรับความถี่อัตโนมัติ

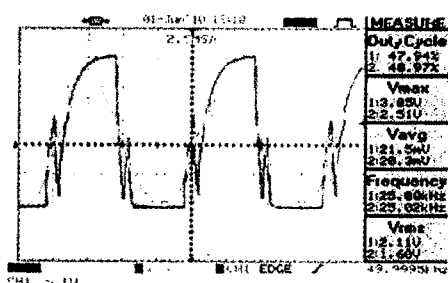
ระยะที่ 1 เมื่อ $f_s = 25 \text{ kHz}$, ระยะที่ 2 เมื่อ f_s อยู่ในช่วงปรับค่าเข้าสู่ 26 kHz , ระยะที่ 3 เมื่อ $f_s = 26 \text{ kHz}$

4.3 ทดสอบวงจรควบคุมกับเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในการให้ความร้อนกับน้ำ

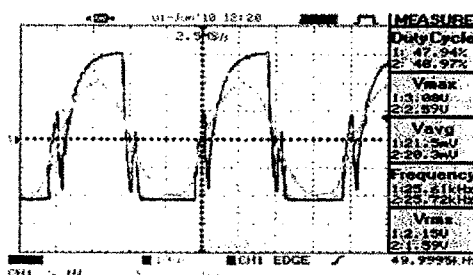
เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้นแบบที่สร้างขึ้นได้ถูกนำมาให้ความร้อนกับน้ำ 1 ลิตรเป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้ duty cycle = 40%, f_s เริ่มต้น = 25 kHz ใช้หม้อแปลงที่มีอัตราส่วนรอบเป็น 2:1 แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตเท่ากับ 120 V กำลังไฟฟ้าอินพุต (P_i) แรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_i) และกระแสไฟฟ้าอินพุต (I_i) จะมีค่าค่อนข้างคงที่ดังแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากระบบอยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ตลอดเวลา กระแสผ่านโหลดและแรงดันตกคร่อมโหลดมีเฟสตรงกันที่ความถี่ในการสวิตช์ 25 kHz เมื่อเริ่มให้ความร้อนกับน้ำดังรูปที่ 9 ก) หลังจากให้ความร้อนกับน้ำ 10 นาที กระแสผ่านโหลดและแรงดันตกคร่อมโหลดก็ยังคงมีเฟสตรงกัน แต่ความถี่ในการสวิตช์เปลี่ยนไปเป็น 25.6 kHz ดังรูปที่ 9 ข) ซึ่งเป็นการทำงานโดยอัตโนมัติของระบบควบคุมเพื่อปรับความถี่ในการสวิตช์ให้เข้าสู่ความถี่เรโซแนนซ์ของโหลดที่เปลี่ยนไปเมื่อมีความร้อนมากขึ้น

ตารางที่ 1 กำลังไฟฟ้าอินพุต แรงดันไฟฟ้าอินพุต และกระแสไฟฟ้าอินพุตเมื่อให้ความร้อนกับน้ำ 1 ลิตรเป็นเวลา 10 นาที

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	P_i (W)	V_i (V)	I_i (A)
0	25.0	100.37	120.10	1.37
1	26.5	101.24	120.00	1.43
2	27.8	100.25	120.20	1.39
3	28.9	97.52	120.10	1.40
4	30.5	97.20	120.00	1.35
5	31.9	98.17	120.10	1.34
6	32.5	101.75	120.00	1.39
7	33.4	95.20	120.20	1.32
8	34.6	99.80	120.30	1.36
9	35.5	100.52	120.10	1.35
10	35.9	98.64	120.00	1.37



ก) เมื่อเริ่มให้ความร้อนกับน้ำ



ข) หลังจากให้ความร้อนกับน้ำ 10 นาที

รูปที่ 9 กระแสผ่านโหลดและแรงดันตกคร่อมโหลด

บทสรุป

วงจรควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่สร้างขึ้น สามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้าให้อยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ได้โดยอัตโนมัติในช่วงความถี่ 23 kHz - 28 kHz ด้วยการเปลี่ยนความถี่ในการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้สัญญาณ PWM จากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320F2812 และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเพื่อใช้เป็นเตาหลอมได้ อย่างไรก็ตามระบบควบคุมที่สร้างขึ้นยังไม่มีเสถียรภาพเท่าที่ควรซึ่งต้องมีการพัฒนาต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ความเห็นในรายงานผลการวิจัยนี้เป็นของผู้วิจัย ผู้ให้ทุนไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, and M. Black, **Handbook of Induction Heating**, Marcel Dekker, New York, 2002.
- [2] Linn High Thern, **Induction Heating Devices for High Frequency Induction Soldering, Brazing and Joining**, 1994.
- [3] Texas Instruments, *TMS320F2810, TMS320F2811, TMS320F2812, TMS320C2810, TMS320C2811, TMS320C2812 Digital Signal Processors Data Manual*, 2007.
- [4] N.S. Bayindir, O. Kukrer, and M. Yakup, "DSP-Based PLL-Controlled 50-100 kHz 20 kW High-Frequency Induction Heating System for Surface Hardening and Welding Applications," *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 150, no. 3, May 2003, pp. 365-371.

ภาคผนวก ข
ตารางกิจกรรม วิธีการ และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

กิจกรรม	วิธีการ	ผลที่ได้รับ
1. ศึกษาเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำประเภทต่าง ๆ และวิธีการที่ใช้ในการควบคุม	- สอบถามจากผู้ที่เคยทำวิจัยด้านนี้ - ค้นหาข้อมูลจากห้องสมุดและสถาบันวิจัย	วิธีการสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำประเภทต่าง ๆ และวิธีการที่ใช้ในการควบคุม
2. จำลองเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำประเภทต่าง ๆ และวิธีการที่ใช้ในการควบคุมด้วยโปรแกรมแล้วทำการวิเคราะห์เพื่อเลือกวิธีการที่เหมาะสม	จำลองเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำประเภทต่าง ๆ และวิธีการที่ใช้ในการควบคุมในโปรแกรม PSPICE	เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำประเภทเหมาะสมที่จะใช้ทดสอบและวิธีการที่เหมาะสมในการควบคุม
3. ทดสอบการควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลโดยใช้สัญญาณจำลอง	ประกอบตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นวงจรควบคุมแล้วทดสอบกับสัญญาณจำลอง	ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสามารถควบคุมระบบได้เหมาะสมกับสัญญาณจำลอง
4. เลือกอุปกรณ์และเครื่องมือที่เหมาะสม แล้วสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้นแบบอย่างง่าย	ประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้นแบบอย่างง่ายแล้วทดสอบ	เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้นแบบอย่างง่าย
5. ทดสอบการควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้นแบบอย่างง่ายด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล	ประกอบตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลกับเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้นแบบอย่างง่ายแล้วทดสอบ	ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสามารถควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้นแบบอย่างง่ายได้อย่างเหมาะสม
6. ปรับปรุงและสรุปผล	-ปรับปรุงแก้ไขและรวบรวมวิธีการที่เหมาะสมที่สุด -สรุปผลเปรียบเทียบกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย -แนวทางในการวิจัยต่อเนื่อง	ผลและสรุปผลของการวิจัย
7. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์	จ้างเหมาเข้าเล่มรายงานรวมทั้งถ่ายเอกสาร	รายงานฉบับสมบูรณ์

ภาคผนวก ค
รายงานการเงิน

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
หมวดค่าวัสดุ	
1. TMS320F2812 eZdsp	18,008.10
2. CP-JRARM7 USB-LPC2148	4,108.80
3. INDUCTION HIC20EA HA	1,790.00
4. แป๊ปเบรกและชุดบานแป๊ป	1,300.00
5. ค่าถ่ายเอกสาร	1,000.00
หมวดค่าตอบแทน	
1. ค่าตอบแทนนักวิจัย	9,000.00
หมวดค่าใช้สอย	
1. ค่าจ้างเหมาเข้าเล่มรายงาน	2,000.00
2. ค่าจ้างเหมาเขียนโปรแกรม	6,000.00
3. ค่าลงทะเบียนประชุมวิชาการ	1,800.00
รวมทั้งสิ้น	45,006.90



