บทที่ 3

การพัฒนาเครื่องไมโครอาร์คพลาสมา

3.1 ข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบ

การผลิตพลาสมาอาร์คจะต้องมีองค์ประกอบของอุปกรณ์ตามแผนภาพในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้

3.1.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply)

3.1.2 ส่วนควบคุมการเชื่อม (welding control console)

3.1.3 ระบบหมุนเวียนการจ่ายน้ำหล่อเย็น (recirculating water cooler)

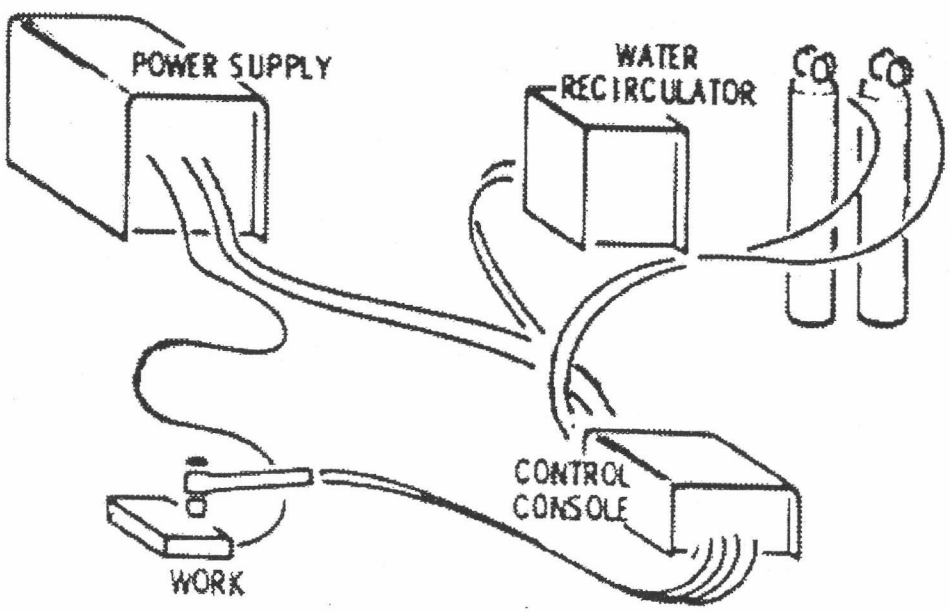
3.1.4 หัวเชื่อมแบบไมโครอาร์คพลาสมา (micro plasma arc torch)

3.1.5 ระบบท่อแกสและระบบจ่ายแกส (gas supplying system)

3.1.6 เครื่องรักษาระดับความดันแกส (gas regulator)

3.1.7 ท่อส่งจ่ายระบบน้ำหล่อเย็น (cooling system)

3.1.8 เครื่องจุดอาร์คศักดาสูงความถี่สูง (arc ignition system)



รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของระบบการเชื่อมแบบไมโครอาร์คพลาสมา

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตซ์ที่ต้องการในงานวิจัยนี้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถควบคุมให้กระแสด้านออกคงที่โดยมีคุณสมบัติของเครื่องดังนี้

3.1.1 ด้านเข้ารับไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 50 Hz 1 เฟส

3.1.2 ด้านออกจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 80 V ขณะไม่มีโหลดและจ่ายกระแสขาออกสูงสุด 20 A

3.1.3 สามารถรักษาระดับกระแสด้านออกคงที่ได้ตั้งแต่ 0.5 - 20 A และสามารถปรับเปลี่ยนให้รักษาระดับกระแสคงที่ได้ต่อเนื่อง

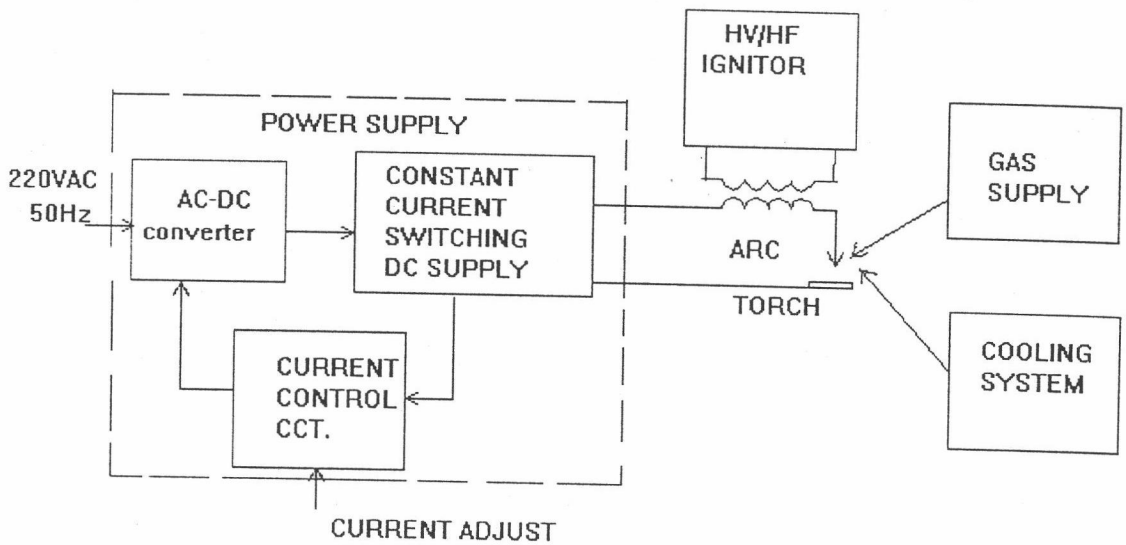
3.1.4 กำลังด้านออกประมาณ 1000 W

3.1.5 ระบายความร้อนของเครื่องด้วยพัดลมไฟฟ้า

3.1.6 มีระบบระบายความร้อนสำหรับหล่อเย็นหัวเชื่อมพลาสมา

3.2 การออกแบบเครื่องไมโครอาร์คพลาสมา

จากข้อมูลพื้นฐานในข้อ 2.1 สามารถออกแบบโครงสร้างการทำงานของเครื่องไมโครอาร์คพลาสมาได้ดังแผนภาพรูป 3.2 ประกอบด้วยวงจรอิเลคทรอนิคส์หลัก 2 ส่วนคือ วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงชนิดทางออกคงที่และวงจรจุดอาร์คเริ่มต้น(pilot arc)

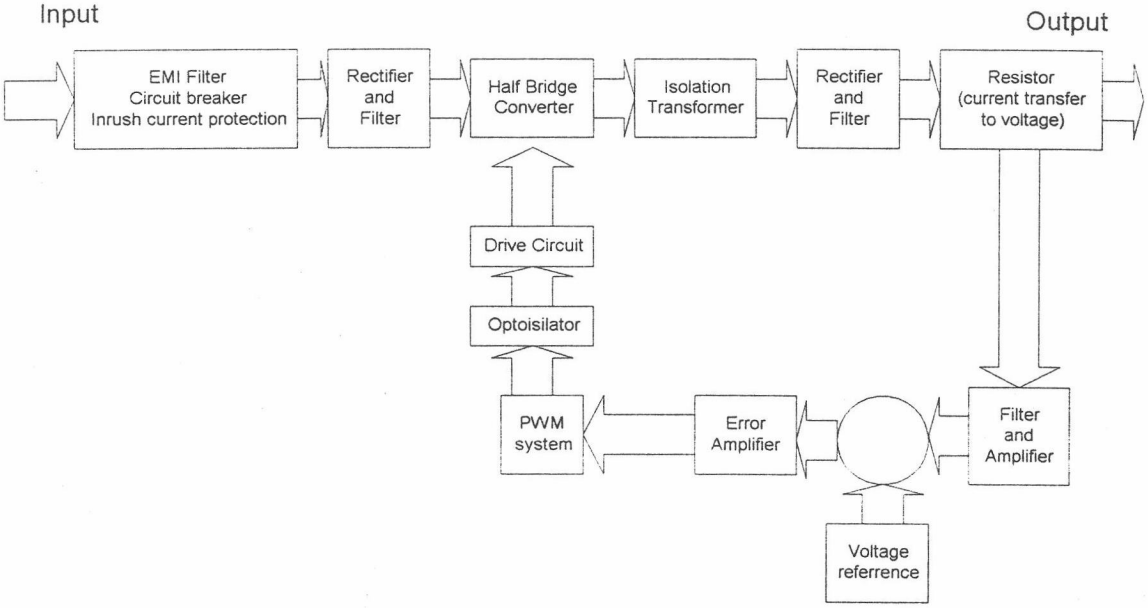


รูปที่ 3.2 โครงสร้างของเครื่องไมโครอาร์คพลาสมาที่พัฒนาขึ้น

การเกิดอาร์คพลาสมาเริ่มจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปยังหัวเชื่อมแบบอาร์คพลาสมาตามขนาดของกระแสที่ต้องการจากนั้นเปิดแกสอาร์กอนให้ไหลผ่านหัวเชื่อมในอัตราประมาณ 8 ลิตรต่อนาที [1] และจุดอาร์คเริ่มต้นด้วยวงจรกำเนิดศักดาไฟฟ้าสูงความถี่สูง ซึ่งจะทำให้แกสอาร์กอนเกิดไอออไนซ์และนำกระแสในช่วงแรกเกิดอาร์คเริ่มต้นหลังจากนั้นจะเกิดอาร์คหลักจากแหล่งจ่ายเต็มที่ได้ลำพลาสมาจากหัวเชื่อม

3.3 การออกแบบวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์

จากข้อมูลความต้องการกระแสของไมโครอาร์คพลาสมาในข้อ 3.1 สามารถออกแบบวงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตซ์ชนิดกระแสทางออกคงที่ได้ดังในแผนภาพรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพโครงสร้างของของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตซ์ของเครื่องไมโครอาร์คพลาสมา

การทำงานของวงจรจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซ์ที่ออกแบบขึ้นมีดังนี้

ส่วนที่ 1 ด้านเข้ารับไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 50 Hz 1 เฟส เข้ามาผ่านวงจรกรองสิ่งรบกวน (EMI filter) และวงจรป้องกันการกระชากของกระแสเนื่องจากในวงจรกรองมีตัวเก็บประจุความจุสูงอยู่

ส่วนที่ 2 ไฟฟ้ากระแสสลับหลังผ่านวงจรส่วนแรกจะเข้าสู่วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (bridge rectifier) เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 310 V และกรองพัลซ์ศักดาไฟฟ้าให้เรียบโดยตัวเก็บประจุความจุสูง

ส่วนที่ 3 วงจรสวิตซ์จะจัดวงจรแบบครึ่งบริดจ์ (half bridge rectifier) โดยใช้เพาเวอร์มอดเฟต (power MOSFET) ชิ้นส่วนสวิตซ์เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรง 310 V เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 310 V (peak to peak) รูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ประมาณ 20 kHz

ส่วนที่ 4 เป็นวงจรลดศักดาไฟฟ้าโดยหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำงานที่ความถี่ใช้งาน 20 kHz ใช้หม้อแปลงที่ใช้แกนทำด้วยสารเฟอไรท์ซึ่งออกแบบให้แปลงศักดาไฟฟ้าจาก 310 V_{p-p} เป็น 80 V_{p-p}

ส่วนที่ 5 เป็นวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (bridge rectifier) เพื่อเปลี่ยนศักดาไฟฟ้ากระแสสลับ 80 Vp-p ความถี่ 20 kHz เป็นแรงดันกระแสตรง 80 V

ส่วนที่ 6 ตัวต้านทานต่ออนุกรมกับวงจรเพื่อตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านทำหน้าที่แปลงกระแสเป็นศักดาไฟฟ้าป้อนกลับ (feedback)

ส่วนที่ 7 วงจรขยายศักดาไฟฟ้าที่ได้จากตัวต้านทาน นี้จะผ่านเข้าวงจรกรองสิ่งรบกวนเพื่อลดสัญญาณรบกวนและขยายให้มีขนาดใหญ่พอที่จะเข้าไปเปรียบเทียบกับศักดาไฟฟ้าอ้างอิงที่วงจรขยายศักดาคลาดเคลื่อน (error amplifier)

ส่วนที่ 8 วงจรกำเนิดศักดาไฟฟ้าอ้างอิงตั้งศักดาไฟฟ้าอ้างอิงค่าหนึ่งที่มากกว่าศักดาที่มาจากวงจรขยาย ในสภาวะไม่จ่ายกระแส (no load) เพื่อใช้เปรียบเทียบกับศักดาไฟฟ้านั้นที่วงจรขยายศักดาคลาดเคลื่อน (error amp)

ส่วนที่ 9 วงจรขยายศักดาคลาดเคลื่อน (error amplifier) ทำหน้าที่เปรียบเทียบศักดาไฟฟ้าระหว่างศักดาไฟฟ้าอ้างอิงและศักดาไฟฟ้าป้อนกลับจากการแปลงกระแส การลัดวงจรที่วงจรทางออกจะทำให้ศักดาไฟฟ้าป้อนกลับที่เกิดจากกระแสโหลดมีค่ามากกว่าศักดาไฟฟ้าอ้างอิง และนำค่าผลความคลาดเคลื่อนศักดาไฟฟ้าไปควบคุมวงจร PWM ทำการปรับความกว้างพัลส์ (pulse width) จนได้ศักดาไฟฟ้าป้อนกลับที่มาจากกระแสโหลดเท่ากับศักดาไฟฟ้าอ้างอิง

ส่วนที่ 10 วงจรสร้างสัญญาณ pulse width modulation (PWM) ไปควบคุมวงจรสวิตช์ power MOSFET วงจรนี้จะสร้างสัญญาณความถี่ 20 kHz ในสภาวะ no load ที่มี duty cycle 40 % และมี 2 สัญญาณที่ทำงานสลับกันและในสภาวะที่มีโหลดมากหรือลัดวงจรสัญญาณนี้จะเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์ลงเพื่อควบคุมให้กระแสขาออกคงที่

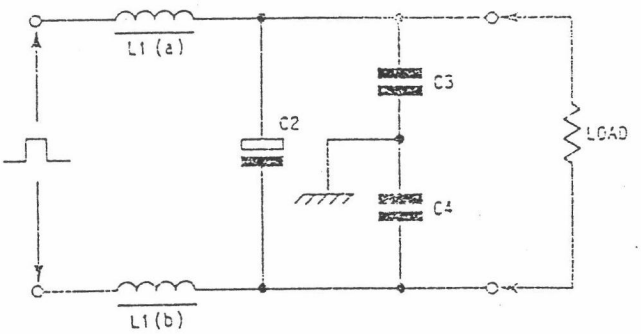
ส่วนที่ 11 วงจรส่งผ่านสัญญาณด้วยแสง (optoisolate) เป็นการแยกสัญญาณควบคุมออกจากด้านที่มีศักดาไฟฟ้าสูงเพื่อแยกกราวนด์ของทั้ง 2 ส่วนออกจากกัน

ส่วนที่ 12 วงจรขับสัญญาณเป็นวงจรช่วยเพิ่มความแรงของสัญญาณควบคุมให้สูงเพียงพอที่จะขับ power MOSFET ได้ด้วยความเร็วสูง

3.3.1 การออกแบบวงจร EMI Filter ขนาดพิกัดของ Circuit Breaker และวงจรป้องกันการเกิดกระแสกระชาก

วงจร EMI filter (electromagnetic Interference filter) ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดจะมีวงจรตามรูปที่ 3.4 และมีพิกัดกระแสต่าง ๆกันจากข้อมูลกระแสขาออกสูงสุด 20 A แรงดันขณะไม่มีโหลด 80 V แรงดันขณะจ่ายโหลดที่ 20 A ประมาณ 50 V ดังนั้น กำลังสูงสุด 1000 W ประมาณค่าประสิทธิภาพของเครื่อง 75 % ดังนั้น กำลังด้านเข้าสูงสุดคือ

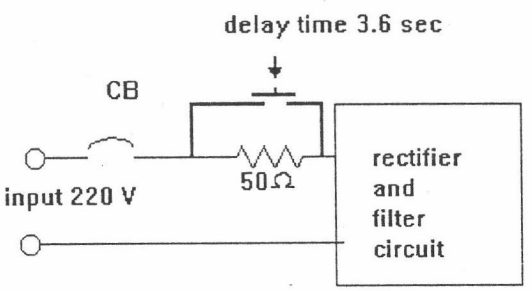
$\frac{1000W}{0.75} = 1334W$ กระแสด้านเข้าสูงสุดจะมีค่า $\frac{1334W}{220V} = 6A$ ถ้าคิดค่า power factor เท่ากับ 1 ดังนั้นจึงเลือก EMI filter ที่มีพิกัดใกล้เคียงกับพิกัดกระแสด้านเข้าของวงจรซึ่งหาได้ค่าคือ 240 V กระแส 8 A



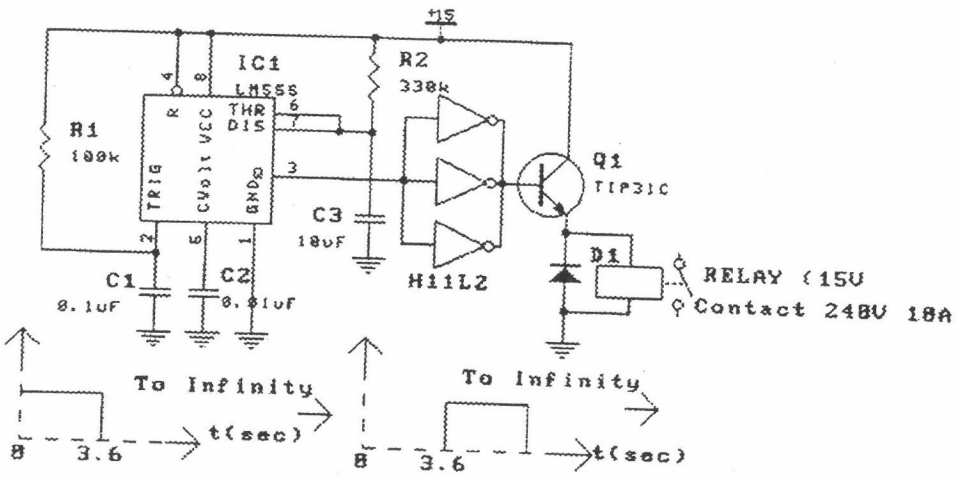
รูปที่ 3.4 วงจร EMI filter

circuit breaker ที่ใช้ป้องกันการลัดวงจรและใช้เปิดปิดวงจรเลือกใช้ที่มีพิกัดใกล้เคียงกับกระแสด้านเข้าคือ ใช้พิกัดกระแส 10 A พิกัดศักดาไฟฟ้า 220 V

วงจรป้องกันการเกิดกระแสกระชากเข้าตัวเก็บประจุกรองกระแสขณะเปิดวงจรจัดให้สวิตช์หน่วงในวงจรรูป 3.5 เปิดวงจรในช่วงแรกตั้งไว้ 4 วินาที ให้ผ่านความต้านทาน R_1 เพื่อจำกัดกระแสตอนเปิดวงจร และหลังจาก 4 วินาทีจะทำการต่อวงจรตรงเพื่อเป็นการลดความสูญเสียและให้วงจรทำงานเต็มพิกัดศักดาไฟฟ้าซึ่งวงจรป้องกันการเกิดกระแสกระชากเข้าตัวเก็บประจุแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.5 วงจรป้องกันการเกิดกระแสกระชากเข้าตัวเก็บประจุกรองกระแส



รูปที่ 3.6 วงจร delay time 3.6 วินาที

การทำงานของวงจรหน่วงเวลา (delay time) เลือกใช้ไอซีเบอร์ LM555 ต่อวงจรแบบ monostable จะมีคาบเวลา เท่ากับ T ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$T = 1.1R_T C_T \quad \text{.....3.1}$$

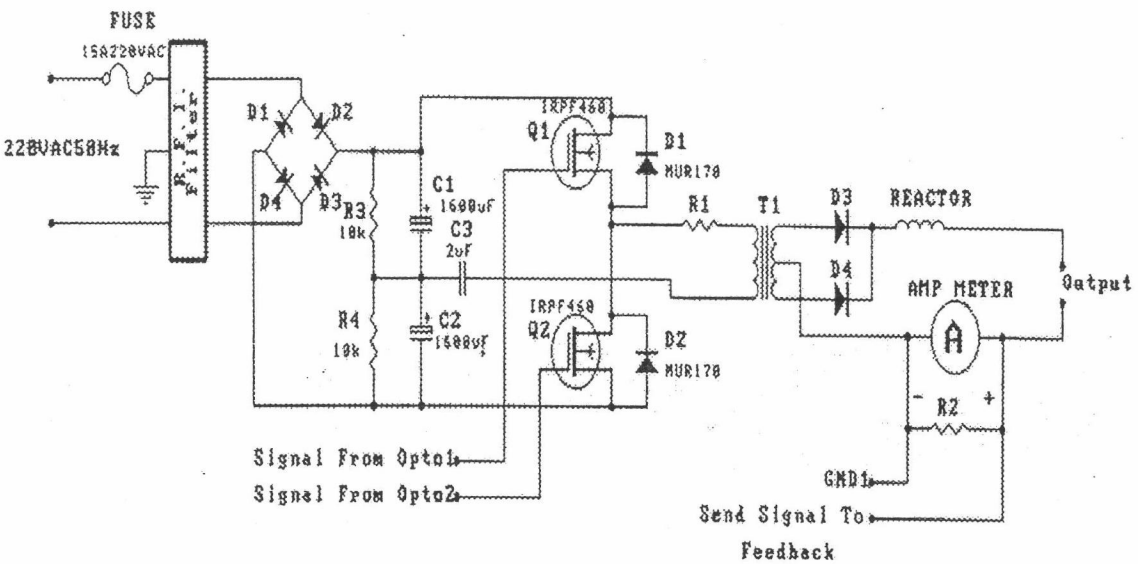
โดยที่ R_T คือ ความต้านทานหน่วย โอห์ม

C_T คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุหน่วยฟารัด

ต้องการให้หน่วงเวลาประมาณ 4 วินาทีจึงเลือก R_t เท่ากับ 330 กิโลโอห์ม และ C_T เท่ากับ 10 μF ดังนั้นคำนวณเวลาที่ LM 555 กำเนิดพัลส์รูปเหลี่ยมได้เท่ากับ $T = 1.1 \times 330 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6} =$ 3.6 วินาทีเมื่อจ่ายไฟฟ้าเข้า LM 555 จะส่งพัลส์ 15 V มีความกว้างพัลส์ 3.6 วินาทีผ่านอินเวอเตอร์ H11L2 เพื่อกลับสัญญาณและขับวงจรเบสของทรานซิสเตอร์ทำให้ทรานซิสเตอร์ TIP 31C นำกระแสและรีเลย์จะดึงหน้าสัมผัสสวิตซ์ให้ปิดวงจรในเวลา 3.6 วินาที

3.3.2 การออกแบบวงจรเรียงกระแสและกรองกระแส

จากการคำนวณกระแสด้านเข้าสูงสุดในข้อที่ 3.3.1 ได้ 6 A และขณะเริ่มเปิดเครื่องจะเกิดกระแสกระชากเนื่องจากตัวเก็บประจุกรองกระแส ดังนั้นจึงเลือกไดโอด(D1- D4)เผื่ออัตราทนกระแสไว้ที่ค่า 35 A ศักดาไฟฟ้ากลับทาง 400 V และจัดวงจรไฟฟ้าแบบบริดจ์ได้ตัววงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 3.7 เลือกไดโอดบริดจ์เบอร์ KBPC3504



รูปที่ 3.7 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า

ค่าความจุของตัวเก็บประจุคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 $C = \frac{It}{\Delta V}$ โดยประมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องเท่ากับ 1000 W ประสิทธิภาพของเครื่อง 75 % ศักดาไฟฟ้าด้านเข้า 220 V 50 Hz จากการคำนวณจะได้กำลังด้านเข้า P_{in} เท่ากับ 1334 W กระแส 6 A ถ้ากำหนดให้ ripple voltage มีค่าเท่ากับ 50 V จะได้ค่าความจุของตัวเก็บประจุ

$$C = \frac{6(10 \times 10^{-3})}{50} = 1200\,\mu F$$

จากวงจร half bridge ทำการต่อตัวเก็บประจุ อนุกรมกัน 2 ตัวดังนั้นตัวเก็บประจุ แต่ละตัวมีขนาด 1200 μF แต่ไม่สามารถหาได้ จึงใช้ ตัวเก็บประจุ ที่มีค่า 1600 μF แทน โดยสามารถรับศักดากระแสตรงได้ 400 Vdc

เนื่องจากตามมาตราฐานของ วสท. 408 กำหนดให้ตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันไม่เกิน 600 V จะต้องมีความต้านทานต่ออยู่เพื่อช่วยให้ตัวเก็บประจุคายประจุให้แรงดันลดลงเหลือ 50 V ภายใน 1 นาที ค่าความต้านทานหาได้จากสมการ

$$V_C = 1.1 \times V_{DC} \times EPX^{-60/RC} \quad \text{.....3.2}$$

แทนค่า V_{DC} = 155 Volts

Vc = 50 Volts

C = 1600 μF

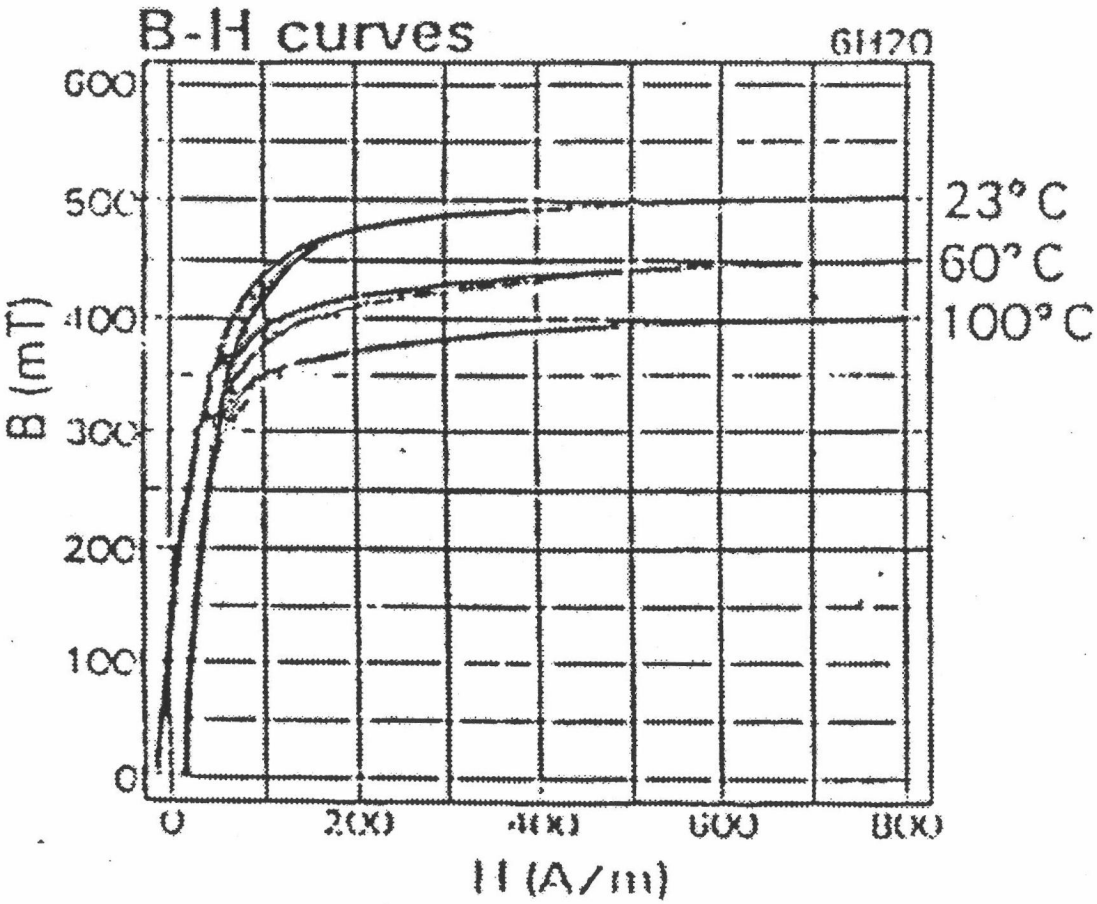
จะได้ R = 30.6 k Ω เนื่องจากความต้านทานที่ทนกำลังไฟฟ้าสูงมีค่าจำกัดจึงเลือกใช้ 10 k Ω กำลังไฟฟ้าที่ได้รับมากที่สุด 2.4 W เลือกใช้แบบกระเบื้องที่มี ค่า 5 W

3.3.3 การเลือกชิ้นส่วนกำลังในวงจรสวิตซ์

จากคุณสมบัติชิ้นส่วนทรานซิสเตอร์กำลังในตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าชิ้นส่วนที่ใช้เป็นสวิตซ์ความถี่สูงได้ดีสามารถเลือกใช้ได้ทั้ง IGBT และ power MOSFET เนื่องจาก power MOSFET สามารถหาได้ง่ายกว่าจึงเลือกใช้ power MOSFET ที่รับกระแสได้ 13 A ศักดาไฟฟ้า $V_{DS(max)}$ 500 V ดังแก่เบอร์ IRFP 460 (รายละเอียดในภาคผนวก ก.) , และขนาดสายไฟฟ้าที่ใช้ในวงจรด้านขดปฐมภูมิซึ่งรับกระแสสูงสุดไม่เกิน 13 A เลือกใช้ขนาด 2.5 mm^2 และด้านวงจรขดทุติยภูมิปรับกระแสสูงสุดไม่เกิน 25 A จึงเลือกขนาดของสาย 6 mm^2

3.3.4 การเลือกแกนเฟอร์ไรท์ของหม้อแปลง

แกนเฟอร์ไรท์ใหญ่สุดที่สามารถหาได้คือแกนแบบ EE 80/76 มีความสามารถรับพิกัดกำลังได้ประมาณ 700 W (รายละเอียดในภาคผนวก ข) ที่ความถี่ 20 kHz จึงใช้แกนแบบนี้ 2 แกนรวมกันและจากค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เลือกจะใช้ค่าประมาณครึ่งหนึ่งความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว (B_{sat}) เพื่อป้องกันการอิ่มตัวของแกน จากรูปที่ 3.8 จะได้ B ประมาณ 200 mT



รูปที่ 3.8 แสดง B-H curve ของแกนเฟอร์ไรท์แบบ EE80/76 ชนิด 6H20

การคำนวณหารอบของขดลวด

ก) คาบเวลาการทำงาน

$$T = 1/f$$

$$= \frac{1}{20\times10^{3}} = 50\mu s$$

ข) คำนวณหาเวลานำกระแส

$$T_{on\ (Max)} = 0.8\ (T/2) = 0.4\ T$$

$$T_{on}\ (Max) = 0.4\ T$$

$$= 0.4\times50\times10^{-6}$$

$$= 20\ \mu S$$

ค) คำนวณหาจำนวนรอบขดปฐมภูมิ (N_p) จากสมการ 2.8

$$N_p = \frac{V_p \times t_{on}}{\Delta B \times A_{cp}}$$

แกนแบบ EE80/76 2แกนรวมกันมีพื้นที่หน้าตัด 754 mm^2 จะได้

$$N_p = \frac{155\times20}{200\times10^{-3}\times754} = 20.54 \quad \text{รอบ}$$

ดังนั้นเลือกใช้ N_p = 21 รอบ

ง) คำนวณหาจำนวนรอบขดทุติยภูมิ (N_s)

ศักดาไฟฟ้าที่ด้านทุติยภูมิต้องการใช้ 80 V แต่เผื่อค่าไว้ 85 V

$$N_S = N_P \times \frac{V_s}{V_P} = 21\times\frac{85}{155} = 11.5 \quad \text{รอบ}$$

ดังนั้นเลือกใช้ N_S = 12 รอบ

ถ้าต้องการให้ด้านทุติยภูมิมีศักดาไฟฟ้าออกมา 160 V_{PP}และมีแทปกลางตรงกลางเพื่อวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นซึ่งใช้ไดโอด 2 ตัว N_S = 24 รอบ

3.3.5 การออกแบบวงจรจ่ายกระแสด้านออก

เนื่องจากกระแสทางออกมีความถี่สูง ดังนั้นไดโอดเรียงกระแสด้านออกควรใช้ชนิด ultrafast recovery ซึ่งมีพิกัดอัตราศักดาไฟฟ้าและกระแส 200 V 50 A เนื่องจากหาไม่ได้จึงใช้ชนิด superfast recovery แทนใช้เบอร์ IR 60 HFU-400 ซึ่งสามารถทนศักดาไฟฟ้าได้ 400 V และนำกระแสได้ 60 A ที่ 82 °C มี recovery time 60 ns และขดลวดทางออกของวงจรคำนวณได้จาก

$$L = \frac{E_{out} t_{off}}{0.25 I_{out}} \qquad \text{.....3.3}$$

โดย t_{off} คำนวณได้จาก

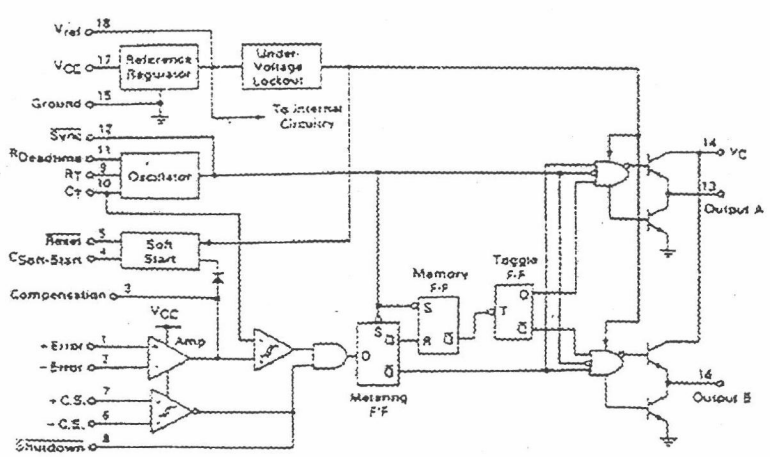
$$t_{off} = \frac{1 - \left(E_{out} / E_{in} \right)}{2 f} = \frac{1 - \left(80/90 \right)}{40 \times 10^3} = 2.78 \ \mu S$$

แทนค่า t_{off} , E_{out} และ I_{out} ในสมการ 3.3 จะได้

$$L = \frac{80 \times 2.78}{20} = 11.12 \ \mu H$$

3.4 การออกแบบวงจรควบคุมกระแสด้านออก

การควบคุมกระแสทางออกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตช์ใช้การควบคุมความกว้างของพัลส์ของความถี่ที่กำเนิดขึ้นเพื่อขับ power MOSFET ซึ่งการควบคุมความกว้างของพัลส์จากการป้อนกลับของสัญญาณคลาดเคลื่อนที่ตรวจพบจากการเปรียบเทียบนี้เรียกว่า “pulse width moderation PWM” ปัจจุบันมีการผลิตไอซีสำเร็จรูปทำหน้าที่นี้โดยเฉพาะ ได้แก่ ไอซีเบอร์ SG 3524 , SG 3525 และ SG 3526 ในวงจรนี้เลือกใช้ไอซีเบอร์ SG3526 รายละเอียดในภาคผนวก ค. เนื่องจากจะต้องทำงานร่วมกับวงจรขับที่มีศักดาไฟฟ้าสูงจึงต้องจัดวงจรแยกกราวนด์ของวงจรควบคุมและวงจรขับออกจากกันซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ชิ้นส่วนในการแยกกราวนด์ เช่น pulse transformer หรือ optoisolator เป็นต้น โครงสร้างภายในของวงจรนี้แสดงในรูปที่ 3.9

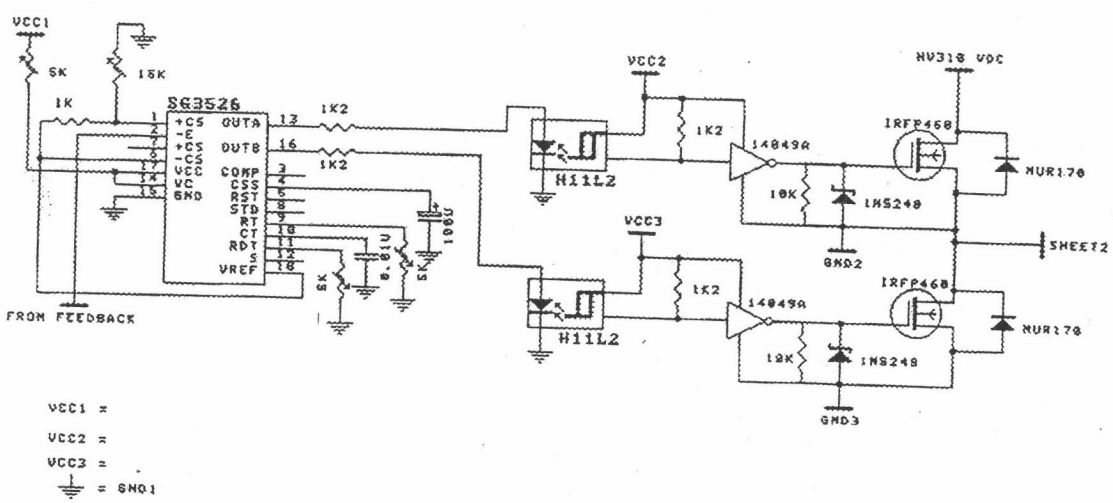


รูปที่ 3.9 โครงสร้างภายในของไอซี SG3526

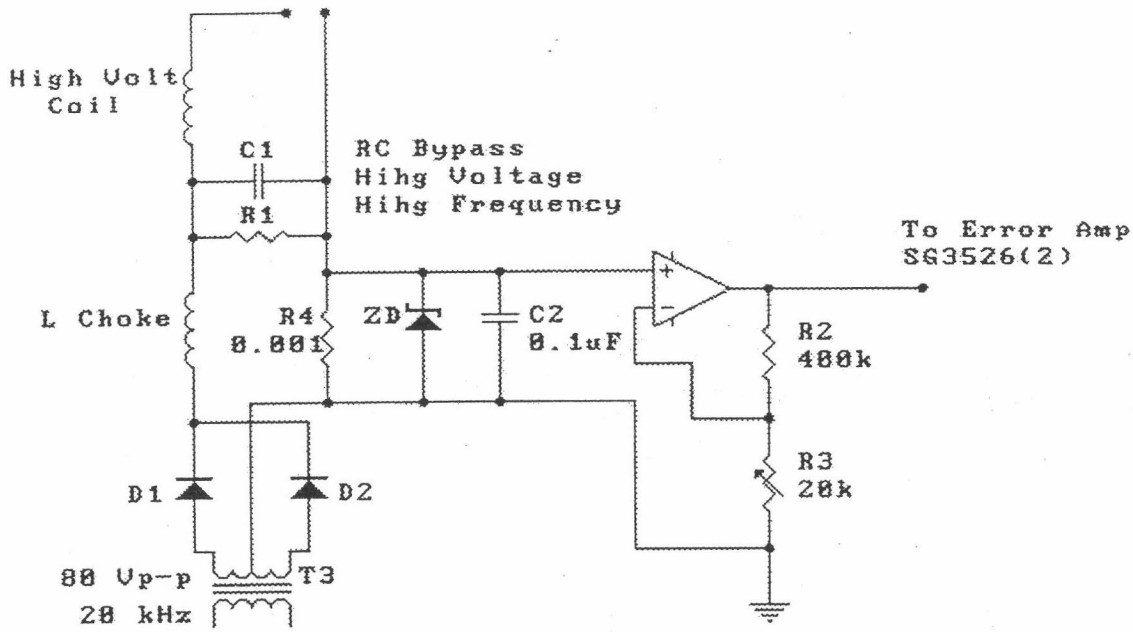
การใช้ไอซี PWM เบอร์ SG3526 ช่วยให้ลดการสร้างวงจรย่อยหลายส่วน เนื่องจากภายในโครงสร้างมีวงจรกำเนิดความถี่สวิตช์ วงจรจัดการควบคุมช่วงเวลานำกระแสของชิ้นส่วนสวิตช์ วงจรสร้างศักดาอ้างอิงและวงจรขยายระดับศักดาคลาดเคลื่อน (error amplifier) ซึ่งจะรับระดับศักดาไฟฟ้าป้อนกลับที่เป็นสัดส่วนกับกระแสทางออกมาเปรียบเทียบกับศักดาไฟฟ้าอ้างอิงและควบคุมความกว้างของพัลส์ผ่านวงจรแบบแยกกราวนด์

ในรูปที่ 3.10 เป็นวงจรควบคุมกระแสทางออกที่ออกแบบขึ้นโดยใช้ไอซี SG3526 สัญญาณทางออกที่ขา 16 และขา 14 จะขับ power MOSFET Q_1และ Q_2 ผ่านวงจรแยกกราวนด์ซึ่งเลือกใช้แบบ optoisolator ที่ U_1 และ U_2 เป็นไอซีเบอร์ H11L2 การปรับกระแสของแหล่งจ่ายปรับจากฐานเริ่มต้นของความกว้างพัลส์ที่ V_R 5 kΩ ที่ขา 11 ของไอซี SG3526

การควบคุมกระแสทางออกให้คงที่ใช้ความต้านทานแปลงค่ากระแสทางออกมาเป็นศักดาไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับกระแส ป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับศักดาไฟฟ้าอ้างอิงของไอซี SG3526 ที่ขา 2 เพื่อให้วงจรควบคุมปรับความกว้างของพัลส์ที่ขับ Q_1และ Q_2 ให้ได้กระแสทางออกคงที่ตามต้องการดังในวงจรในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 วงจรควบคุม



รูปที่ 3.11 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นศักดาไฟฟ้าป้อนกลับเพื่อควบคุมกระแสให้คงที่

จากวงจรค่าความต้านทานป้อนกลับคำนวณได้จากสัดส่วนของกราฟแปลงกระแสเป็นศักดาไฟฟ้าค่าสูงสุดที่ 30 mA , 30 mV ดังนั้นค่าความต้านทานจะมีค่า

$$R = \frac{V}{I} = \frac{30mV}{30A} = 1m\Omega$$

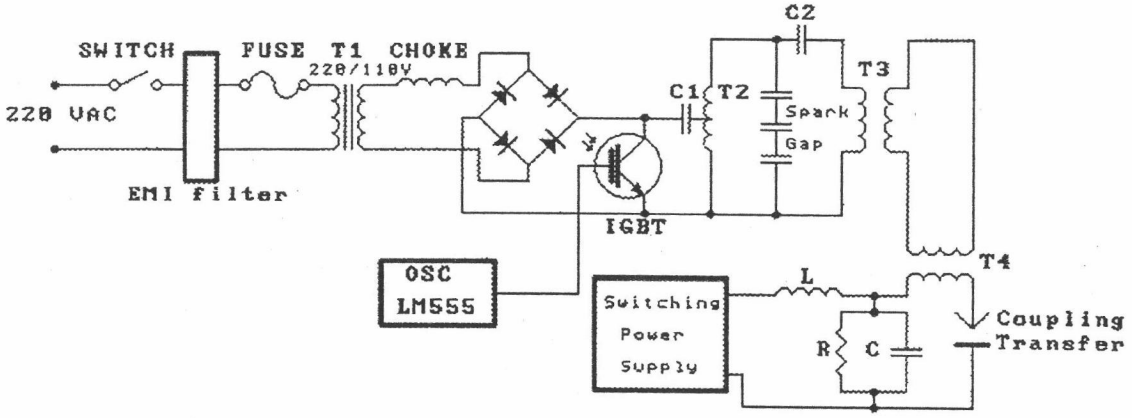
เนื่องจากศักดาไฟฟ้าอ้างอิงที่ ไอซีควบคุม SG 3526 ปรับได้ที่ค่า 0.63 V แต่วงจรแปลงกระแสเป็นศักดาไฟฟ้า สามารถแปลงศักดาไฟฟ้าได้สูงสุด ($V_{feedback}$) ได้เท่ากับ $I \times R = 30 \times 0.001 = 0.03V$ ดังนั้นจึงต้องการอัตราขยายเท่ากับ 0.63/0.03=21 เท่า ในวงจรจึงใช้วงจรขยายแบบไม่กลับสัญญาณซึ่งมีอัตราขยาย

$$A_V = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \frac{400k + 20k}{20k} = \text{ 21 เท่า}$$

โดยที่ทางออกของวงจรใช้ไดโอดซีเนอร์ ไว้ป้องกันศักดาไฟฟ้าเกินและใช้ตัวเก็บประจุไว้กรองสิ่งรบกวนขณะเชื่อมไม่ให้รบกวนการควบคุมกระแสของไอซี PWM

3.5 การออกแบบระบบจุดอาร์คด้วยศักดาไฟฟ้าสูงความถี่สูง

การกำเนิดอาร์คพลาสมาจำเป็นต้องมีการเริ่มต้นอาร์คไฟฟ้าให้เกิดการไอออไนซ์ของแกสเพื่อสร้างภาวะนำกระแสของแกส ในการพัฒนาเครื่องไมโครอาร์คพลาสมานี้เลือกใช้การจุดอาร์คด้วยศักดาไฟฟ้าสูงความถี่สูง ซึ่งตามปกติจะใช้ศักดาไฟฟ้าประมาณ 1 - 5 kV ที่ความถี่สูงมากกว่า 1 MHz เนื่องจากอาร์คแบบไมโครนี้มีกระแสต่ำการรักษาพลาสมาให้เกิดได้ต่อเนื่องจะต้องใช้ศักดาไฟฟ้าสูงผสมกับแหล่งจ่ายกระแสต่อเนื่องจึงได้ออกแบบระบบจุดอาร์คที่มีขนาดเล็กและทำงานได้ต่อเนื่อง ด้วยการประยุกต์ใช้คอยล์จุดระเบิดเครื่องยนต์ (ignition coil) ของเครื่องยนต์มาสร้างเป็นวงจรกำเนิดศักดาไฟฟ้าสูงและกำเนิดความถี่สูงที่ศักดาไฟฟ้าสูงด้วยคอยล์เทสลา (Tesla coil) ด้วยวงจรในรูปที่ 3.12

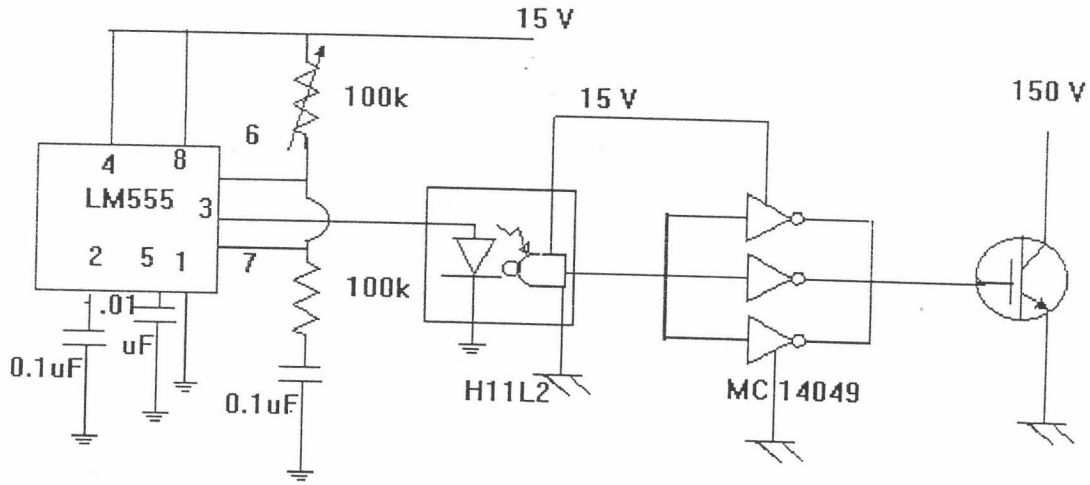


รูปที่ 3.12 วงจรสร้างศักดาไฟฟ้าสูงความถี่สูง

3.5.1 การออกแบบวงจรกำเนิดไฟฟ้าศักดาสูง

วงจรกำเนิดไฟฟ้าศักดาสูงเลือกใช้ไอซีเบอร์ 555 เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณรูปเหลี่ยมที่มี duty cycle ประมาณ 50% ขับวงจรสวิตช์ด้วย IGBT ขนาด 600 V 30 A ผ่านไอซี optoisolator และเกตกลับสัญญาณ MC 14049 ใช้ศักดาไฟฟ้ากระแสตรงในวงจรสวิตช์ 150 V ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ทำการสร้างศักดาไฟฟ้าสูงจากคอยล์จุดระเบิดเครื่องยนต์ทำงานด้วยกระบวนการคายประจุจากตัวเก็บประจุ (capacitor discharge) โดยจัดวงจรสวิตช์ IGBT ให้เก็บประจุผ่านโชค (choke) L1 และคายประจุผ่าน IGBT ขณะรับสัญญาณจากไอซี 555 ดังในรูปที่ 3.12

I17212376



รูปที่ 3.13 วงจรสร้างสัญญาณควบคุม IGBT

ก. การคำนวณหาค่าชิ้นส่วนประกอบการกำเนิดความถี่ของไอซี 555 เนื่องจากคอยล์จุดระเบิดเครื่องยนต์ทำงานที่ความถี่ไม่เกิน 100 Hz ดังนั้นจึงเลือกความถี่ที่ทำงานเท่ากับ 75 Hz และคำนวณหาค่า R_B จากสูตร 3.3

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)C} \quad \text{Hz} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 3.3$$

โดยเลือกค่า C = 0.1 μF และให้ R_A = 0.1 M Ω ดังนั้นค่า R_B จะมีค่า

$$75 = \frac{1.44}{(0.1 + 2R_B)0.1}$$

$$R_A = \frac{1}{2}\left(\frac{14.4}{75} - 0.1\right) = 0.092 \text{ M } \Omega$$

ในวงจรจึงเลือกใช้ความต้านทานปรับค่าได้ค่า 100 KΩ ปรับค่าให้วงจรกำเนิดความถี่ได้ 75 Hz ขา 3 ของวงจรกำเนิดความถี่จะขับ LED ภายในไอซี optoisolator ส่งสัญญาณผ่านไปยังไอวีเกตเบอร์ MC 14049 เพื่อขับ IGBT ทำงานเป็นสวิตช์

ข. การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของคอยล์จุดระเบิด

เพื่อป้องกันไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายในวงจรสวิตซ์กำเนิดคลื่นฮาร์มอนิกไปรบกวนภายนอกจำเป็นต้องใส่ EMI filter ไว้ทางเข้าของไฟฟ้ากระแสสลับที่หม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ซึ่งมีอัตรารอบ 2 : 1 ทำหน้าที่ลดศักดาไฟฟ้าทางออกจาก 220 V เป็น 110 V เพื่อให้คอยล์จุดระเบิดรถยนต์กำเนิดศักดาไฟฟ้าสูงประมาณ 20 kV ศักดาไฟฟ้าทางออกเมื่อผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์จะได้ไฟฟ้ากระแสตรงเต็มคลื่นซึ่งมีค่าสูงสุดของศักดาไฟฟ้าเท่ากับ $10V \times \sqrt{2} = 154V$ กระแสในวงจรจะมีการประจุและคายประจุในวงจรคอยล์จุดระเบิดเครื่องยนต์จึงเลือกใช้ไดโอดเรียงกระแสที่ทนศักดาไฟฟ้าไบอัสกลับทาง 400 V ที่กระแส 15 A และเลือกใช้ IGBT ที่มี V_{CE} = 600 V และ I_C = 30 A เพื่อเผื่อความปลอดภัยไว้สูงกว่าพิกัดมาก

กระแสจากวงจรแหล่งจ่ายขณะที่ IGBT อยู่ในภาวะคายประจุหรือนำกระแสจะถูกจำกัดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ L_1 เพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจร ขดลวด L_1 นี้เลือกใช้บัลลาสต์หลอดฟลูออเรสเซ็นต์ขนาด 18 W ซึ่งสามารถรับกระแสขณะจ่ายโหลดได้ 0.3 A และรับกระแสสูงสุดขณะลัดวงจรได้ 2.836 เท่าของกระแสปกติ[5] ดังนั้นวงจรกำเนิดศักดาไฟฟ้าสูงจึงสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

3.5.2 การออกแบบวงจรกำเนิดความถี่สูง

วงจรกำเนิดความถี่สูงใช้หม้อแปลงเทสลาโดยจูนความถี่เรโซแนนซ์อันดับ (series resonance) ที่ความถี่ 7 MHz จากการอาร์คของศักดาไฟฟ้าสูงที่กำเนิดจากคอยล์จุดระเบิดในเครื่องยนต์ผ่านสปาร์กแกป (spark gap) ซึ่งจะทำให้เกิดความถี่ฮาร์มอนิก (hamonic frequency) จากการอาร์ค วงจรจูนนี้เลือกค่า C เท่ากับ 50 pF คำนวณหาค่า L จากสูตรความถี่เรโซแนนซ์[6]ได้ดังนี้

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{.....3.4}$$

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

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 7 \times 10^6)^2 50 \times 10^{-12}} = 10.34\,\mu H$$

จากนั้นมาทำการคำนวณหาขนาดรัศมีและความยาวของขดลวดแกนอากาศโดยความสัมพันธ์ของค่า inductance จำนวนรอบ รัศมีและความยาวของขดลวดเป็นไปตามสมการที่ 3. 12

$$L = \frac{r^2 N^2}{9r + 10l} \quad \text{.....3.5}$$

โดยที่ L คือ inductance หน่วย μH

N คือ จำนวนรอบขอบขดลวด

r คือ รัศมีของขดลวด หน่วยนิ้ว

l คือ ความยาวของขดลวด หน่วยนิ้ว

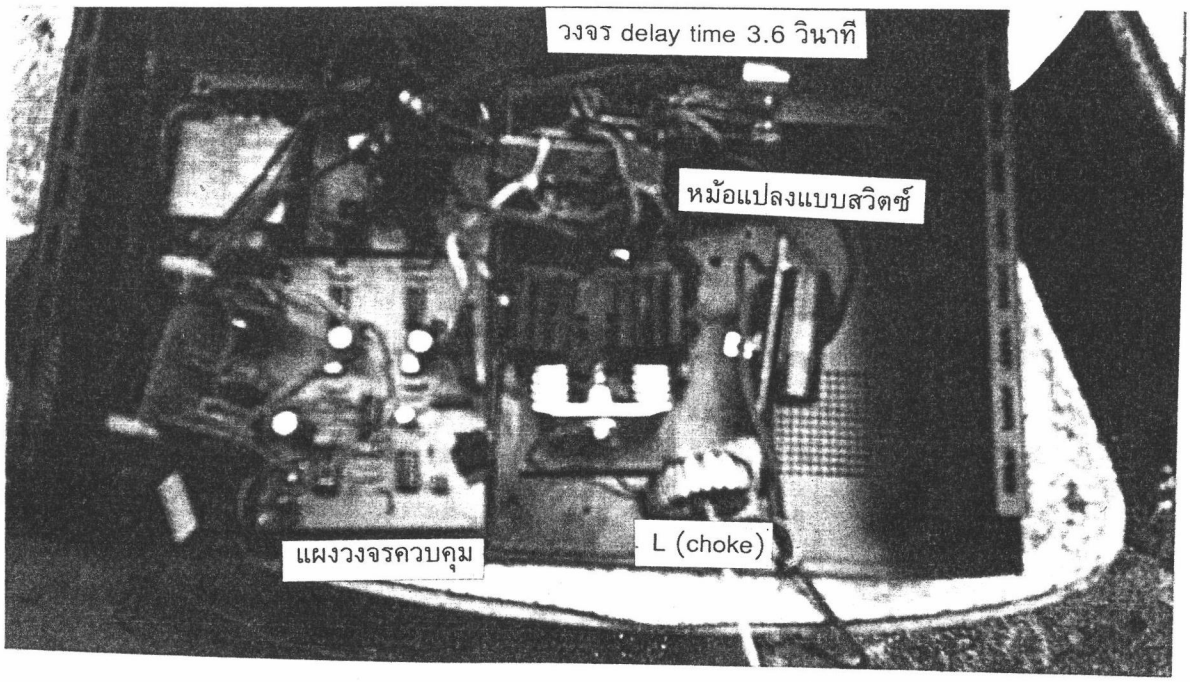
ดังนั้น $N = \frac{\sqrt{L(9r+10l)}}{r}$

เลือกให้ รัศมีของขดลวด 1.5 นิ้ว และ ความยาวของขดลวด 3 นิ้ว

ได้จำนวนรอบ $N = \frac{\sqrt{10.34(9(1.5)+10(3))}}{1.5}$ = 14.1 รอบ

ที่หม้อแปลงเทสลา T_3 จะเลือก L_1 = 14 รอบ กำหนดอัตรารอบ $N_1 : N_2$ = 2:1 จะได้ L_2 มีจำนวนรอบ 7 รอบ ส่งความถี่สูงมายังหม้อแปลงส่งผ่านสัญญาณ T_4 ซึ่งมีอัตรารอบ $N_1 : N_2$ = 2 : 1 ขดทุติยภูมิของ T_2 จะเป็นวงจรเรโซแนนซ์ขนาน (parallel resonance) เพื่อจูนความถี่จากคอยล์เทสลาโดยผ่าน R // C เพื่อเป็นการป้องกันมิให้ชิ้นส่วนกึ่งตัวนำในวงจรจ่ายกระแสได้รับความถี่สูงไปรบกวน

รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายเครื่องไมโครอาร์คพลาสมาที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายภายในเครื่องไมโครอาร์คพลาสมา