ACA16

การออกแบบสร้างเครื่องเชื่อมความถี่สูงโดยใช้หลักการฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

Design and Construction of High Frequency Welding Machine by Using Full-Bridge Converter

พูนศรี ,วรรณการ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
1381 ถ.พิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กทม. 10800 โทรศัพท์ : 0-2913-2424 E-mail: v_poonsri555@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้กล่าวเกี่ยวกับการออกแบบสร้างเครื่องเชื่อมความถี่สูงโดยใช้หลักการฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ทำงานที่ความถี่ 80 kHz มีกระแสเชื่อมสูงสุด 100A เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบหม้อแปลงความถี่ต่ำจะมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก จึงทำให้เกิดปัญหาในการเคลื่อนย้าย และมีกำลังงานสูญเสียมาก ในบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบเครื่องเชื่อมความถี่สูงที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ภายในเครื่องประกอบด้วยวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ SG3525 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์และ วงจรขับนำเกตใช้ไอซีเบอร์ TC4422 และใช้หม้อแปลงพัลส์ในการขับเกตโดยหม้อแปลงพัลส์ทำหน้าที่แยกส่วนระหว่างสัญญาณควบคุมและภาคกำลังออกจากกันทางไฟฟ้า ในส่วนของวงจรกำลังใช้วงจรแปลงผันไฟตรงแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ และใช้เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์การสวิตช์ และใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงทำหน้าที่แยกแรงดันด้านอินพุตและแรงดันด้านเอาต์พุตออกจากกัน โดยมีวงจรเรียงกระแสด้านเอาต์พุตเป็นแบบเต็มคลื่น และมีตัวเหนี่ยวนำเพื่อกรองกระแสในขณะเชื่อม และมีวงจรป้อนกลับทำหน้าที่ป้องกันกระแสเกิน จากการออกแบบสร้างเครื่องเชื่อมความถี่สูงต้นแบบโดยใช้หลักการฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์นี้ เมื่อนำมาทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถของเครื่องเชื่อมที่นำเสนอ โดยให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

คำสำคัญ : เครื่องเชื่อมความถี่สูง , ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ , มอดูเลตความกว้างพัลส์ , หม้อแปลงพัลส์

Abstract

This article describes the design and construction of high frequency welding machine by using full-bridge converter and was working at 80 kHz and the maximum welding capacity of 100A. Since the arc welding machines for low frequency transformer are too large and heavy and usually cause problems in movement and many losses power. This paper presents the design of high frequency welding machine was to construct a smaller and lighter. Inside is consists of pulse width modulation (PWM) circuit was used IC SG3525 which built controlling signal and gate driving circuit was used IC TC4422 . Using the pulse transformer to gate drive with pulse transformer would separate controlling signal and power circuit from each other. The power circuit was used full-bridge DC-DC convertible circuit and the mosfet was used as switch device and high frequency transformer was used to separate input voltage side and output voltage side. The output rectifier circuit was of full-wave type with add inductor to filter the current in while arc welding and feedback control circuit to protect the over current . The system performance is investigated which appears satisfactory.

Keywords : high frequency welding machine , full bridge converter , pulse width modulation , pulse transformer

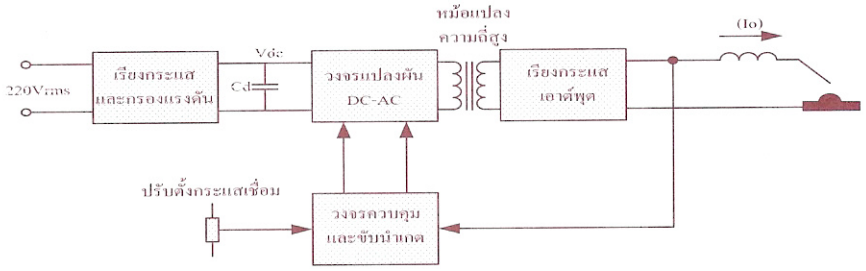
1. บทนำ

เครื่องเชื่อมโลหะแบบใช้ไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดหลักๆคือชนิดแรกเป็นเครื่องเชื่อมที่ให้แรงดันขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และชนิดที่สองเป็นเครื่องเชื่อมที่ให้แรงดันขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง [1] ชนิดที่ให้แรงดันขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสสลับนั้นนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยเนื่องจากสร้างได้ง่าย โดยสามารถที่จะสร้างขึ้นได้เองได้ในประเทศและ มีราคาถูก อย่างไรก็ดีเครื่องเชื่อมไฟฟ้าชนิดนี้ ก็จะมีข้อเสียหลายประการคือ มีขนาดที่ใหญ่และ น้ำหนักมาก เนื่องจากโดยทั่วไปจะใช้หลักการของแกนเหล็กที่ถ่ายพลังงานที่ความถี่ต่ำจึงทำให้เคลื่อนย้ายไปใช้ในงานนอกสถานที่ได้ลำบาก

สำหรับเครื่องเชื่อมชนิดที่ให้แรงดันขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรงนั้น ปัจจุบันได้มีการนำเอาวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในการสร้างเครื่องเชื่อมกันอย่างมาก โดยเฉพาะการนำเอาหลักการของวงจรแปลงผันไฟตรงแบบสวิตช์ที่มีความถี่สูง (High Frequency Switching Converters) ชนิดต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องเชื่อมชนิดไฟฟ้ากระแสตรง[2] ซึ่งเครื่องเชื่อมชนิดไฟฟ้ากระแสตรงนี้ก็จะมีข้อดีคือ ทำให้เครื่องเชื่อมมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และยังให้ประสิทธิภาพสูง

2. วิธีการดำเนินงาน

เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงนี้ได้เลือกวงจรแปลงผันไฟตรงแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ เป็นแหล่งจ่ายไฟตรงของเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นแบบสวิตช์ด้วยความถี่สูง การออกแบบส่วนต่างๆ ของโครงสร้างเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงนี้ สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนต่างๆ

การออกแบบและสร้างเครื่องเชื่อมความถี่สูงแบบวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานและองค์ประกอบในภาคต่างๆ ดังนี้

2.1 การออกแบบวงจรแหล่งจ่ายไฟ

2.2 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์และขับนำเกต

2.3 การออกแบบ แหล่งจ่ายไฟตรงภาคกำลัง

2.4 การออกแบบวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

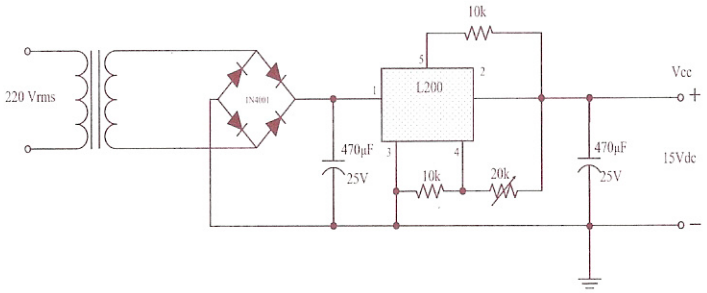
2.5 การออกแบบหม้อแปลงกำลังความถี่สูง

2.6 การออกแบบวงจรเรียงกระแสด้านทุติยภูมิ

2.7 การออกแบบวงจรป้อนกลับแรงดันและกระแสเกิน

2.1 การออกแบบวงจรแหล่งจ่ายไฟ

แหล่งจ่ายไฟ +15 V สำหรับวงจรควบคุมมอดูเลตความกว้างพัลส์ วงจรป้องกันกระแส และวงจรขับเกต แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงให้กับวงจรส่วนต่างๆ ของเครื่องเชื่อมไฟฟ้า วงจรแหล่งจ่ายใช้ไอซีเรกกูเลเตอร์เบอร์ L200C เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ออกมามีความเรียบและต่อเนื่อง ใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจร การทำงานของวงจรมีดังนี้ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าหม้อแปลง จะมีแรงดันไฟสลับที่ต้องการออกมาจากหม้อแปลงแรงดันไฟสลับนี้จะถูกเรียงกระแสโดยไดโอดเป็นไฟตรง ซึ่งถูกต่อแบบบริดจ์ จากนั้นจะผ่านการกรองแรงดันให้เรียบขึ้นโดยตัวเก็บประจุ และถูกทำให้แรงดันคงที่ด้วยไอซีเรกกูเลเตอร์ โดยไอซีเรกกูเลเตอร์สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 2 A โดยวงจรแหล่งจ่ายไฟแสดงดังรูปที่ 2

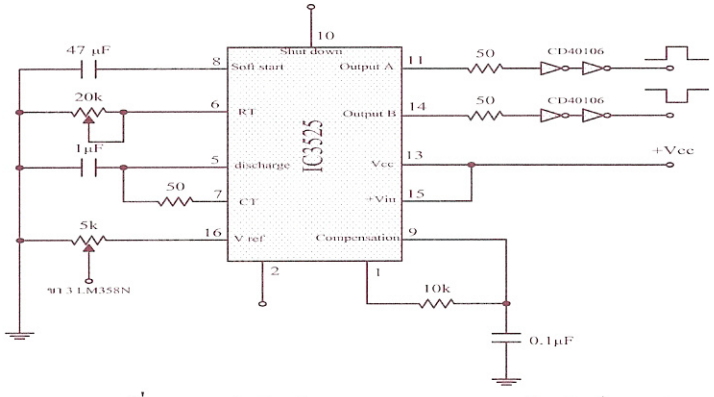


รูปที่ 2 วงจรแหล่งจ่ายไฟ

2.2 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์และขับนำเกต

2.2.1 ภาควงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์

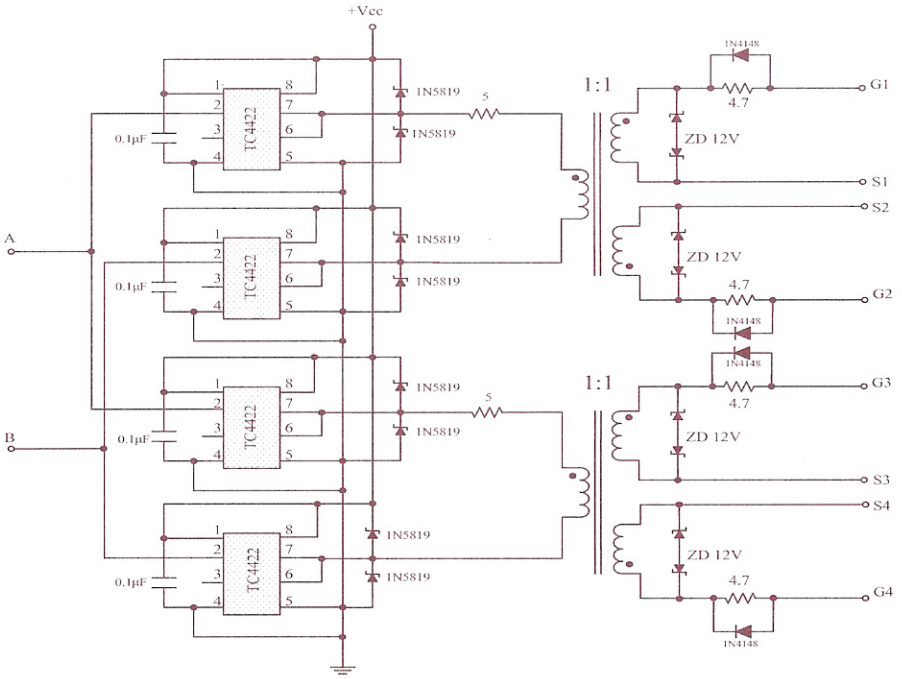
วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมในส่วนนี้ทำหน้าที่สร้างสัญญาณไปขับนำเกตของมอสเฟตกำลังทั้งสี่ชุดในวงจรคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งจะต้องควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงช่วงจังหวะเวลาการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต เพื่อให้ได้รูปคลื่นของแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ต้องการ และไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ของเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งวงจรควบคุมนี้จะประกอบด้วยวงจรต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยจะรับแรงดัน 15 V เข้าที่ขา 13 และ15 และวงจร RC จะสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมฟันเลื่อยออกมาเพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปมอดูเลตกับสัญญาณป้อนกลับที่ได้จากวงจรของภาคขยายความต่าง แล้วจะได้สัญญาณพัลส์ออกมาที่ขา 11 และขา 14 โดยรูปคลื่นที่ได้ออกมานั้นจะมีความต่างเฟสกัน ซึ่งสามารถปรับความกว้างพัลส์ได้ที่ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 20 kΩ และค่าตัวเก็บประจุมีขนาด 47 µF โดยให้ความถี่เอาต์พุตประมาณ 80 kHz



รูปที่ 3 วงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์

2.2.2 ภาควงจรขับนำเกต

วงจรชุดขับนำเกตนี้จะทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าไปขับให้เพาเวอร์มอสเฟตทำงาน โดยรับสัญญาณควบคุมการทำงานจากวงจรกำเนิดสัญญาณและผ่านไอซีขยายแรงดันและกระแส เพื่อขยายส่งให้หม้อแปลงพัลส์ การใช้หม้อแปลงพัลส์มีข้อดีคือ สามารถแยกกราวด์ของเพาเวอร์มอสเฟตแต่ละตัวออกจากกัน ส่วนการเลือกใช้หม้อแปลงพัลส์เลือกใช้ขนาดแกนเฟอร์ไรต์แบบเทอร์รอยด์ซึ่งรูปคลื่นที่ได้นั้นจะดีกว่าแกนแบบ EI หรือ EE โดยมีอัตราส่วน 1:1 เพื่อให้สามารถขับแรงดันป้อนให้ขาเกตได้ดีขึ้น และเป็นการแยกทางไฟฟ้า (Isolated) ทำให้ประหยัดแหล่งจ่ายไฟที่ขับเกตไม่ต้องมีหลายชุดซึ่งแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรขับนำเกตแบบฟูลบริดจ์ของเพาเวอร์มอสเฟต

2.3 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟตรงภาคกำลัง

แหล่งจ่ายแรงดันของระบบประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์และวงจรกรองแรงดัน โดยจะรับแรงดันไฟกระแสสลับ 220 V 50 Hz 1 Phase เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 310 V โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (1) วงจรแหล่งจ่ายไฟตรงภาคกำลังแสดงดังรูปที่ 5

$$V_{DC} = \sqrt{2} \times V_S - V_D \qquad (1)$$

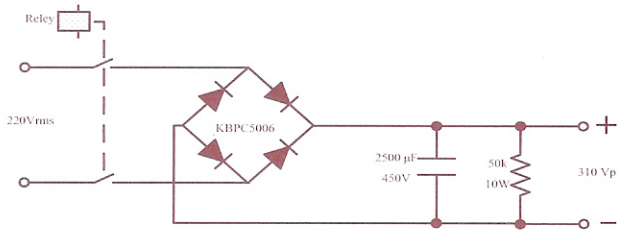
เมื่อ

V_S คือ แรงดันที่ใช้งาน (V)

V_D คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด (V)

ดังนั้น

$$V_{DC} = \left(\sqrt{2} \times 200\right) - \left(2 \times 0.7\right)$$
$$= 310 \text{ V}$$

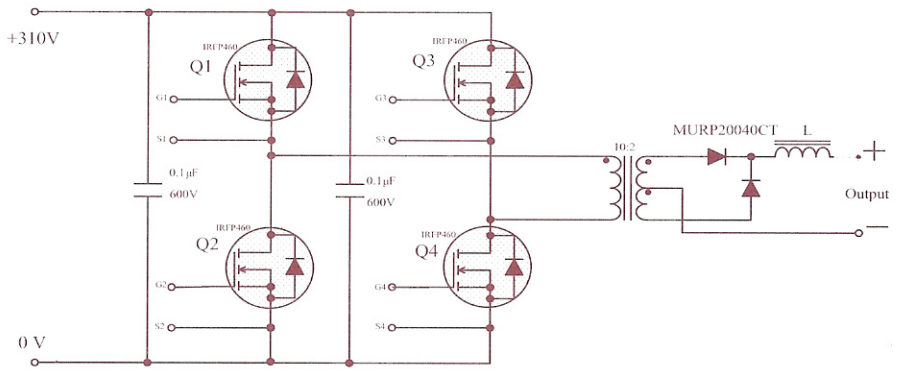


รูปที่ 5 วงจรแหล่งจ่ายไฟตรงภาคกำลัง

2.4 การออกแบบวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

วงจรแปลงผันไฟตรง แบบฟูลบริดจ์[3] ในรูปที่ 6 เพาเวอร์มอสเฟตทั้ง 4 ตัวจะสลับการทำงานกันเป็นคู่คือ Q_1 และ Q_4 จะนำกระแสพร้อมกันในสัญญาณช่วงครึ่งคาบแรก ส่วนในครึ่งคาบหลัง Q_2 และ Q_3 นำกระแสแทน ส่วน Q_1 และ Q_4 หยุดนำกระแสทำให้แรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ที่ขดลวดด้านปฐมภูมิเป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีค่ายอดถึงยอดเท่ากับสองเท่าของแรงดันไฟตรงที่ป้อนเลี้ยงวงจรในภาคกำลัง และมีความถี่เท่ากับการทำงานของ PWM ที่ขับให้กับเพาเวอร์มอสเฟตทำงาน

ในการเลือกพิกัดของเพาเวอร์มอสเฟตจะใช้วิธีพิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์ และกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ โดยปกติพิกัดของเพาเวอร์มอสเฟตได้จากการคำนวณ ค่ากระแสที่ไหลผ่านเพาเวอร์มอสเฟตเท่ากับ 15.5 A โดยเป็นการกำหนดพิกัดที่ 25°C แต่การเลือกพิกัดใช้งานจะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิขณะทำงานและการออกแบบต้องประเมินอุณหภูมิที่ตัวถังด้วย ในขณะทำงานเมื่อมีแผ่นระบายความร้อนให้ตัวถังของเพาเวอร์มอสเฟตมีอุณหภูมิไม่เกิน 60°C และอุณหภูมิห้องไม่เกิน 45°C เมื่อพิจารณา Thermal Durating Factor ของสารกึ่งตัวนำพิกัดของกระแสเฟตที่อุณหภูมิ 60°C จะลดลงเหลือประมาณ 0.7 เท่าของพิกัด เมื่ออุณหภูมิที่ตัวถังเท่ากับ 25°C ดังนั้นจะต้องใช้เพาเวอร์มอสเฟตที่มีพิกัดกระแสที่อุณหภูมิตัวถัง 25°C เท่ากับ 15.5/0.7 = 22 A และเมื่อคำนึงถึงการ Overload ประมาณ 1.5 เท่าและ Safety Factor 1.5 เท่า จะต้องใช้เพาเวอร์มอสเฟตที่มีพิกัดกระแสที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 49.5 A มีขายในท้องตลาดซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงเลือกใช้มอสเฟตที่มีอัตราการทนกระแสที่ 50 A และมีค่าอัตราทนแรงดัน 500 V



รูปที่ 6 วงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

2.5 การออกแบบหม้อแปลงกำลังความถี่สูง

การคำนวณหาจำนวนรอบขดปฐมภูมิ (N_p) กำหนดค่า $\Delta_{B\,max}$ มีค่าเท่ากับ 1600 Wb/m^2 และค่า A_e มีค่าเท่ากับ 3.52 cm.^{2} ดังนั้นคำนวณหาค่าจำนวนรอบด้านปฐมภูมิ (N_p)

$$N_p = \frac{(V_{in(min)} - 2V_{ds(sat)})t_{on(max)}}{\Delta B_{max} A_e} \times 10^8 \qquad (2)$$
$$= \frac{(237 - 2\times 2.6)\times 2\times 10^{-6}}{2200\times 3.52} \times 10^8$$
$$= 14 \text{ รอบ}$$

การคำนวณหาจำนวนรอบขดทุติยภูมิ (N_S)

จากการคำนวณได้ค่า N_p เท่ากับ 14 รอบ สามารถหา N_S ได้จากอัตราส่วน

$$a = \frac{N_p}{N_s} \qquad (3)$$

แทนค่า

$$N_s = 3 \text{ รอบ}$$

จำนวนรอบของขด N_S เท่ากับ 3 รอบ

คำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ (L_p) โดยที่ระยะช่องอากาศ ($\lambda_g = 3$ mm.)

$$L_P = \frac{4\pi A_e N_p^{\,2} \times 10^{-8}}{\lambda_g} \qquad (4)$$
$$= \frac{4\pi \times 3.52 \times 14^2 \times 10^{-8}}{3}$$
$$= 44\ \mu H$$

การคำนวณหาค่ากระแสสูงสุดที่ขดลวดปฐมภูมิ $\left(I_{p(pK)}\right)$

$$I_{p(pK)} = \frac{P_o \times T}{2\eta V_{in(min)} \times t_{on(max)}} + \frac{\left(V_{in(min)} - 2V_{ds(sat)}\right)}{Lp} t_{on(max)} \qquad (5)$$

กำหนดให้ $\eta = 0.8$

$$I_{p(pK)} = \frac{\left(2200\times 5\times 10^{-6}\right)}{\left(2\times 0.8\times 237\times 5\times 10^{-6}\right)} + \frac{\left(237 - \left(2\times 2.6\right)\right)}{\left(44\times 10^{-6}\right)} \times 2\times 10^{-6}$$
$$= 22 \text{ A}$$

2.6 การออกแบบวงจรเรียงกระแสด้านทุติยภูมิ

สำหรับการเลือกไดโอดด้านขาเอาต์พุต สามารถคำนวณหาค่าผ่านไดโอดได้ดังนี้

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times I_{peak} \times \sqrt{\frac{1}{T}} \qquad (6)$$

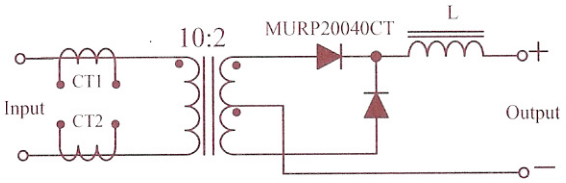
เมื่อ

T คือ คาบเวลารูปคลื่นกระแส (sec)

ดังนั้น

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 100 \times \sqrt{\frac{1}{5}}$$
$$= 44 \text{ A}$$

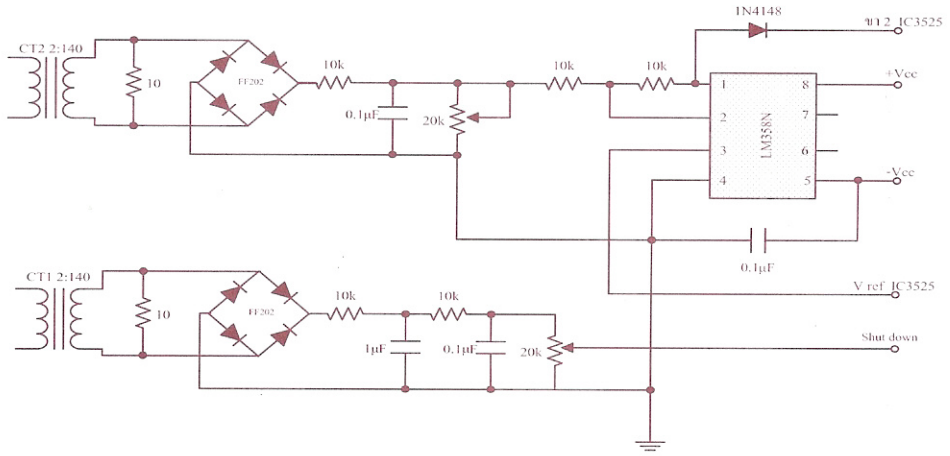
การออกแบบพิกัดของไดโอดกำลังเอาต์พุตจะเหมือนด้านอินพุต โดยจะคำนึงถึง Thermal Durating Factor ประมาณ 0.7 เท่าของพิกัดเมื่ออุณหภูมิที่ตัวถังเท่ากับ 25°C 44/0.7 = 63 A ค่า Overload ประมาณ1.5 เท่า 63× 1.5 = 95A ค่า Safety Factor ประมาณ 1.5 เท่า 95 × 1.5 = 142 A ดังนั้นจะต้องใช้ไดโอดที่มีค่ากระแส 200 A โดยการต่อแบบฟูลเวฟ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 วงจรเรียงกระแสทางด้านทุติยภูมิ

2.7 การออกแบบวงจรป้อนกลับแรงดันและกระแสเกิน

เครื่องเชื่อมความถี่สูงโดยใช้หลักการฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จะถูกควบคุมแบบลูปปิด (PI control) เพื่อให้ได้กระแสเชื่อมมีความต่อเนื่อง แรงดันไฟฟ้าจะผ่านวงจรแบ่งแรงดันจ่ายให้กับไอซี SG3525 โดยแรงดันนี้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0 - 3.6 V เพื่อให้สามารถปรับความกว้างพัลส์ได้โดยอัตโนมัติ ในช่วงแรกนั้นโหลดจะเริ่มดึงกระแสมากแรงดันตกคร่อมที่วงจรแบ่งแรงดันจะมีค่ามากป้อนให้กับขา Inverting วงจรก็จะลดความกว้างของพัลส์ลง แต่เมื่อกระแสโหลดลดลงแรงดันป้อนให้ขา Inverting ก็ลดลงทำให้ความกว้างของพัลส์เพิ่มขึ้น ในส่วนของการป้อนกลับแรงดันนั้นได้แรงดันจากขั้วเอาต์พุตโดยตรง ในขณะไม่มีโหลดจะมีแรงดันประมาณ 44 V_{dc} นำมาเข้าวงจรแบ่งแรงดันเช่นเดียวกับวงจรป้อนกลับกระแส แต่การทำงานจะกลับกัน คือในช่วงแรกที่โหลดดึงกระแสแรงดันที่ขั้วเอาต์พุตจะตกลงทำให้แรงดันที่ป้อนเข้าขา Inverting ของไอซี SG3525 มีค่าน้อยแต่เมื่อโหลดดึงกระแสต่ำลงแรงดันที่ป้อนกลับก็จะเพิ่มขึ้น ในจุดที่แรงดันป้อนกลับเพิ่มขึ้นนี้จะทำให้ความกว้างพัลส์ลดลงเป็น 0 % ได้นั้นหมายความว่าวงจรหยุดการทำงาน



รูปที่ 8 วงจรป้องกันกระแสเกิน

3. บทสรุป

บทความนี้ในวงจรควบคุมแบบพัลส์วิดมอดูเลชั่น (PWM) ใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ SG3525 และชุดขับนำเกตของมอสเฟตใช้หม้อแปลงพัลส์แบบเทอร์รอย (toroid) ใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ TC4422 เป็นวงจรช่วยขับกระแสให้กับหม้อแปลง ส่วนวงจรกำลังต่อเป็นแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์โดยใช้เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์การสวิตช์ สำหรับหม้อแปลงความถี่สูงเลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์เพราะตอบสนองความถี่สูงได้ดีกว่าแกนเหล็ก และมีวงจรป้องกันตรวจจับกระแสเกิน จากการทดสอบทางด้านอินพุตใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 50 Hz โดยมีแรงดันเอาต์พุตที่ขั้วเชื่อมขณะไม่ได้ทำการเชื่อมมีค่า 50 V และแรงดันเอาต์พุตที่ขั้วเชื่อมขณะที่ทำการเชื่อมอยู่ระหว่าง 20 - 22 V โดยที่ขั้วบวกต่อที่ลวดเชื่อมและสามารถปรับกระแสเชื่อมได้สูงสุด 100 A

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณ อภิชิต สุขะเกตุ คุณ ณัฐพงษ์ ทุ่มทอง และคุณ ณรงค์ สวัสดี ที่ช่วยค้นคว้าข้อมูลต่างๆ ในบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] วิทยา ทองขาว. 2538. “งานเชื่อมไฟฟ้า”, กรุงเทพมหานคร : บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน).

[2] ราชันย์ แสงจันทร์, สุภัทร ศิลสมิต และ ยุทธนา ทองลบ. 25444. “เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง” ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[3] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power electronics: converters, applications and design, Ed. John Wiley & Sons, New York, 2003.