สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา
PLASMA CUTTING MACHINE

โดย

นาย สุขสันต์ โอวาทพารพร
นาย สุระนนท์ กนกบรรพต
นาย สุริยันต์ จันลอด
นาย โสภณ สายเจริญ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....72732
วัน,เดือน,ปี.....22 มิ.ย. 2550

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา
PLASMA CUTTING MACHINE

โดย

นาย สุขสันต์ โอวาทพารพร
นาย สุระนนท์ กนกบรรพต
นาย สุริยันต์ จันลอด
นาย โสภณ สายเจริญ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา

ผู้จัดทำ

1. นาย สุขสันต์ โอวาทพารพร
2. นาย สุระนนท์ กนกบรรพต
3. นาย สุริยันต์ จันลอด
4. นาย โสภณ สายเจริญ

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา

นาย สุขสันต์ โอวาทพารพร
นาย สุระนนท์ กนกบรรพต
นาย สุริยันต์ จันลอด
นาย โสภณ สายเจริญ
ผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นการศึกษา ทดลอง วิจัย และสร้างเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมาขึ้นโดยนำความรู้ทางด้านการสวิตชิ่งความถี่สูงซึ่งเป็นเทคนิคที่สำคัญในการทำอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เครื่องตัดโลหะแบบพลาสมาประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสตรงและแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสตรงถูกพัฒนาขึ้นจากวงจรฟลูบริดจ์ ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตชิ่งขณะแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ด้วยเทคนิควงจรเลื่อนเฟส และแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงก็ถูกพัฒนาขึ้นจากวงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ ส่วนประกอบภายในของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมานั้นประกอบไปด้วย วงจรเรียงกระแสความถี่ต่ำ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดจ์ หม้อแปลงความถี่สูง วงจรเรียงกระแสความถี่สูง หม้อแปลงเชื่อมโยง วงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ หม้อแปลงฟลายแบค และชุดวงจรควบคุม หลักการทำงานของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเริ่มจากแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรกรองกระแสได้แรงดัน 310 โวลต์ ต่อจากนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบพลัลส์สี่เหลี่ยมด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดจ์แล้วผ่านเข้าสู่หม้อแปลงความถี่สูงแปลงแรงดันลงและเข้าสู่วงจรกรองกระแสความถี่สูงเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ประมาณ 200-100 โวลต์ 10-20 แอมป์ สำหรับเป็นอาร์คหลักในการตัดโลหะ ส่วนหลักการทำงานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงนั้นจะเริ่มจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 50 โวลต์ เข้าสู่วงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์แล้วแปลงแรงดันขึ้นเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบพลัลส์สี่เหลี่ยมความถี่สูงโดยใช้หม้อแปลงฟลายแบคเพื่อทำให้เกิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่ประมาณ 2-6 กิโลโวลต์ เพื่อใช้เป็นอาร์คขณะเริ่มตัด สำหรับปริญญานิพนธ์นี้จะพัฒนาเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมาเพื่อใช้เป็นต้นแบบ โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดราคาต้นทุน ขนาดและน้ำหนักลง และเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าให้สูงขึ้น เพื่อพัฒนาไปสู่การผลิตเป็นการพานิชย์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PLASMA CUTTING MACHINE

Suksan Owatlanporn
Suranon Kanokbanpot
Suriyan Chanlot
Sopon Sayjarean
Asst. Prof. Dr. Anuwat Jangwanitlert Advisor
2006

ABSTRACT

The project focuses on a study, practice, research and development of a plasma cutting machine. This principle of this project is based on a high frequency switching power supply. The high frequency switching power supply is very important technology in power electronics that is useful for this project. The plasma cutting machine consists of two essential parts that are the dc switching power supply and the high-voltage high-frequency switching power supply. The dc switching power supply is developed from the zero-voltage-switching phase-shift full-bridge dc-dc converter, and the high-voltage high-frequency switching power supply is developed from a push-pull converter. This inside machine comprises the full-bridge low frequency rectifier, the full-bridge inverter, the high frequency transformer, the full-bridge high frequency rectifier, a coupling transformer, a push-pull converter circuit, a flyback transformer and a control circuit. The dc switching power supply is from an ac input 1 phase 220V converting to the 310V dc voltage. Then, the dc 310V converts to a high frequency voltage and steps down by transformer and then the high frequency voltage converts to the dc voltage approximately 200-100V, 10-20A that is main arc. The principle of high-voltage high-frequency switching power supply is the 50V dc voltage converting to the ac pulse voltage and stepping up to high voltage by flyback transformer at 2-6kV, which is starting arc. The objective of this project is to decrease cost, size, and weight. In addition, it also increases electrical power efficiency and development to the business.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาพินธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์ ความสำเร็จในครั้งนี้ไม่ได้มาจากความตั้งใจ ความรู้ ความสามารถและความสามัคคีของสมาชิกในกลุ่มเพียงอย่างเดียว แต่ได้มาจากความร่วมมือและความช่วยเหลือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน จึงต้องขอกล่าวถึงเพื่อเป็นการขอบคุณเป็นอย่างสูงและให้เกียรติระลึกถึง

ผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้จุดประกายความคิดในการริเริ่มการทำโครงงานเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมาและยังคอยให้คำแนะนำ เอาใจใส่ ติดตามผลการดำเนินงาน และชี้แนะแก้ไขในส่วนที่บกพร่อง ตลอดเวลา 1 ปีเต็มในการทำวิจัยครั้งนี้

อ. จิระศักดิ์ ส่งบุญแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาอีกท่านหนึ่งที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ รวมถึงการให้อุปกรณ์ในการทำโครงงานในครั้งนี้ ถึงแม้ว่าท่านจะไม่ได้เป็นอาจารย์สอนในสถาบันแห่งนี้แต่ท่านก็ยังแวะเข้ามาอยู่บ่อยๆ เพื่อคอยดูแลและติดตามโครงงานนี้ด้วยดีเสมอมา

บิดา มารดา ของสมาชิกในกลุ่มที่ทำโครงงานนี้ เพราะท่านเป็นผู้ที่สมาชิกทุกคนในกลุ่มรักและเคารพยิ่ง ท่านเป็นผู้มอบความรัก ความเอาใจใส่ และโอกาสทางการศึกษาจนได้มาถึงในขณะนี้ ไม่ว่าอุปสรรคจะยากหนักหนาสักเพียงใด กำลังใจจากท่านจะค่อยเป็นแรงผลักดันให้เราทุกคนลุกขึ้นและก้าวเดินใหม่อีกครั้ง อีกทั้งทุกๆ คนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ในพระคุณอันหาที่เปรียบมิได้

คุณนรงฤทธิ์ เสนาจิตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ได้คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมาโดยเฉพาะ อีกทั้งยังสละเวลามาเยี่ยมเยียนและติดตามดูการดำเนินงาน และชี้แนะข้อผิดพลาดหรือวิธีการที่ดีมาใช้

คุณธรรมฉัตร กงวิรัตน์ นักศึกษาระดับปริญญาโท ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะในการทำแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อีกทั้งยังให้เทคนิคและข้อมูลดีๆ ในการทำโครงงานครั้งนี้

พี่ป.โท ห้อง ECC406, เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ, คุณป้าแม่บ้านประจำชั้น 3-4 ตึก ECC, เพื่อนๆ ห้อง 4B และห้อง 9 (K) ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณสถาบันและท่านอาจารย์อันเป็นที่เคารพรักทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้าทั้งหลายตั้งแต่เยาว์วัยจนถึงปัจจุบัน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นาย สุขสันต์ โอวาทพารพร
นาย สุระนนท์ กนกบรรพต
นาย สุริยันต์ จันลอด
นาย โสภณ สายเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ I

ABSTRACT II

สารบัญรูป III

สารบัญตาราง VI

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 พลาสมา 1

1.2 ความสำคัญของปัญหา 3

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 4

1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย 4

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน 4

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย 5

บทที่ 2 พลาสมา 6

2.1 พลาสมา 6

2.2 การดิสชาร์จไฟฟ้าที่ความดันก๊าซต่ำ 6

2.3 เครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา 8

2.4 เครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา 9

2.5 วัสดุที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในต้นกำเนิดอาร์คพลาสมา 10

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 12

3.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา 12

3.2 วงจรเรียงกระแสและกรองกระแส 12

3.2.1 ไดโอดเรียงกระแส 13

3.2.2 ตัวเก็บประจุกรองกระแส 14

3.3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 15

3.3.1 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ 16

3.3.2 ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ 17

3.3.3 พุช–พูลคอนเวอร์ 18

3.3.4 ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ 19

3.3.5 ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ 20

3.4 การเลือกแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่งสำหรับเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา 20

3.5 คอนเวอร์เตอร์ฟลูบริดจ์แบบสวิตชิ่งขณะแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ 22

3.5.1 โครงสร้างของวงจรหลัก 23

3.5.2 โครงสร้างของวงจรเลื่อนเฟส 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.3 สภาวะการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ ... 25
3.5.4 การวิเคราะห์เชิงสมการแต่ละสภาวะการทำงาน ... 28
3.5.5 หลักการออกแบบ ... 31
3.6 หม้อแปลงสวิตช์ซิ่งความถี่สูง ... 31
3.6.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลงสวิตช์ซิ่ง ... 31
3.6.2 การเลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์ ... 31
3.6.3 การเลือกลวดทองแดง ... 37
3.6.4 การออกแบบหม้อแปลงสวิตช์ซิ่งความถี่สูง ... 40
3.7 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองทางด้านออก ... 40
3.7.1 ไดโอด ... 41
3.7.2 ตัวเหนี่ยวนำ ... 43
3.7.3 ตัวเก็บประจุ ... 45
3.8 วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง ... 46
3.8.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงด้วยฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ... 46
3.8.2 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงด้วยวงจรพุช–พูลคอนเวอร์เตอร์ ... 47
3.9 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟต ... 49
3.9.1 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วย TTL ... 49
3.9.2 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยไอซี CMOS ... 50
3.9.3 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยหม้อแปลง ... 50
3.10 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ... 51
3.10.1 การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ... 52
3.10.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ 16F628 ... 52
3.10.3 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F628 ... 55
3.10.4 คุณสมบัติทางเทคนิคของ PIC16F62X ... 57
3.11 หัวคบพลาสมา ... 58
3.12 เครื่องอัดอากาศ ... 59
บทที่ 4 การออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่ง ... 61
4.1 วงจรเรียงกระแสและกรองกระแส ... 61
4.1.1 การเลือกฟิวส์ ... 61
4.1.2 การเลือกขนาดของไดโอดเรียงกระแสแบบฟลูบริดจ์ ... 62
4.1.3 การคำนวณหาตัวเก็บประจุ ... 62
4.2 วงจรฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ... 63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 วงจรฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ 63
4.4 หม้อแปลงสวิตซ์ชิ่งความถี่สูง 64
4.5 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองทางด้านออก 67
4.5.1 ไดโอด 67
4.5.2 ตัวเหนี่ยวนำ 67
4.5.3 ตัวเก็บประจุ 69
4.6 วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง 70
4.7 วงจรควบคุม 71
4.8 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตหรือวงจรแยกกราวด์ 72
บทที่ 5 ผลการทดลอง 73
5.1 ผลทดสอบรูปสัญญาณ 75
5.2 ผลการทดลองกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพ 84
5.3 การทดสอบตัดชิ้นงานโลหะ 85
บทที่ 6 สรุปและเสนอแนวทางที่จะดำเนินการ 88
6.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง 88
6.2 แนวทางที่จะดำเนินการ 88
กิตติกรรมประกาศ 89
บรรณานุกรม 90
ภาคผนวก 91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	การเกิดอาร์คด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง	1
1.2	การเกิดอาร์คหลักตามแนวอาร์คไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง	2
1.3	การเกิดอาร์คหลักเต็มที่เพื่อใช้ในการตัดชิ้นงาน	2
2.1	ลักษณะการเกิดพลาสมาในหลอดสุญญากาศด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง	6
2.2	ช่วงการเกิดพลาสมาตามแรงดันและกระแสไฟฟ้า	8
2.3	วงจรไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง	10
3.1	โครงสร้างทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา	12
3.2	วงจรเรียงกระแส	13
3.3	ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	16
3.4	ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์	17
3.5	พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์	18
3.6	ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์	19
3.7	ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์	20
3.8	วงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์โดยมีมอสเฟตกำลังเป็นตัวสวิตชิ่ง	21
3.9	มอสเฟตกำลัง	22
3.10	วงจรหลักคอนเวอร์เตอร์พัลส์วิดท์มอดูเลตสวิตช์ที่แรงดันศูนย์แบบฟลูบริดจ์	23
3.11	สัญญาณการควบคุมการทำงานของมอสเฟต (ก) แบบพัลส์วิดท์มอดูเลตแบบธรรมดา (ข) แบบทำให้เกิดสภาวะสวิตช์ที่แรงดันศูนย์	24
3.12	รูปสัญญาณการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์	27
3.13	แสดงตัวอย่างขนาดของแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE	33
3.14	การเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็ก	34
3.15	การหาวงรอบฮีสเตอริซีสของสารเฟอร์โรแมกนิติก	35
3.16	แสดงส่วนของวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองทางด้านออก	41
3.17	สัญลักษณ์ คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอด	41
3.18	ไดโอดขณะหยุดนำกระแส	42
3.19	ไดโอดฟื้นตัวเร็ว	43
3.20	ภาพตัวอย่างจริงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	44
3.21	แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงด้วยวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	46
3.22	แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงด้วยวงจรพุช–พูลคอนเวอร์เตอร์	47
3.23	แสดงการขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยไอซี TTL	49
3.24	แสดงการขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยไอซี CMOS	50
3.25	แสดงวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยหม้อแปลง	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.26 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบหลักเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์..... 51
3.27 ไดอะแกรมการทำงานพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้
สถาปัตยกรรมแบบฮาร์วาร์ด..... 53
3.28 แสดงไดอะแกรมของกระบวนการไปป์ไลน์ที่ใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC.....54
3.29 แสดงไดอะแกรมของกระบวนการไปป์ไลน์เมื่อกระทำคำสั่งการกระโดด..... 54
3.30 ไดอะแกรมโครงสร้างการทำงานและการจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F628.. 56
3.31 แสดงหัวคบพลาสมา..... 58
3.32 แสดงโมเลกุลและความดันของก๊าซ..... 59
4.1 วงจรเรียงกระแสความถี่ต่ำและฟิวส์..... 61
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสพิกัดและอุณหภูมิ..... 61
4.3 วงจรฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์..... 63
4.4 หม้อแปลงความถี่สูงแบบแกน EE80..... 64
4.5 ลักษณะโครงสร้างและขนาดของแกนแม่เหล็ก..... 65
4.6 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองทางด้านออก..... 67
4.7 แกนเหล็กเฟอร์ไรต์ที่ใช้สำหรับเป็นหม้อแปลงฟลายแบค..... 70
4.8 วงจรควบคุมและจ่ายแรงดันสัญญาณ..... 71
4.9 วงจรแยกกราวด์ขับขาเกตของมอสเฟต..... 72
5.1 วงจรไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง..... 74
5.2 แรงดันและกระแสที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด..... 75
5.3 แรงดันและกระแสที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงขณะมีโหลด 10 แอมป์..... 75
5.4 แรงดันและกระแสที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงขณะมีโหลด 20 แอมป์..... 76
5.5 แรงดันและกระแสที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงขณะมีโหลด 30 แอมป์..... 76
5.6 แรงดันและกระแสที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด..... 77
5.7 แรงดันและกระแสที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงขณะมีโหลด 10 แอมป์..... 77
5.8 แรงดันและกระแสที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงขณะมีโหลด 20 แอมป์..... 78
5.9 แรงดันและกระแสที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงขณะมีโหลด 30 แอมป์..... 78
5.10 กระแสอินพุท 30 แอมป์..... 79
5.11 กระแสอินพุท 20 แอมป์..... 79
5.12 กระแสอินพุท 10 แอมป์..... 80
5.13 กระแสเอาท์พุท 10 แอมป์..... 80
5.14 กระแสเอาท์พุท 20 แอมป์..... 81
5.15 กระแสเอาท์พุท 30 แอมป์..... 81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.16 แรงดันเอาท์พุทขณะมีโหลด กระแส 30 แอมป์ 82
5.17 แรงดันเอาท์พุทขณะมีโหลด กระแส 20 แอมป์ 82
5.18 แรงดันเอาท์พุทขณะมีโหลด กระแส 10 แอมป์ 83
5.19 แรงดันเอาท์พุทขณะไม่มีโหลด 83
5.20 รูปกราฟแสดงประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง 84
5.21 วงจรไฟฟ้ารวมของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา 85
5.22 เริ่มเกิดลำพลาสมา 86
5.23 เกิดลำพลาสมาเต็มในขณะทำการตัด 86
5.24 การตัดโลหะด้วยลำพลาสมา 87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ตารางแสดงกลุ่มแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากดิสชาร์จไฟฟ้ากระแสตรงที่ความดันก๊าซต่ำ 7

3.1 ตารางแสดงรายละเอียดของแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE 33

3.2 ตารางแสดงขนาดของเส้นลวดทองแดง 37

3.3 ตารางแสดงองค์ประกอบของอากาศ 60

5.1 ตารางแสดงแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้าด้านออก 84

5.2 ตารางแสดงประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

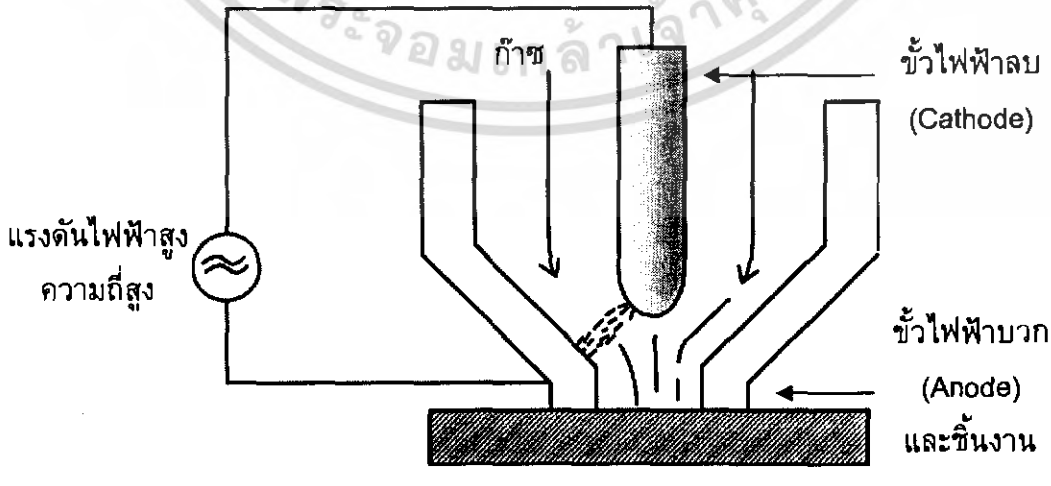
บทที่ 1
บทนำ

1.1 พลาสมา

พลาสมา (Plasma) ในความหมายทางวิทยาศาสตร์นั้นจะหมายถึงสถานะที่สี่ของสสาร ที่นอกเหนือไปจากสถานะของ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งในชีวิตประจำวันของคนเรานั้น ได้สัมผัสกับพลาสมาอยู่ตลอดเวลา ซึ่งถ้าเราได้สัมผัสกับพลาสมาในปริมาณมากๆ เราอาจจะได้รับความเจ็บปวดจากพลังงานของพลาสมาที่ถ่ายเทมาสู่ตัวเรา พลาสมาสามารถทำให้เกิดได้ง่าย เช่น การจุดไม้ขีดไฟ การจุดไลท์เตอร์เพื่อจุดบุหรี่ การจุดไฟในเตาแก๊ส รถยนต์ที่เรากำลังขับอยู่ก็ถูกขับเคลื่อนด้วยพลาสมาที่ร้อนจัดที่ได้จากการจุดระเบิดในลูกสูบของเครื่องยนต์ภายในตัวรถ หรือแม้แต่กระทั่งเครื่องบินไอพ่นก็ถูกขับเคลื่อนด้วยพลาสมาที่พ่นออกมาที่ท้ายเครื่องยนต์ตลอดเวลา แสดงว่าเรากำลังเกี่ยวข้องกับพลาสมาในชีวิตประจำวันแทบทั้งสิ้น

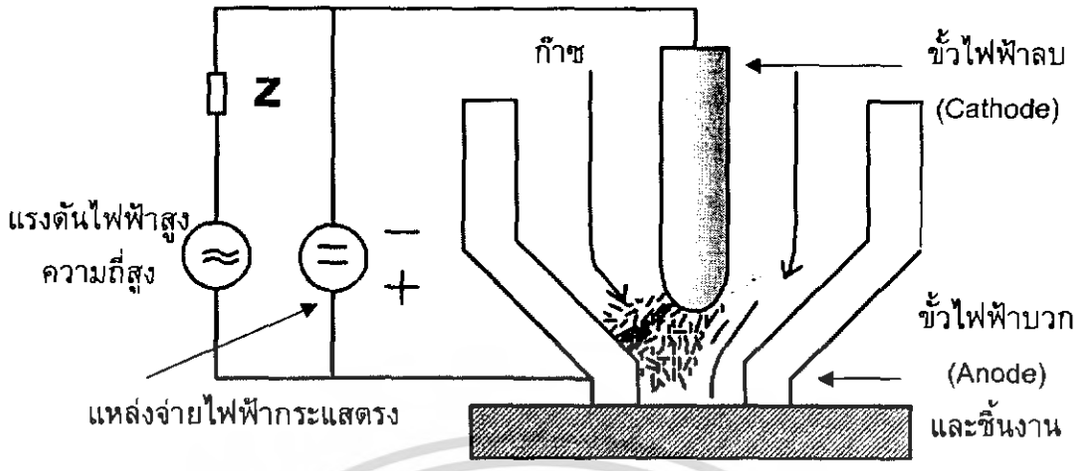
โลหกรรมพลาสมา เป็นการนำความร้อนของพลาสมามาใช้ให้เกิดประโยชน์ พลาสมาที่ใช้ในงานโลหกรรมได้จากกระแสไฟฟ้า เราเรียกว่า อาร์คพลาสมา (Arc Plasma) พลาสมาที่เกิดจากกระแสไฟฟ้านอกจากจะทำให้เกิดแสงสว่างแล้วยังใช้ประโยชน์ในการเชื่อมโลหะ (Plasma Welding) การตัดโลหะด้วยลำพลาสมา (Plasma Cutting) และการพ่นของเหลวด้วยพลาสมา (Plasma Spraying) เป็นต้น ได้อีกด้วย

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้จะเป็นการพัฒนาขั้นพื้นฐานของพลาสมาเพื่อนำไปสู่การพัฒนาการตัดโลหะแบบพลาสมา สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับโลหะ โดยทำให้เกิดการอาร์คด้วยวิธีไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง (High-Voltage and High-Frequency Arc) และจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องเพื่อใช้ในการตัดโลหะด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่มีกระแสไฟฟ้าสูง ซึ่งเป็นแบบทรานสเฟอร์อาร์ค (Transferred Arc) คือจะอาศัยชิ้นงานเป็นขั้วไฟฟ้าบวก (Anode) และหัวตัดโลหะเป็นขั้วไฟฟ้าลบ (Cathode) โดยมีขั้นตอนการเกิดพลาสมาเพื่อใช้ในการตัดโลหะดังรูป

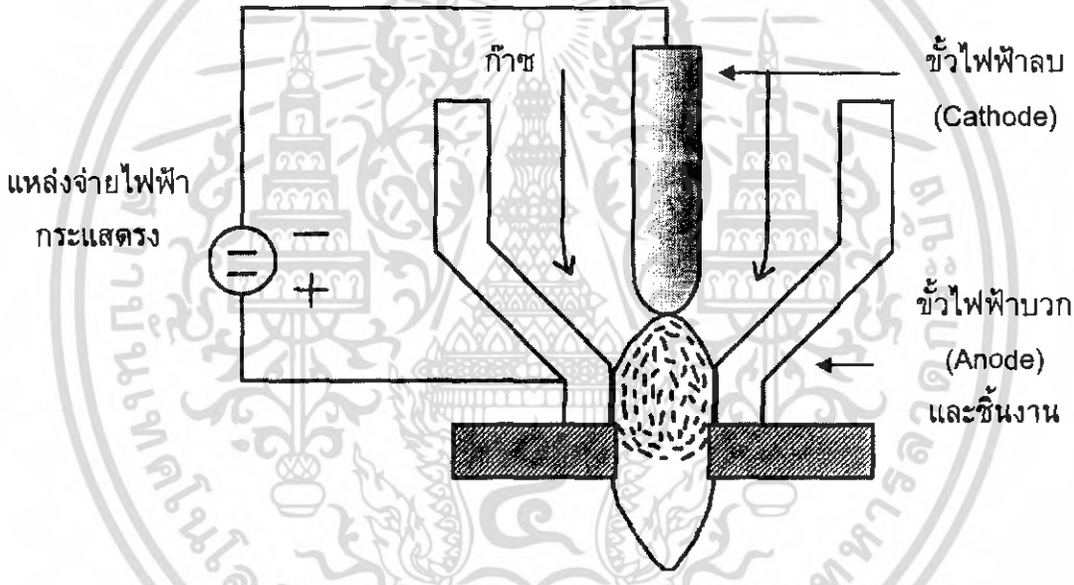


รูปที่ 1.1 การเกิดอาร์คด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 การเกิดอาร์คหลักตามแนวอาร์คไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง



รูปที่ 1.3 การเกิดอาร์คหลักเต็มที่เพื่อใช้ในการตัดชิ้นงาน

อาร์คไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 1.1 จะทำหน้าที่เป็นแนวทางเดินให้เกิดอาร์คหลักที่ได้จากเครื่องจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังรูปที่ 1.2 เมื่อเกิดอาร์คหลักแล้วในช่วงเวลาอันสั้นพลาสมาที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดอาร์คหลักรอบช่องว่างที่เป็นทางผ่านของก๊าซดังรูปที่ 1.3 และในลักษณะเช่นนี้จะแสดงให้เห็นว่าลำของอาร์คหลักและลำพลาสมาคงที่พร้อมที่จะนำไปใช้ตัดโลหะโดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงความถี่สูงอีกต่อไป แต่ถ้าหากไม่จุดอาร์คด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงแล้วก็จะทำให้เกิดอาร์คหลักได้ยาก ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้พลาสมาจะเกิดไม่ได้ถ้าไม่มีการอาร์คไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันนี้ ประเทศไทยของเรามีการนำเข้าสินค้าจากต่างประเทศในปริมาณสูง โดยเฉพาะเครื่องใช้ไฟฟ้า อีกทั้งสินค้าบางชนิดก็ยังไม่มีการผลิตขึ้นใช้ภายในประเทศ หรืออาจมีการผลิตแล้วแต่ยังมีราคาที่สูงเกินไป ทำให้เกิดการเสียดุลการค้า อาทิเช่น เครื่องเชื่อมพลาสมาและเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา สำหรับเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมาที่ใช้หลักการในการผลิตคล้ายกับเครื่องเชื่อมพลาสมาก็ยังมีผู้ที่เข้าใจในหลักการทำงานของการกำเนิดพลาสมาน้อยคนอยู่ เป็นสาเหตุที่ทำให้ไม่ค่อยมีการผลิตขึ้นใช้เองภายในประเทศ จึงทำให้ต้องสั่งซื้อและนำเข้าเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมาจากต่างประเทศที่มีราคาสูงมาใช้

เครื่องตัดโลหะแบบพลาสมานั้นมีองค์ประกอบหลักใหญ่ๆ 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง ดังนั้นการคิดค้นและหาวิธีสร้างแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่จะนำไปใช้กับหัวตัดโลหะแบบพลาสมาจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง การนำเอาเทคโนโลยีการสวิตชิ่งที่ความถี่สูงมาใช้ในการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะช่วยสร้างข้อได้เปรียบมากกว่าการใช้เทคโนโลยีที่ใช้ความถี่ต่ำ ทั้งในเรื่องของขนาดและประสิทธิภาพทางไฟฟ้า แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่งของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมานี้ ได้นำความรู้ทางด้านการแปลงรูปพลังงานด้วยการสวิตชิ่งที่ความถี่สูงมาใช้ โดยนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converter) และการใช้เทคนิคการสวิตชิ่งที่แรงดันเป็นศูนย์ (Zero Voltage Switching) มาประยุกต์ใช้ แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่งของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมาที่ออกแบบนี้จะทำงานที่ความถี่ประมาณ 20 - 100 กิโลเฮิร์ท มีกำลังด้านออกประมาณ 3 กิโลวัตต์ ซึ่งคาดว่าจะสามารถตัดโลหะได้หนาถึง 10 มิลลิเมตร โดยประกอบด้วย วงจรย่อยภายในดังนี้

- วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่น
- วงจรฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้มอสเฟตกำลังเป็นตัวสวิตชิ่ง
- หม้อแปลงความถี่สูง
- วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นทางออก
- วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง
- วงจรควบคุมการทำงาน
- วงจรป้องกันกระแสและแรงดันเกินพิกัด

ซึ่งวงจรทั้งหมดนี้ได้ออกแบบขึ้นเพื่อพัฒนาเป็นเครื่องต้นแบบสำหรับการตัดโลหะแบบพลาสมา เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและการผลิตเพื่อเป็นการค้า จากที่ได้กล่าวมานี้เป็นเหตุผลสำคัญของการศึกษาวิจัยเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา เพื่อสร้างเครื่องที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพการใช้งานที่ดีต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาข้อมูลขั้นพื้นฐาน สำหรับการพัฒนาต้นกำเนิดความร้อนจากพลาสมา สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมโลหะ
2. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่งของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา
3. เพื่อพัฒนาแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่งของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมาที่ใช้ความถี่ประมาณ 20 – 100 กิโลเฮิร์ท โดยใช้อากาศจากเครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) เป็นพลาสมาก๊าซ
4. เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและการผลิตเพื่อเป็นการค้าต่อไปได้

1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า 220 โวลต์ 50 เฮิร์ท 1 เฟส
2. กำลังไฟฟ้าด้านออกประมาณ 3 กิโลวัตต์
3. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าประมาณ 4 กิโลวัตต์
4. แรงดันไฟฟ้าที่พิกัด 100 โวลต์ กระแส 30 แอมป์
5. ใช้ความถี่สวิตชิ่งประมาณ 20 – 100 กิโลเฮิร์ท
6. สามารถที่จะตัดโลหะได้ประมาณ 3/8 นิ้ว (9.5 มิลลิเมตร)
7. ทำงานด้วยวงจรแปลงผันกำลังไฟกระแสตรงเป็นกระแสตรง ภายใต้สภาวะการสวิสชิ่งที่แรงดันศูนย์ (*Zero Voltage Switching*)
8. นำ Flyback จากอุปกรณ์จอภาพมาเป็นวงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง เพื่อใช้ในกระบวนการเริ่มเกิดอาร์ค

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูล
2. จำลองการทำงานของวงจร โดยใช้โปรแกรมจำลองในคอมพิวเตอร์
3. ออกแบบโครงสร้างของเครื่องและวงจรย่อยแต่ละส่วน
4. สร้างและทดสอบวงจรย่อย
5. แก้ไขและปรับปรุงวงจร
6. นำวงจรย่อยส่วนต่างๆ มาประกอบเข้าด้วยกัน
7. ทดสอบการทำงานของเครื่องและเก็บข้อมูล
8. ประเมินผล และสรุปงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้ศึกษาและเข้าใจวิธีการเปลี่ยนสถานะของก๊าซเป็นพลาสมาที่อุณหภูมิสูงซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นต้นกำเนิดความร้อนสำหรับใช้ตัดโลหะในอุตสาหกรรมโลหะได้
2. ได้เรียนรู้เทคนิคการเปลี่ยนรูปพลังงานด้วยเทคนิคการสวิตชิ่งที่ความถี่สูง โดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converter) และการสวิตชิ่งที่แรงดันศูนย์ (Zero Voltage Switching) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ลดขนาดของอุปกรณ์ไฟฟ้า และมีต้นทุนต่ำ
3. สามารถพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับการตัดโลหะด้วยพลาสมา เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตเพื่อเป็นการค้าต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
พลาสมา

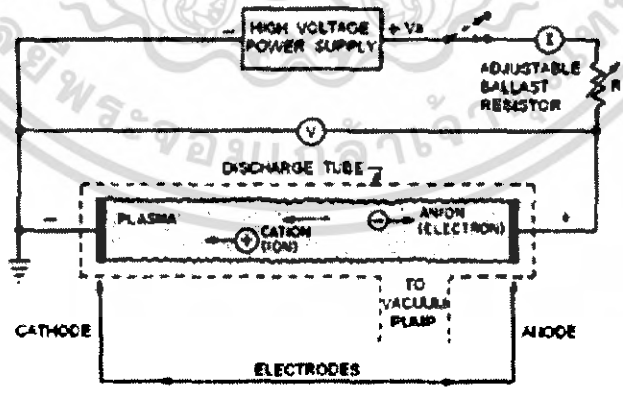
2.1 พลาสมา

ในทางฟิสิกส์และเคมี พลาสมา คือ ก๊าซที่มีสภาพเป็นไอออน และมักจะถือเป็นสถานะหนึ่งของสสาร การมีสภาพเป็นไอออนดังกล่าวนี้ หมายความว่า จะมีอิเล็กตรอนอย่างน้อย 1 ตัว ถูกดึงออกจากโมเลกุล ประจุไฟฟ้าอิสระทำให้พลาสมามีสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น

สถานะที่ 4 ของสสารนี้ มีการเอ่ยถึงครั้งแรก โดยเซอร์ วิลเลียม ครูกส์ (Sir William Crookes) เมื่อ ค.ศ. 1879 และคิดคำว่าพลาสมา (Plasma) โดย เออร์วิง แลงมัวร์ (Irving Langmuir) เมื่อ ค.ศ. 1928 เนื่องจากเขานึกถึงพลาสมาของเลือด

2.2 การดิสชาร์จไฟฟ้าที่ความดันก๊าซต่ำ

การค้นคว้าวิจัยในยุคแรกๆ การดิสชาร์จไฟฟ้าฟิสิกส์ถูกกระทำภายในหลอดดิสชาร์จไฟฟ้าด้วยความดันก๊าซต่ำแบบเก่าได้ดังรูปที่ 2.1 ในรูปนั้นคือรูปแบบดั้งเดิมของหลอดดิสชาร์จไฟฟ้าที่ใช้ความดันก๊าซต่ำนั่นคือนีออน (Neon) ที่เรารู้จักในชื่อของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยหลอดสูญญากาศและแผ่นอิเล็กโทรดกลม 2 แผ่นที่ปิดทั้ง 2 ข้างของตัวหลอดแก้วและเชื่อมต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยเราจะสามารถปรับค่าความต้านทานของบาลาส R และสามารถปรับค่าคุณลักษณะของแรงดันและกระแสไปเรื่อยๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจะเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูง อิเล็กตรอนของพลาสมาจะวิ่งเข้าหาขั้วบวก (Anode) และไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้วลบ (Cathode) โดยที่ทั้งสองจะชนและปะทะกันด้วยความถี่กับก๊าซธรรมชาติที่อยู่ภายใน



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเกิดพลาสมาในหลอดสูญญากาศด้วยไฟฟ้าแรงดันสูง

กลุ่มของแรงดันและกระแสของการดิสชาร์จไฟฟ้ากระแสตรงด้วยความดันก๊าซต่ำถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 และเราสามารถทำการทดลองการดิสชาร์จไฟฟ้าที่ความดันก๊าซต่ำและ

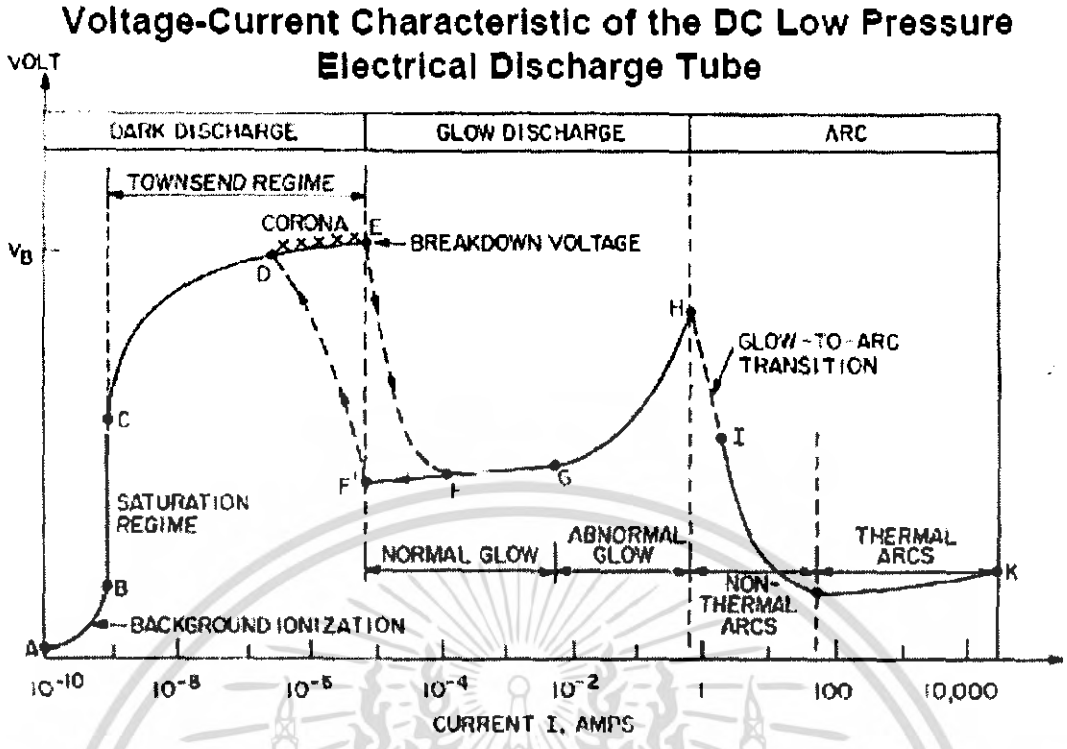
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาเขียนเป็นกราฟของแรงดันและกระแสไฟฟ้าตามในรูปที่ 2.2 เมื่อเราทำการปรับแรงดันและกระแสในขณะนั้นแล้วทำการวัดกระแสไหลผ่านตอนเกิดการดิสชาร์จ การเกิดดิสชาร์จนี้จะนำมาเขียนเป็นเส้นกราฟที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างแรงดันและกระแสได้ดังรูปที่ 2.2 โดยเริ่มจากแรงดันต่ำสุดที่ทางด้านซ้ายมือล่างขอบเขตระหว่าง A และ B บนเส้นโค้งและนั่นคือกลุ่มของไอออไนซ์หลัก (Background ionization regime)

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงกลุ่มแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากดิสชาร์จไฟฟ้ากระแสตรงที่ความดันก๊าซต่ำ

Voltage – Current regimes of low pressure DC electrical discharges.
(1) Dark discharges
a) Background ionization
b) The saturation regime
c) The Townsend regime
d) Corona discharges
e) Electrical breakdown
(2) Glow Discharges
a) The normal glow discharge
b) The abnormal glow discharge
(3) Arc discharges
a) The glow – to – arc transition
b) Non-thermal arcs
c) Thermal arcs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ช่วงการเกิดพลาสมาตามแรงดันและกระแสไฟฟ้า

2.3 เครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา (Plasma Cutting Machine)

เครื่องตัดโลหะแบบพลาสมานั้นมีคุณสมบัติทางความร้อนและความรุนแรงสูงกว่าเครื่องตัดโลหะที่ใช้แก๊สธรรมดาทั่วไป เช่น เครื่องตัดโลหะก๊าซทังสเตน (Tungsten Inert-Gas: TIG) เครื่องตัดโลหะก๊าซโลหะ (Metal Inert-Gas: MIG) ซึ่งโดยปรกติแล้วอุณหภูมิของพลาสมานั้นจะอยู่ที่ประมาณ 11,650 °C ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นความร้อนที่สูงมากทีเดียว

การต่อใช้งานของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมานั้นจะต่อได้ 2 ลักษณะ คือ แบบส่งผ่าน (Transferred Arc) และแบบไม่ส่งผ่าน (Non-Transferred Arc) ก่อนจะกล่าวถึงการต่อใช้งานทั้ง 2 แบบนั้นเราจะเริ่มต้นการจุดระเบิดพลาสมาก่อน คือ เมื่อเริ่มปล่อยก๊าซที่ลำเลียงจากถังมาสู่หัวตัดแล้วนั้นก็จะทำการตั้งค่ากระแสที่เครื่องแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าค่าหนึ่ง ลำดับต่อไปให้ทำการจุดพลาสมาด้วยการอาร์คด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง (High-Voltage High-Frequency Arc Starting) ซึ่งลำดับขั้นตอนจะเหมือนกับการจุดของเครื่องตัดโลหะก๊าซทังสเตน

การใช้เครื่องตัดโลหะแบบพลาสมานั้นสามารถต่อใช้งานได้ 2 รูปแบบ คือ แบบส่งผ่านและไม่ส่งผ่าน แบบส่งผ่าน (Transferred Arc) นั้นหมายความว่ากระแสจากแหล่งจ่ายกำลังนั้นไหลผ่านจากแท่งอิเล็กโทรด (ขั้วลบ) ที่อยู่ภายในหัวตัดและไหลผ่านปากท่อของน๊อนเซิล์นที่อยู่ติดกับชิ้นงาน กระแสไฟฟ้าจะไหลกลับจากชิ้นงานเข้าสู่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าครบวงจร ส่วนแบบไม่ส่งผ่าน (Non-Transferred Arc) นั้น กระแสจะไม่ไหลลงสู่ชิ้นงานแต่จะไหลจากปากท่อของน๊อนเซิล์นแล้วเข้าสู่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเลย แสดงให้เห็นได้ว่าทั้งสองแบบนั้นแตกต่างกันตรงที่กระแสไหลผ่านสู่ชิ้นงานหรือไม่ไหลเข้าสู่ชิ้นงานเท่านั้นและเรานิยมเรียกการต่อแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผ่านว่าแบบ "พลาสมาอาร์ค" (Plasma Arc) และในแบบไม่ส่งผ่านนั้นเรียกว่า "พลาสมาเจ็ต" (Plasma Jet) ในแบบส่งผ่านนั้นจะเป็นที่นิยมใช้งานตัดโลหะมากกว่าแบบไม่ส่งผ่าน ในส่วนของการปรับเปลวพลาสมาให้มีลักษณะกรวยบางนั้นสามารถปรับแต่งอัตราการไหลของก๊าซ การปรับนั้นเราควรที่จะปรับแต่งให้เปลวที่ออกมามีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือทรงกระบอกและส่วนปลายเป็นกรวยและนี่ก็เป็นเหตุผลหนึ่งที่หัวตัดของพลาสมามีลักษณะเป็นน๊อนเซิล์นเซรามิกที่ปากท่อบีบแคบ เพราะมันจะช่วยให้เกิดพลาสมาเป็นลำและมีความร้อนสูงได้ดี และเมื่อเราได้ทำการเพิ่มจำนวนของกระแสและแรงดันจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะทำให้พลาสมานั้นมีความแรงขึ้นอีก

น๊อนเซิล์นเป็นส่วนสำคัญที่สุดของหัวเชื่อมพลาสมาเพราะเส้นผ่านศูนย์กลางของปากน๊อนเซิล์นนั้นเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลำพลาสมาอาร์คซึ่งอยู่ภายในน๊อนเซิล์นทำให้เกิดการรวมตัวกันของพลังงานเพื่อปลดปล่อยลำพลาสมาออกมาใช้งานโดยจะมีลักษณะที่ดีบ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงของพลาสมาก็จะส่งผลกระทบกับน๊อนเซิล์นโดยตรง หัวตัดโลหะแบบพลาสมามีการใช้งานทั้งแบบส่งผ่าน (การอาร์คเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน) และไม่ส่งผ่าน (การอาร์คเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดและน๊อนเซิล์น) ในแบบไม่ส่งผ่านนั้นลำพลาสมาจะออกมาในลักษณะกรวยพุ่งออกมาและมีความร้อนต่ำเพราะพลาสมาในแบบไม่ส่งผ่านนั้นมีลักษณะเหมือนการพ่นละอองก๊าซเผาไหม้ออกมาทำให้ความหนาแน่นของพลังงานและความร้อนต่ำจึงเหมาะที่จะใช้งานกับแผ่นโลหะที่มีความหนาไม่มาก ในแบบส่งผ่านนั้นเป็นการใช้งานที่มีความร้อนออกมามากเพราะลำพลาสมาพุ่งออกมาเป็นลักษณะทรงกระบอกลำเล็กๆ และอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในชิ้นงานสามารถกระโดดเข้าหาแท่งอิเล็กโทรดของหัวตัดได้สะดวกจึงเกิดพลังงานที่บริเวณชิ้นงานสูง

2.4 เครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา

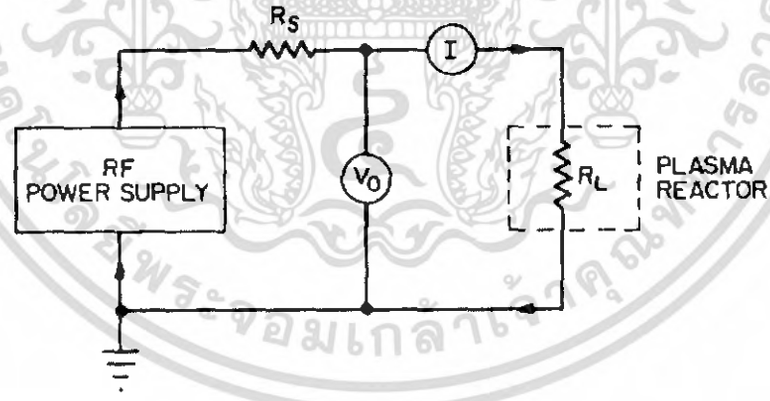
แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จะนำมาใช้งานกับเครื่องตัดพลาสมานั้นจะต้องออกแบบเป็นพิเศษโดยที่จะต้องให้เอาท์พุทเปิดวงจรอยู่ในช่วง 120 – 400 โวลต์ (แตกต่างกับแหล่งจ่ายกำลังของเครื่องเชื่อมพลาสมาอยู่ประมาณ 70 – 85 โวลต์) หลักสำคัญที่จะมากำหนดขนาดของแหล่งจ่าย คือ ชนิดและความหนาของโลหะที่จะนำมาตัด ความเร็วที่ต้องการในการตัด กระแสคงที่และค่าแรงดันที่ตกคร่อมในขณะที่ตัดชิ้นงาน เครื่องตัดพลาสมาที่ใช้ในโหมด DSCP อิเล็กโทรดต่อขั้วลบของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อใช้งานแบบส่งผ่าน ในงานที่ต่อลักษณะนี้เมื่อนำไปใช้กับงานหนักๆ แล้วระบบต้องการแรงดันเปิดวงจรถึง 400 โวลต์ เพื่อใช้เจาะโลหะที่หนาประมาณ 2 นิ้ว (51 มม.) ที่เครื่องตัดที่ใช้มือตัดและที่กระแสต่ำ ระบบต้องการแรงดันเมื่อเปิดวงจรประมาณ 120 – 200 โวลต์ ในกรณีที่เป็นเครื่องเซาะร่องด้วยแล้วนั้นแรงดันจะจ่ายให้ชิ้นงานในขณะทำงานควรปรับได้ด้วยเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้รับกับชิ้นงานหลากหลายชนิด ผู้ผลิตเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมาทั้งหลายนั้นส่วนใหญ่แล้วจะไม่ผลิตแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับการดัดด้วยมือเพราะเกิดปัญหาเรื่องความปลอดภัยมากจึงไม่คุ้มที่จะสร้าง ส่วนใหญ่จะสร้างแบบที่ใช้กับเครื่องอัตโนมัติ

กระแสเอาท์พุทจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องพลาสมานั้นจะมีค่าประมาณที่ 10 – 50 แอมป์ ขึ้นอยู่กับชิ้นงานที่นำมาตัดว่าหนาแค่ไหน และต้องการความเร็วในการตัดแค่ไหน ถ้าชิ้นงานที่นำมาตัดหนาและเราต้องการความเร็วในการตัดเราจะต้องใช้กระแสที่สูงจากแหล่งจ่ายกำลังในการตัดเป็นต้น ในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยทั่วๆ ไปนั้นจะมีวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง (High-Voltage High-Frequency Circuit) ดังรูปที่ 2.3 ที่ใช้ในการจุดพลาสมารวมอยู่ด้วย โดยส่วนมากแล้วแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเป็นลักษณะของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง สาเหตุนั้นเป็นเพราะการบำรุงรักษาง่ายกว่าการใช้กระแสสลับและสาเหตุที่สำคัญอีกอย่างนั้นเป็นเพราะไฟฟ้ากระสลับมีรูปคลื่นเป็นแบบไซเคิลและทุกๆ ของไซเคิลจะมีจุดที่กระแสนั้นมีค่าเป็นศูนย์ทำให้มีกระแสทางเอาท์พุทไม่คงที่ จุดที่แตกต่างกันของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าคือค่าโวลท์เตจทางด้านเอาท์พุทของพลาสมาในขณะเปิดวงจรนั้นมีค่าสูงประมาณ 200 – 400 โวลต์ และแรงดันที่ตกคร่อมชิ้นงานในขณะตัดมีค่าประมาณ 80 โวลต์

โดยมากแล้วแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมานั้น จะมีค่าเอาท์พุทเป็นกิโลวัตต์ เช่น 15 แอมป์ 200 โวลต์ มีค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 3 กิโลวัตต์ เป็นต้น แต่ก็มีเครื่องบางเครื่องที่แสดงค่าเอาท์พุทแยกเป็นจำนวนกระแส และจำนวนแรงดัน แต่เราก็สามารถที่จะหาค่าของกำลังงานทางเอาท์พุทได้โดยนำค่ากระแสและแรงดันทางเอาท์พุทมาทำการคูณกัน ผลคูณนี้จะเป็นค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุทนั่นเอง



รูปที่ 2.3 วงจรแรงดันไฟฟ้าสูงความถี่สูง

2.5 วัสดุที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในต้นกำเนิดอาร์คพลาสมา

วัสดุที่นิยมใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในต้นกำเนิดอาร์คพลาสมามี 3 ชนิด คือ ทังสเตน ทองแดง และแกรไฟต์ ตามปกติจะใช้ทังสเตนเป็นขั้วไฟฟ้าลบ และทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้าบวก ทังสเตนที่ใช้จะเป็นโลหะทังสเตนบริสุทธิ์ หรือจะมีทอเรียม (Thorium) หรือเซอร์โคเรีย (Zirconia) ปนอยู่ก็ได้เหตุที่นิยมใช้ทังสเตนเป็นขั้วไฟฟ้า เพราะทังสเตนมีคุณสมบัติให้อิเล็กตรอนได้ง่ายเมื่อได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อน (Thermal Emission) และมีจุดหลอมตัวสูง ส่วนทองแดงนั้นนิยมใช้เนื่องจากนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี ข้อเสียของทองแดงคือ มีจุดหลอมตัวต่ำ (1,083°C) การใช้ทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้าจึงต้องมีการระบายความร้อนให้เพียงพอ หรือมีกลไกมาหมุนดรงบริเวณที่รอรับอาร์คเพื่อกระจายความร้อนมิให้ได้รับมากเกินไปจนเกิดหลอมละลายได้ ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ไม่สูงนักอาร์คก๊าซที่ใช้จะระบายความร้อนได้พอเพียงอยู่แล้ว เรานิยมใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าเนื่องจากนำไฟฟ้าได้ดี แต่งรูปเป็นเบ้าได้สะดวก แต่มีข้อเสียคือ ที่อุณหภูมิสูงแกรไฟต์จะกลายเป็นไอได้ง่าย ในการใช้งานจะต้องมีการระบายความร้อนจากขั้วไฟฟ้า หรือหมุนขั้วไฟฟ้าตลอดเวลา และจะมีไอของแกรไฟต์ปน อยู่ในลำพลาสมาเสมอ

การออกแบบลักษณะขั้วไฟฟ้ามีความสำคัญมากในการใช้งานด้นกำเนิดพลาสมา เนื่องจากการออกแบบที่ไม่เหมาะสมจะทำให้อาร์คไม่ทั่วถึง เป็นผลทำให้พลาสมาที่เกิดขึ้นไม่มีเสถียรภาพ โดยปกติจะออกแบบให้ขั้วไฟฟ้าด้านหนึ่งมีลักษณะเป็นแท่ง และอีกด้านหนึ่งเป็นวงแหวนหรือรูปทรงกระบอก พลาสมาก๊าซจะผ่านเข้ามารอบๆ ขั้วไฟฟ้าผ่านอาร์คแล้วพุ่งผ่านรูของขั้วไฟฟ้าที่เจาะไว้ออกไปด้านนอก หรือผ่านอาร์คในบริเวณที่มีช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองที่น้อยที่สุด ในกรณีที่ขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่งเป็นรูปวงแหวนหรือรูปทรงกระบอกตามลำดับ หัวคบพลาสมาทั่วไปจะใช้แท่งทังสเตนเป็นขั้วไฟฟ้าลบ และใช้ทรงกระบอกหรือวงแหวนทำด้วยทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้าบวก แท่งแกรไฟต์ถ้าใช้เป็นขั้วไฟฟ้าจะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกเสมอ ในบางกรณีจะออกแบบให้ขั้วไฟฟ้ามีลักษณะเป็นรูปวงแหวนที่มีแนวจุดศูนย์กลางร่วมกัน หรือลักษณะเป็นวงแหวนที่ขนานกันก็ได้

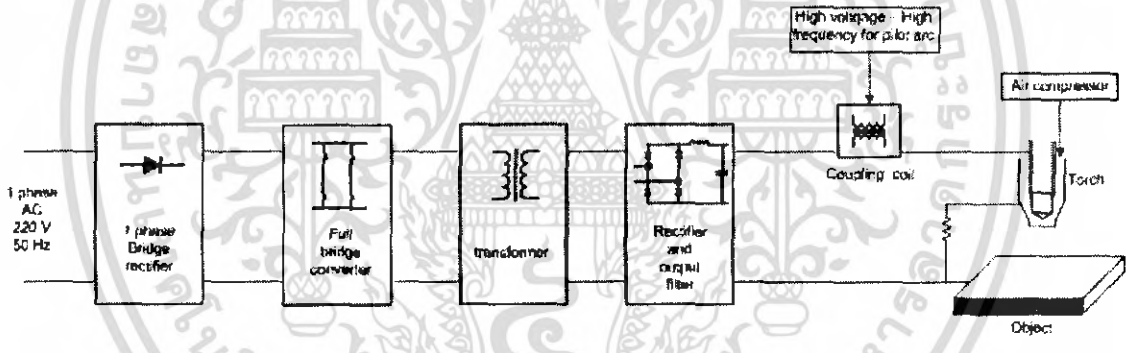
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีและหลักการ

3.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าประกอบไปด้วยวงจรสองส่วนหลักคือวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converter) และวงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง (High-Voltage High-Frequency Circuit) ซึ่งจะแบ่งเป็นวงจรย่อยดังนี้ ดังรูปที่ 3.1

- วงจรเรียงกระแสและกรองกระแส
- วงจรฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้มอสเฟตกำลังเป็นตัวสวิตชิ่ง
- หม้อแปลงความถี่สูง
- วงจรเรียงกระแสและกรองกระแสทางด้านออก
- วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง
- วงจรควบคุมการทำงาน
- วงจรป้องกันกระแสและแรงดันเกินพิกัด

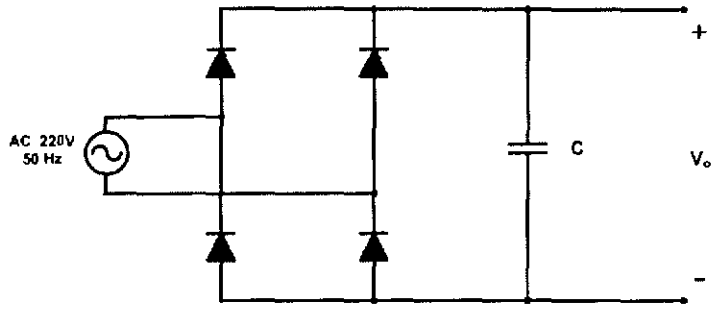


รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา

3.2 วงจรเรียงกระแสและกรองกระแส

วงจรเรียงกระแสและกรองกระแสนับว่าเป็นส่วนสำคัญของวงจรในส่วนอินพุทซึ่งจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่เครื่องตัดโลหะแบบพลาสมาโดยจะได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ขนาด 220 โวลต์ ±10% ความถี่ 50 เฮิร์ท จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ มาเปลี่ยนให้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วงจรเรียงกระแสที่ใช้ไดโอดต่อแบบฟลูบริดจ์ดังในรูปที่ 3.2 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของวงจรเรียงกระแสนี้จะถูกกรองให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการกระเพื่อมน้อยลง และมีขนาดประมาณ 300 โวลต์ โดยมีตัวเก็บประจุเป็นตัวกรอง แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้นี้จะทำหน้าที่เป็นแรงดันอินพุทให้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์ต่อไป และวงจรเรียงกระแสและกรองกระแสยังเป็นตัวกำหนดค่าอัตราทนกระแสของฟิวส์และวงจรกรองสัญญาณรบกวนความถี่วิทยุด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วงจรเรียงกระแส

การต่อวงจรเรียงกระแสโดยตรงเข้ากับไฟฟ้า 220 โวลต์ โดยตรง เช่นนี้ เป็นการเลี่ยงการใช้หม้อแปลงแรงดันความถี่ต่ำ ทำให้สามารถลดน้ำหนักลงได้ ในกรณีวงจรกรอง 50 เฮิร์ทก็เช่นกัน การไม่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ จะลดปัญหาเนื่องจากน้ำหนัก แต่มีข้อเสียคือ ตัวเก็บประจุของวงจรจะมีขนาดใหญ่กว่าวงจรกรองที่มีตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่การกระเพื่อมกระแสมีขนาดเท่ากัน และกระแสที่ไหลในตัวไดโอดมีค่ายอดที่สูงมาก แต่ก็มีข้อดีคือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีขนาดเกือบเท่ากับค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของระบบจ่ายกระแส

การออกแบบค่าอุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรเรียงกระแสและกรองกระแส

3.2.1 ไดโอดเรียงกระแส

การเลือกใช้ไดโอดเรียงกระแสให้เหมาะกับการใช้งานควรมีข้อควรพิจารณาดังนี้

3.2.1.1 ค่ากระแสกระชาก (I_{fsm})

กระแสกระชากสูงสุดที่ไหลผ่านไดโอดเรียงกระแสจะเกิดขึ้นในขณะที่เปิดเครื่องเมื่อตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ยังไม่มีประจุสะสมอยู่ ค่ากระแสกระชากสูงสุดคำนวณได้จาก

$$I_{frm} = \frac{V_P}{R_s + ESR} \tag{3.1}$$

เมื่อ V_P คือ แรงดันยอดสูงสุดของไฟสลับอินพุท

ERS คือ ค่าความต้านทานแฝงในตัวเก็บประจุค่าต่ำสุด

R_s คือ ค่าของตัวต้านทานจำกัดกระแส

โดยทั่วไปแล้วไดโอดเรียงกระแสจะมีค่าอัตราทนกระแสกระชาก I_{fsm} ประมาณ 20 ถึง 30 เท่า ของอัตราทนกระแสเฉลี่ยขณะถูกไบแอสตรงของมัน โดยไดโอดที่ใช้จะต้องมีอัตราทนกระแสกระชากมากกว่าค่ากระแสที่คำนวณได้จากสมการ ค่ากระแสการชากอาจลดลงได้โดยการเพิ่มค่าของ R_s แต่จะทำให้เครื่องมีประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากเกิดกำลังสูญเสียในตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2 ค่ากระแสสูงสุดเมื่อถูกไบแอสตรง (I_{frm})

ค่ากระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นในวงจรเรียงกระแส จะเกิดขึ้นในจังหวะที่ตัวเก็บประจุกรองกระแสมีการเก็บประจุอีกครั้งหลังจากคายประจุออกไปให้โหลด ค่ากระแสสูงสุดเมื่อถูกไบแอสตรงของไดโอดเรียงกระแส สามารถหาได้จากค่ากระแสสูงสุดของตัวเก็บประจุกรองกระแส

3.2.1.3 ค่ากระแสเฉลี่ยเมื่อถูกไบแอสตรง (I_{fm})

เป็นค่ากระแสเฉลี่ยสูงสุดที่ไดโอดเรียงกระแสจะได้รับในขณะที่ทำงานหรือนำกระแส การพิจารณาค่ากระแสนี้ทำได้โดยใช้กราฟ ในทางปฏิบัติควรเผื่อค่ากระแสเฉลี่ยสูงสุด I_{fm} ของไดโอดไว้ที่ประมาณ 1.5 ถึง 2 เท่าจากที่คำนวณได้ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและอายุการใช้งาน

3.1.1.4 อัตราทนแรงดันไบแอสกลับสูงสุด V_{rrm}

โดยปกติวงจรเรียงกระแสจะต้องต่อเข้ากับแรงดันไฟสลับ 220 โวลต์ ดังนั้นอัตราทนแรงดันไบแอสกลับของไดโอด ควรต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าค่าแรงดันยอดสูงสุดของแรงดันไฟสลับ แต่ควรเผื่อค่าแรงดันไบแอสกลับ ให้มีค่ามากกว่าแรงดันยอดสูงสุดของแรงดันไฟสลับเอาไว้ด้วย สำหรับกรณีที่อาจเกิดทรานเซียนต์ขึ้นในสายไฟสลับ

โดยทั่วไปแล้วเราสามารถคำนวณหากระแสพิกัดของได้ไดโอดเรียงกระแสได้จากค่ากระแสประสิทธิผลของวงจรเรียงกระแสในสมการที่ 3.2

$$I_e = \frac{P_{in}}{V_{in}} \tag{3.2}$$

โดยที่ I_e คือ ค่ากระแสประสิทธิผลของวงจรเรียงกระแส
P_{in} คือ กำลังไฟฟ้าด้านเข้า
V_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า

3.2.2 ตัวเก็บประจุกรองกระแส

ตัวเก็บประจุมีหน้าที่กรองแรงดันไฟตรงที่ได้จากการเรียงกระแสของไดโอดให้มีค่าเรียบมากขึ้น และช่วยให้กระแสที่ได้มีค่าเพียงพอตามที่วงจรคอนเวอร์เตอร์ต้องการ การใช้งานจริงควรเลือกตัวเก็บประจุที่มีปัจจัยดังต่อไปนี้

3.2.2.1 อัตราทนกระแสระลอก (RMS Ripple Current Rating)

กระแสระลอกในตัวเก็บประจุกรองกระแสเกิดจากการชาร์จประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเอง ซึ่งค่ากระแสนี้เป็นผลให้ตัวเก็บประจุร้อนและอายุการใช้งานลดลง การเลือกใช้งานตัวเก็บประจุกรองกระแสจะต้องให้มีค่าอัตราทนกระแสระลอกมากกว่าค่ากระแสระลอกที่คำนวณได้เพื่อไม่ให้เกิดความร้อนกับตัวเก็บประจุขณะที่ทำงาน ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่กระแสระลอกมีค่าสูงการใช้ตัวเก็บประจุขนานกันหลายตัวจะช่วยเพิ่มอัตราทนกระแสระลอกให้ตัวเก็บประจุได้

3.2.2.2 แรงดันกระเพื่อมที่เอาท์พุทวงจรเรียงกระแส (Ripple Voltage)

การกระเพื่อมที่แรงดันเอาท์พุทของวงจรเรียงกระแสจะมีผลโดยตรงต่อการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ การกระเพื่อมที่แรงดันเอาท์พุททำให้แรงดันที่อินพุทของคอนเวอร์เตอร์มีค่าไม่คงที่ หากยอมให้แรงดันกระเพื่อมนี้มีค่ามากก็จะลดความสามารถในการคงค่าแรงดันที่เอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์ลงไป ปกติการออกแบบวงจรเรียงกระแสจะยอมมีค่าแรงดันกระเพื่อมไม่เกิน 10% ของค่าแรงดันเอาท์พุท ค่าของตัวเก็บประจุกรองกระแส C สามารถคำนวณได้จาก

$$C = \frac{I_e \Delta t}{\Delta V_{ripple}} \tag{3.3}$$

เมื่อ I_e คือ ค่ากระแสประสิทธิผลของวงจรเรียงกระแส

Δt คือ ช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุใช้ในการคายประจุ

ΔV_{ripple} คือ ค่ายอดถึงยอดของแรงดันกระเพื่อม

3.2.2.3 ช่วงเวลาโฮลด์อัพ (Holdup Time)

ช่วงเวลาโฮลด์อัพ เป็นช่วงเวลาที่วงจรสวิตชิ่งยังสามารถคงค่าแรงดันเอาท์พุทได้ตามปกติที่โหลดสูงสุด เมื่อมีการหยุดจ่ายแรงดันไฟสลับหรือค่าแรงดันไฟสลับมีค่าต่ำกว่ากำหนดและเพื่อให้วงจรสวิตชิ่งนี้มีค่าเวลาโฮลด์อัพ ตัวเก็บประจุที่ใช้จะต้องมีค่ามากพอที่จะจ่ายกระแสให้กับคอนเวอร์เตอร์เมื่อมีการหยุดจ่ายแรงดันไฟสลับ

3.2.2.4 อัตราทนแรงดัน (Voltage Rating)

ตัวเก็บประจุกรองกระแสต้องทนแรงดันได้อย่างต่ำที่ค่าแรงดันไฟตรงเอาท์พุทของวงจรเรียงกระแส แต่เพื่อความปลอดภัยควรเผื่อค่าอัตราทนแรงดันไว้อย่างน้อยที่ค่าแรงดันไฟตรงสูงสุดที่เป็นไปได้ของคอนเวอร์เตอร์ เช่น ถ้าแรงดันไฟสลับอินพุทมีค่าอยู่ในช่วง 187 ถึง 264 โวลต์ควรมีค่าอัตราทนแรงดันอย่างต่ำที่ 400 โวลต์

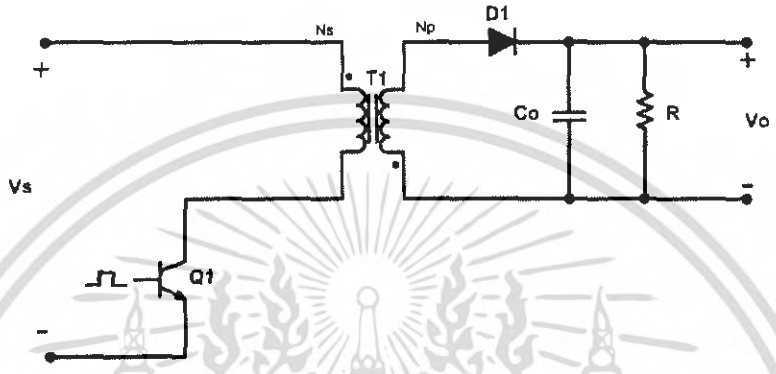
3.3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converter)

วงจรคอนเวอร์เตอร์นับว่าเป็นส่วนวงจรที่สำคัญสุด ซึ่งมีหน้าที่แปลงผันระดับของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าออกให้มีค่าเป็นไปตามสัญญาณที่ควบคุม วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converter) มีหลายแบบ แต่ละแบบจะมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันทั้งในแง่ของอัตราการแปลงผันแรงดัน (V_o / V_s) ความต่อเนื่องของกระแสด้านเข้าและด้านออก ความสามารถในการกลับทิศทางของแรงดันออก ตลอดความยากง่ายในการใช้วงจรดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับทิศทางการไหลของกระแสและพลังงานนั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะการทำงานของสวิตช์ที่ใช้ในวงจร ในปัจจุบันนี้ได้มีการค้นคิดรูปแบบของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงพื้นฐานที่เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายจะมีเพียงไม่กี่วงจรเท่านั้น ซึ่งมีรูปแบบของวงจรและมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.3.1 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback Converter)

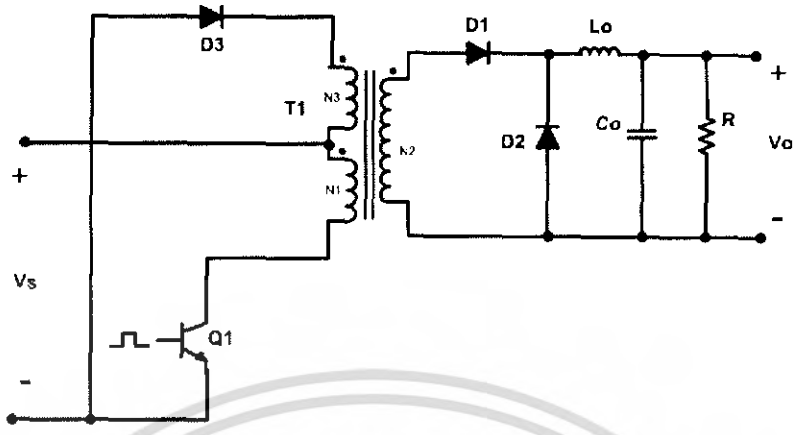


รูปที่ 3.3 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback Converter)

จากรูปที่ 3.3 เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q1 ในฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จะทำงานในลักษณะเป็นสวิตช์ปิดเปิดและจะนำกระแสตามคำสั่งของสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่ป้อนให้กับขาเบส เนื่องจากหม้อแปลง T1 จะกำหนดขดไพรมารี่ และเซคั่นดารี่ให้มีลักษณะกลับเฟสกันอยู่ ดังนั้นเมื่อ Q1 นำกระแสไดโอด D1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับและไม่นำกระแส ทำให้มีการสะสมพลังงานที่ขดไพรมารี่ของหม้อแปลง T1 แทน เมื่อ Q1 หยุดนำกระแส สนามแม่เหล็ก T1 ยุบตัวทำให้เกิดการกลับขั้วแรงดันที่ขดไพรมารี่และเซคั่นดารี่ D1 ก็จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง พลังงานที่สะสมในขดไพรมารี่ของหม้อแปลงก็จะถูกถ่ายเทออกไปยังขดเซคั่นดารี่ และมีกระแสไหลผ่านไดโอด D1 ไปยังตัวเก็บประจุเอาท์พุท Co เพื่อทำการสะสมประจุ ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ให้กำลังงานได้ไม่สูงนัก โดยอยู่ในช่วงไม่เกิน 150 วัตต์ และให้ค่าสัญญาณรบกวน RF/EMI ค่อนข้างสูง แต่ใช้อุปกรณ์จำนวนน้อยและมีราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward Converter)

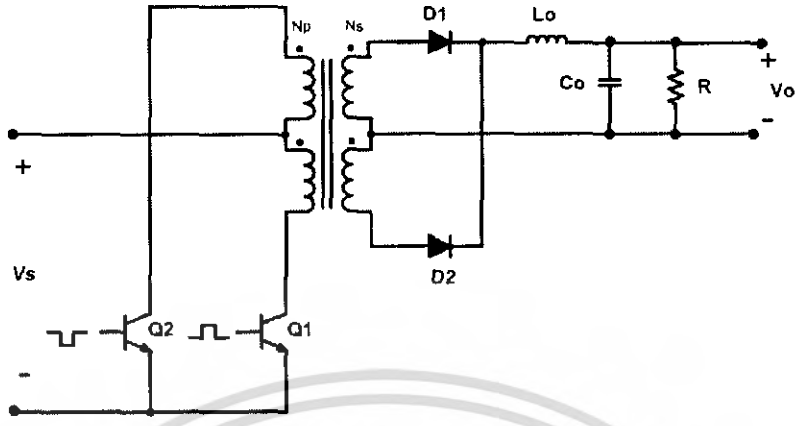


รูปที่ 3.4 ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward Converter)

ในรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์มีลักษณะใกล้เคียงกับฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ แต่หม้อแปลง T1 ในฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์จะกำหนดไพรมารี่และขดเซคั่นดารี่ให้มีเฟสตรงกันดังนั้นเมื่อ Q1 นำกระแส ไดโอด D1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง แต่ D2 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับและไม่นำกระแส กระแสจึงไหลผ่านไดโอด D1 และตัวเหนี่ยวนำ Lo ไปยังตัวเก็บประจุเอาท์พุท Co และโหลดได้ขณะที่มีกระแสไหลผ่าน Lo จะมีการสะสมพลังงานไว้ในตัวมันด้วยเมื่อ Q1 หยุดนำกระแสไดโอด D1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับ ทำให้ไม่มีกระแสไหลจากขดเซคั่นดารี่ สนามแม่เหล็กใน Lo จะยุบตัวทำให้มีการกลับขั้วแรงดันที่ตกคร่อมตัวมันอยู่ ทำให้กระแสไหลผ่านไดโอด D2 ออกไปยังโหลดได้ จะเห็นได้ว่ามีกระแสไหลผ่านโหลดได้อย่างต่อเนื่องทั้งในช่วงที่ Q1 นำกระแสและหยุดนำกระแส ทำให้มีการกระเพื่อมของแรงดันที่เอาท์พุทต่ำกว่าฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ให้กำลังงานได้ในช่วงเดียวกันกับฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ แต่กระแสที่ได้จะมีการกระเพื่อมต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ตัวอุปกรณ์ที่เพิ่มเข้ามาจะทำให้ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์นั้นมีราคาสูงกว่า

72732
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push-Pull Converter)

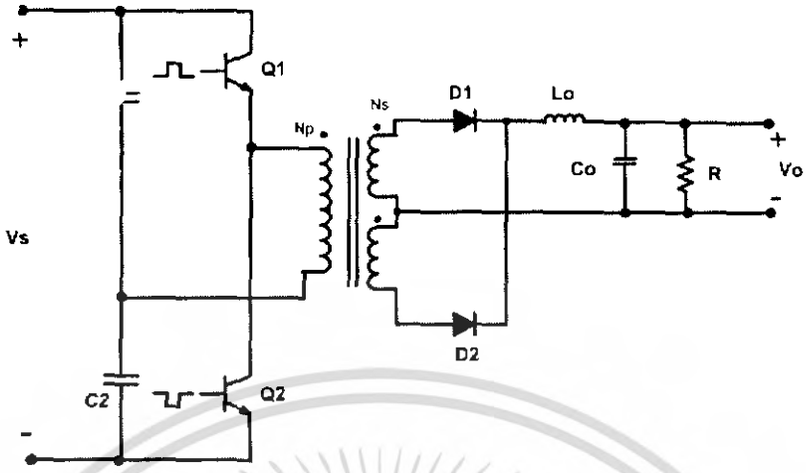


รูปที่ 3.5 พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push-Pull Converter)

พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถจ่ายกำลังงานได้สูงตั้งแต่ 500 วัตต์ขึ้นไปแต่มีข้อเสีย คือ มักจะเกิดการไม่สมมาตรของฟลักซ์แม่เหล็กของแกนหม้อแปลงซึ่งจะมีผลต่อการพังเสียหายของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ได้ง่าย อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันก็มีเทคนิคการควบคุมแบบควบคุมกระแสจะทำให้ลดปัญหานี้ลงได้ ดังนั้น พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์จึงเป็นคอนเวอร์เตอร์ที่น่าสนใจสำหรับวงจรสวิตชิ่งที่ต้องการกำลังงานสูงๆ จากรูปที่ 3.5 Q1 และ Q2 จะกลับกันนำกระแสในแต่ละครึ่งคาบเวลาการทำงานเมื่อ Q1 นำกระแส D1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับ แต่ D2 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรงและนำกระแสผ่าน Lo ไปยังโหลด แต่เมื่อ Q2 นำกระแส D1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง แต่ D2 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับและนำกระแสผ่าน Lo ไปยังโหลดเช่นเดียวกัน ดังนั้นโหลดจึงมีกระแสไหลต่อเนื่องได้ตลอดเวลา กระแสที่ได้ทางเอาท์พุทจึงค่อนข้างเรียบ อย่างไรก็ตาม เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ที่เพิ่มเข้ามาจะมีผลต่อค่าใช้จ่ายในการสร้างพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Half-bridge Converter)

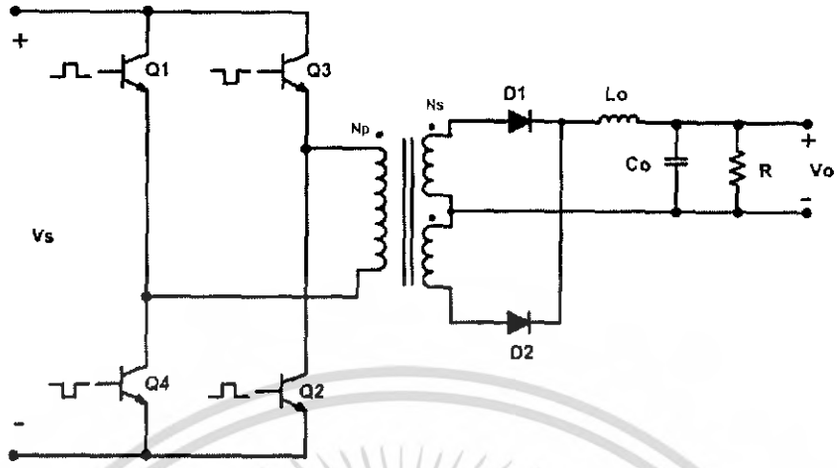


รูปที่ 3.6 ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Half-bridge Converter)

ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จัดเป็นคอนเวอร์เตอร์ในตระกูลเดียวกับพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ และให้กำลังงานได้ค่อนข้างสูง ข้อดีของฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ก็คือ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรมีค่าแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสน้อยกว่าคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 แบบที่ได้กล่าวมาแล้ว และลดการเกิดไม่สมมาตรฟลักซ์ได้ จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าหากเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งนำกระแส ค่าแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ตัวที่เหลือจะมีค่าเพียงแรงดันอินพุทเท่านั้น เมื่อ Q1 และ Q2 สลับกันนำกระแส ผลที่ได้จะมีลักษณะเดียวกับการทำงานของพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ ยกเว้นค่าแรงดันตกคร่อมขณะทำงานของขดไพรมารี่จะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันที่อินพุท เนื่องจากผลของการต่อตัวเก็บประจุ C1 และ C2 เพื่อแบ่งครึ่งแรงดัน กระแสที่ไหลผ่านขดไพรมารี่จึงมีค่าสูง ซึ่งเป็นการจำกัดกำลังงานสูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ โดยกำลังสูงสุดที่ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์สามารถทำได้จะอยู่ในช่วงไม่เกิน 500 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full-bridge Converter)



รูปที่ 3.7 ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full-bridge Converter)

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่ามีเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรทั้งหมดถึง 4 ตัว แต่จะทำงานสลับกันเป็นคู่ๆ โดย Q1 จะนำกระแสพร้อมกับ Q2 และ Q3 จะนำกระแสพร้อมกับ Q4 กระแสที่ไหลผ่านขดไพรมารี่ของหม้อแปลงจะมีลักษณะเช่นเดียวกับฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ แต่ข้อได้เปรียบของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ก็คือขณะทำงานที่ขดไพรมารี่จะมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับค่าแรงดันอินพุทของกระแสที่ไหลผ่านขดไพรมารี่จึงมีค่าต่ำกว่า ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังงานได้สูงกว่า ดังนั้นวงจรสวิตชิ่งที่ต้องการกำลังงานสูงๆ มักนิยมใช้คอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์เป็นหลัก

3.4 การเลือกแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่งสำหรับเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา

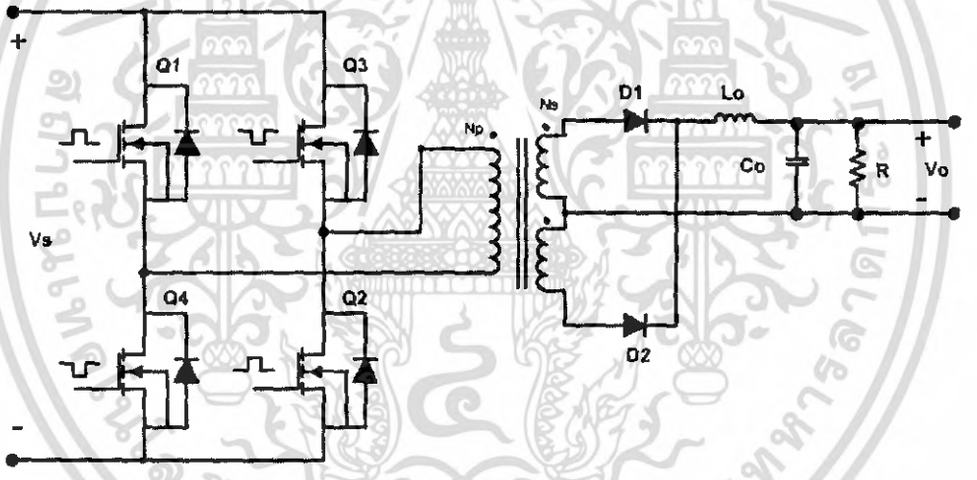
เนื่องจากข้อกำหนดในเรื่องพิกัดกำลังทางด้านออกของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่งสำหรับเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมามีค่าประมาณ 3,000 วัตต์ ซึ่งถือเป็นกำลังขาออกที่ค่อนข้างสูงพอสมควรดังนั้นผู้จัดทำจึงเลือก วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full-Bridge Converter) มาใช้ในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่ง วงจรที่เลือกนำมาใช้นั้น มีความจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์สวิตชิ่งทั้งหมดด้วยกัน 4 ตัว สำหรับตัวสวิตชิ่งที่จะนำมาใช้อาจเป็นเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์หรือมอสเฟตก็ได้ แต่สำหรับงานส่วนนี้ได้ทำการเลือกใช้มอสเฟตกำลังทำหน้าที่เป็นตัวสวิตชิ่งในวงจรดังกล่าว การเลือกใช้ตัวสวิตชิ่งถึง 4 ตัวหรือหากต้องการกระแสมากขึ้นอีกก็สามารถทำการต้องขนาดสวิตช์เข้าไปได้อีกด้วย เช่น สวิตช์ 1 ตัวประกอบไปด้วยอุปกรณ์สวิตชิ่งขนาดกัน 2 ตัว แต่การใช้ตัวสวิตช์จำนวนมากๆ ก็อาจทำให้ต้องมีการเพิ่มจำนวนของวงจรขับนำกระแสเพิ่มมากขึ้น ทำให้ราคาโดยรวมของระบบอาจจะสูงขึ้นอีก แต่อย่างไรก็ดีของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์นี้เหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้งานกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่ต้องการพิกัดกำลังใช้งานค่อนข้างสูงและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นข้อดีของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่น่าสนใจ คือในการออกแบบหม้อแปลงสำหรับการนำไปใช้งานกับวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ต้องการขดลวดปฐมภูมิเพียงชุดเดียว ส่วนแรงดันที่ดกคร่อมขดลวดของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิจะมีค่าไม่เกินค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของแรงดันขาเข้า หรือไม่เกินแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฉลี่ยที่ป้อนเข้าสู่วงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งประมาณ +310 โวลต์และ -310 โวลต์ ตัวสวิตชิ่งที่ใช้ในฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์นี้ จะทำงานในระดับแรงดันที่ไม่เกินค่ายอดของแรงดันไฟตรง ซึ่งประมาณ 310 โวลต์ ทำให้สามารถเลือกหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด ซึ่งทั้งกระแสผ่านสวิตช์จะต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบอื่นๆ ที่พิกัดกำลังเท่ากัน

สาเหตุที่เลือกใช้มอสเฟตกำลังเป็นตัวสวิตชิ่งในวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์มีดังนี้

- การขับนำกระแสของมอสเฟตจะทำได้ง่ายกว่าการขับนำสวิตช์ที่เป็นทรานซิสเตอร์
- มอสเฟตกำลังสามารถทำงานที่ความถี่สูงกว่าทรานซิสเตอร์
- มอสเฟตกำลัง มีความเร็วในการสวิตช์สูง ทำให้สามารถลดเวลา Dead Time ที่ใช้ป้องกันการลัดวงจรไฟฟ้าผ่านสวิตช์ในกิ่งเดียวกัน



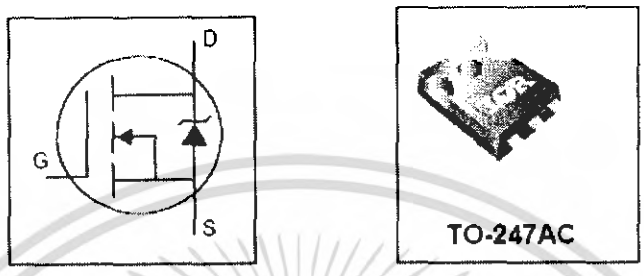
รูปที่ 3.8 วงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์โดยมีมอสเฟตกำลังเป็นตัวสวิตชิ่ง

มอสเฟตกำลัง

มอสเฟตกำลังสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูงตั้งแต่ 50 กิโลเฮิร์ตไปจนถึง 400 กิโลเฮิร์ต เนื่องจากมันใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น ซึ่งจะเป็นผลดีในการลดขนาดของคอนเวอร์เตอร์ ในปัจจุบันมอสเฟตกำลังมีค่าพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่า 1,000 โวลต์ แต่มีพิกัดกระแสไฟฟ้าได้ไม่เกิน 100 แอมป์ ในส่วนวงจรขับของมอสเฟตกำลังนั้นสามารถทำได้ง่าย โดยอาจขับได้จากไอซีควบคุมแบบพัลซ์วิดมอดดูเลชั่น โครงสร้างของมอสเฟตกำลังที่จะใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์มีทั้งแบบ N-Ch และแบบ P-Ch ทำงานในลักษณะพุช-พูล หรือทำงานเพียงตัวเดียว ซึ่งโดยส่วนมากจะใช้ N-Ch เพราะสามารถทำงานได้ที่ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงกว่าแบบ P-Ch กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นกับมอสเฟตกำลังขณะทำงาน จะเป็นไปได้ทั้งในขณะที่เปลี่ยนสถานะและกำลังสูญเสียขณะนำกระแสแต่มอสเฟตกำลังจะมีช่วงเวลาเริ่มนำกระแส และช่วงเวลาที่เริ่มหยุดนำกระแสที่สั้นกว่าเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มาก เพราะมอสเฟตกำลังจะไม่มีประจุสะสมเกิดขึ้น แต่มอสเฟตกำลังจะมีค่าความต้านทานขณะนำกระแสสูงมาก จึงมีการสูญเสียสูงกว่าเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มาก



รูปที่ 3.9 มอสเฟตกำลัง

การเลือกขนาดของมอสเฟตด้วยวิธีการหากระแสพิกัดที่จะใช้ในวงจรจากสมการที่ 3.4 โดยจะต้องนำไปเลือกหาขนาดมอสเฟตที่เหมาะสมหากไม่สามารถหาได้ ก็สามารถทำการขนานมอสเฟตเข้าไปเพื่อเพิ่มพิกัดกระแสได้เช่นกัน

$$I_p = \frac{P_{in}}{T_d V_{in}} \tag{3.4}$$

โดยที่ I_p = กระแสพิกัดที่ใช้เลือกมอสเฟต
P_{in} = กำลังไฟฟ้าด้านเข้า
T_d = Temperature Derating (0.8)
V_{in} = แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า

3.5 คอนเวอร์เตอร์ฟลูบริดจ์แบบสวิตชิ่งขณะแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์

(Full-Bridge Zero Voltage Switching PWM Converter; ZVS-PWM)

แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งโดยทั่วไปจะใช้หลักการพัลส์วิดท์มอดูเลต ซึ่งมีโครงสร้างของวงจรที่ง่าย ราคาถูก การควบคุมไม่ยาก แต่เมื่อความถี่สูงขึ้น คุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์ (Parasitic Element) มีผลขึ้นอย่างชัดขึ้น เช่น ตัวเก็บประจุด้านเอาท์พุทของมอสเฟต ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงหรือความเก็บประจุที่รอยต่อของไดโอดในวงจรเรียงกระแส เป็นต้น ทำให้เกิดความสูญเสียในขณะสวิตชิ่ง (Switching Loss) มากขึ้น เนื่องจากผลของ dv/dt และ di/dt ความสูญเสีย ขณะสวิตชิ่งจะยิ่งมากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น แต่คอนเวอร์เตอร์แบบรีโซแนนท์จะลดความสูญเสียขณะสวิตช์ โดยมีอุปกรณ์ประกอบ LC ทำให้เกิดสัญญาณคลื่นไซน์

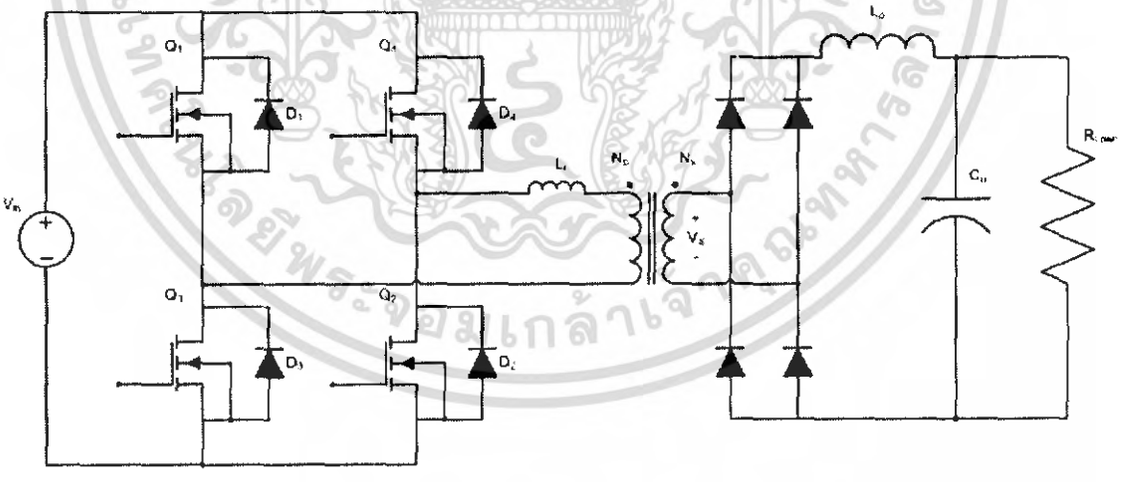
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถทำให้เกิดสภาวะสวิตช์ที่แรงดันเป็นศูนย์ (Resonant Zero Voltage Switching) หรือ สวิตช์ที่กระแสเป็นศูนย์ (Resonant Zero Current Switching) ช่วยลดการสูญเสียขณะสวิตช์ ลดแรงดันเกิน (Surge Voltage) และกระแสกระชาก (Inrush Current) ทำให้ทำงานในสภาวะความถี่สูงได้ เป็นผลให้มีขนาดเล็กลง และกำลังต่อหน่วย (Power Density) มีค่าสูง แต่มีข้อเสียที่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีแรงดันสูงเนื่องจากสภาวะเรโซแนนท์ และใช้วงจรควบคุมที่มีความยุ่งยากมาก เพราะช่วงความที่ในการควบคุมกว้าง แล้วยังยุ่งยากต่อการออกแบบวงจรกรองแรงดัน

จากข้อดีและข้อเสียของพัลส์วิดท์มอดูเลต และเรโซแนนท์ ทั้งสองหลักการทำให้เกิดการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ด้วยพัลส์วิดท์มอดูเลตโดยใช้โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ ควบคุมโดยการเลื่อนเฟสความถี่คงที่ เป็นคอนเวอร์เตอร์พัลส์วิดท์มอดูเลตสวิตช์ที่แรงดันศูนย์โดยฟูลบริดจ์ (Full-Bridge Zero Voltage Switch PWM Converter)

3.5.1 โครงสร้างของวงจรหลัก

ใช้โครงสร้างของวงจรฟลูบริดจ์มีมอสเฟตเป็นสวิตช์ $(Q_1 - Q_2)$ เพื่อเปลี่ยนแรงดันกระแสตรงขาเข้า (V_{in}) เป็นแรงดันกระแสสลับความถี่สูง (f_s) จ่ายให้หม้อแปลงเพื่อปรับแรงดัน มีความเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ (L_r) ต่ออนุกรมกับขดลวดปฐมภูมิ ด้านทุติยภูมิเรียงกระแสด้วยวงจรบริดจ์ไดโอด แล้วมีความเหนี่ยวนำ (L_f) และความเก็บประจุ (C_f) เป็นวงจรกรองแรงดัน มีความต้านทาน (R_{load}) เป็นภาระ ส่วนไดโอด $D_1 - D_2$ เป็นไดโอดภายในมอสเฟต (Internal anti-parallel diodes) แสดงดังรูปที่ 3.10



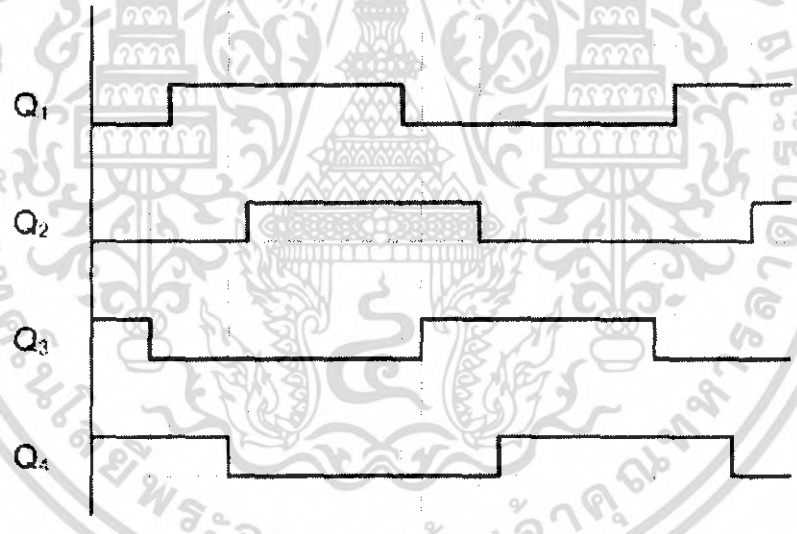
รูปที่ 3.10 วงจรหลักคอนเวอร์เตอร์พัลส์วิดท์มอดูเลตสวิตช์ที่แรงดันศูนย์แบบฟลูบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 โครงสร้างของวงจรเลื่อนเฟส

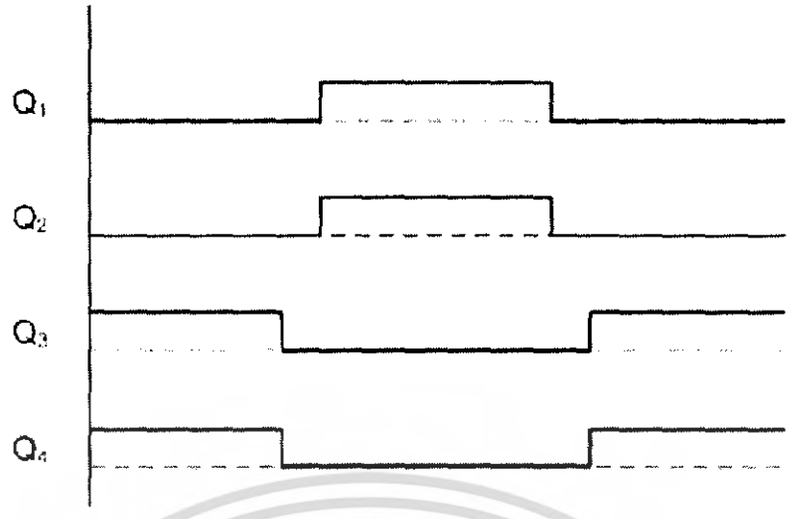
ในการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ให้เกิดสภาวะสวิตช์ที่แรงดันศูนย์นั้นมีความแตกต่างจากการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์แบบพัลส์วิดมอดูเลตแบบธรรมดา แต่ยังคงใช้หลักการพัลส์วิดท์มอดูเลตเหมือนกัน ในหัวทดลองข้อนี้จะขอกล่าวถึงการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฟลูบริดจ์แบบพัลส์วิดท์มอดูเลตธรรมดาก่อน เพื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฟลูบริดจ์แบบให้เกิดสภาวะสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ แล้วนำเสนอวงจรเลื่อนเฟสในตอนท้าย

การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฟลูบริดจ์แบบพัลส์วิดท์มอดูเลตธรรมดา จากโครงสร้างวงจรในรูปที่ 3.10 จะควบคุมให้ Q_1 และ Q_2 ทำงานพร้อมกัน แล้วในสภาวะต่อมา ก็จะควบคุมให้ Q_3 และ Q_4 ทำงานพร้อมกัน ดังแสดงการทำงานในรูปที่ 3.11 (ก) แต่การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฟลูบริดจ์แบบให้เกิดสภาวะสวิตช์ที่แรงดันศูนย์นั้น Q_1, Q_2, Q_3 และ Q_4 ทำงานไม่พร้อมกัน แต่ยังคงรักษาช่วงเวลาการส่งผ่านพลังงานเช่นเดียวกันกับแบบธรรมดา ที่อยู่ในช่วง Q_1 และ Q_2 ทำงานพร้อมกันในสภาวะต่อมาในช่วง Q_3 และ Q_4 ทำงานพร้อมกันดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ข) โดยสัญญาณดังรูปนี้สามารถสร้างขึ้นจากการนำสัญญาณวงจรควบคุมแบบพัลส์วิดท์มอดูเลตที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 3.11 สัญญาณการควบคุมการทำงานของมอสเฟต
(ก) แบบพัลส์วิดท์มอดูเลตแบบธรรมดา
(ข) แบบทำให้เกิดสภาวะสวิตช์ที่แรงดันศูนย์

การทำงานของวงจรเลื่อนเฟส โดยรับสัญญาณจากวงจรควบคุมซึ่งใช้หลักการพัลส์วิดท์มอดูเลต เราสามารถทำได้โดยการเขียนโปรแกรมลงในไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อส่งสัญญาณขับออกมาจากเอาท์พุทแล้วนำไปเข้าชุดแยกกราวทางไฟฟ้าต่อไป

3.5.3 สภาวะการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์

คอนเวอร์เตอร์พัลส์วิดท์มอดูเลตสวิตช์ที่แรงดันไฟฟ้าศูนย์มีสัญญาขับขาเกต แรงดันและกระแสปฐมภูมิและแรงดันทุติยภูมิ ตามรูปที่ 3.12 ซึ่งการขับขาเกตจะเลื่อนเฟสให้ต่างกันระหว่างข้างซ้ายและข้างขวา ตามดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle, D) การปิดสวิตช์ที่แรงดันศูนย์จะต้องใช้พลังงานสะสมจากความเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ ซึ่งอยู่ในสภาวะกระแสต่อเนื่อง ในการวิเคราะห์จะนำค่าคุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์มาคิดด้วยเช่น ความเก็บประจุด้านเอาท์พุทของมอสเฟต จะอธิบายเป็นสภาวะตามลำดับ ดังต่อไปนี้

สภาวะที่ 1 $(t_1'-t_2)$: Q_4 และ D_1 นำกระแส ลูปกระแสเนื่องจากการเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ ไหลผ่านหม้อแปลง

สภาวะที่ 2 (t_2-t_2') : เมื่อเวลา $t=t_2$, Q_4 เปิดวงจร กระแสที่ผ่านความเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ ยังคงไหลคายประจุและเก็บประจุ ความเก็บประจุด้านเอาท์พุทของ Q_2 และ Q_4 ทำให้ D_2 ปิดวงจร หลังจาก D_2 นำกระแส Q_2 จะถูกสั่งปิดวงจรในสภาวะไม่มีแรงดันตกคร่อม โดยพลังงานสะสมที่อยู่ในความเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ จะต้องมากกว่าพลังงานที่ความเก็บประจุต้องการถึงจะเกิดสภาวะสวิตช์ที่แรงดันศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะที่ 3 ($t_2' - t_3$) : ไดโอด D_1 และ D_2 นำกระแส และพลังงานในความเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ถูกผลักกลับไปยังแหล่งจ่าย แรงดันที่ V_{ds} ยังเป็นศูนย์จนกระทั่ง $t = t_3$ กระแสความเหนี่ยวนำเป็นศูนย์ D_1 และ D_2 จึงเปิดวงจร

สภาวะที่ 4 ($t_3 - t_4$) : ที่เวลานี้กระแสไหลผ่าน Q_1, Q_2 และ L_r จากศูนย์ ด้วยคุณสมบัติความเหนี่ยวนำ

สภาวะที่ 5 ($t_4 - t_5$) : ที่เวลา $t = t_4$ กระแสปฐมภูมิมีค่ามากกว่ากระแสทุติยภูมิ ไดโอดเรียงกระแสนำกระแสเป็นการส่งพลังงานจากปฐมภูมิไปยังทุติยมภูมิ

สภาวะที่ 6 ($t_5 - t_5'$) : ที่เวลา $t = t_5$ สัญญาณควบคุมจะสั่งให้ Q_1 เปิดวงจร แต่เนื่องจากความเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ จะทำให้กระแสยังคงไหลอยู่ผ่าน D_3 และ Q_2 ทำให้ V_{ds} ของ Q_3 มีค่าเป็นศูนย์สัญญาณควบคุมจะสั่งให้ Q_3 ปิดวงจร

สภาวะที่ 7 ($t_5' - t_6$) : กระแสไหลเนื่องจากความเหนี่ยวนำยังคงไหลผ่าน D_3 และ D_2

สภาวะที่ 8 ($t_6 - t_6'$) : ที่เวลา $t = t_6$ Q_2 จะถูกสั่งให้เปิดวงจร กระแสจากความเหนี่ยวนำจะเก็บประจุของ Q_2 จากศูนย์โวลท์ถึง V_{in} และคายประจุความเก็บประจุของ Q_4 จาก V_{in} เป็นศูนย์ที่ $t = t_6'$ D_4 จะนำกระแสและ Q_4 จะถูกสั่งให้ปิดวงจร

สภาวะที่ 9 ($t_6' - t_7$) : D_3 และ D_4 นำกระแส และกระแสจากความเหนี่ยวนำเรโซแนนท์จะไหลไปยังแหล่งจ่าย เมื่อกระแสเป็นศูนย์ D_3 และ D_4 จะเปิดวงจร

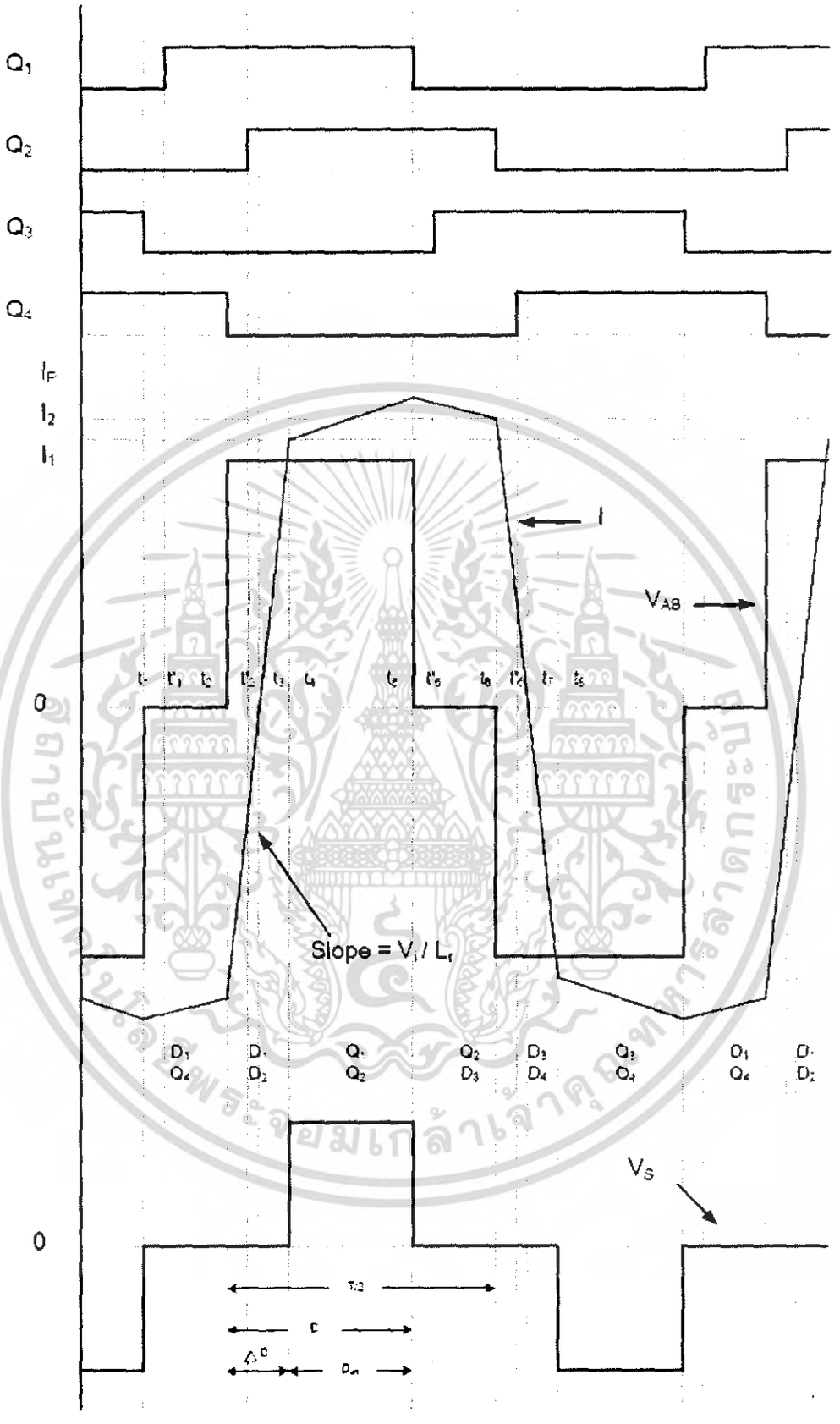
สภาวะที่ 10 ($t_7 - t_8$) : Q_3 และ Q_4 จะนำกระแสขณะแรงดันเป็นศูนย์

สภาวะที่ 11 ($t_8 - t_1$) : ที่ $t = t_8$ กระแสปฐมภูมิมีค่าเท่ากับกระแสทุติยภูมิ

สภาวะที่ 12 ($t_1 - t_1'$) : เป็นการเริ่มด้วย Q_3 สั่งเปิด ความเก็บประจุของ Q_3 และ Q_1 ถูกเก็บประจุและคายประจุจนแรงดันของ Q_1 เป็นศูนย์เป็นเวลาที่สั่งให้ Q_1 ปิดวงจร

ต่อจากนั้นก็จะกลับไปสู่สภาวะที่ 1 อีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 รูปสัญญาณการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 การวิเคราะห์เชิงสมการแต่ละสภาวะการทำงาน

ในสภาวะเรโซแนนท์ Q_2 ปิดวงจรและ Q_4 เปิดวงจร ที่ช่วงเวลา t_2 (หรือ Q_2 เปิดวงจรและ Q_4 ปิดวงจร ที่ช่วงเวลา t_6) ซึ่งพลังงานที่สะสมใน L_r จะต้องมากกว่า ความต้องการพลังงานของความเก็บประจุด้านเอาท์พุทของ Q_2 และ Q_4 (C_{MOS2} และ C_{MOS4}) และความเก็บประจุของหม้อแปลง (C_{TR}) จึงจะเกิดการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์

$$E = \frac{1}{2}L_r I_2^2 > \frac{4}{3}C_{MOS}V_{in}^2 + \frac{1}{2}C_{TR}V_{in}^2 \tag{3.5}$$

โดย $C_{MOS1} = C_{MOS2} = C_{MOS3} = C_{MOS4} = C_{MOS}$
ฉะนั้นค่ากระแสวิกฤตที่เริ่มทำให้เกิดการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์

$$\begin{aligned} I_{crit} &= I_2 \\ \frac{1}{2}L_r I_{crit}^2 &= \frac{4}{3}C_{MOS}V_{in}^2 + \frac{1}{2}C_{TR}V_{in}^2 \\ I_{crit}^2 &= \frac{2}{L_r}\left(\frac{4}{3}C_{MOS}V_{in}^2 + \frac{1}{2}C_{TR}V_{in}^2\right) \\ I_{crit} &= \sqrt{\frac{2}{L_r}\left(\frac{4}{3}C_{MOS}V_{in}^2 + \frac{1}{2}C_{TR}V_{in}^2\right)} \end{aligned} \tag{3.6}$$

กระแสที่ผ่าน L_r ที่เวลา t_2 หาได้จาก

$$I_2 = \frac{N_s}{N_p}\left(I_{Load} + \frac{\Delta I}{2} - \frac{V_{out}}{L_r}(1-D)\frac{T}{2}\right) \tag{3.7}$$

การสวิตช์ที่แรงดันศูนย์จะเกิดเมื่อ I_2 มากกว่า I_{crit} ฉะนั้น

$$\begin{aligned} I_{crit} &> I_2 \\ &< \frac{N_s}{N_p}\left(I_{Load} + \frac{\Delta I}{2} - \frac{V_{out}}{L_f}(1-D)\frac{T}{2}\right) \\ \frac{N_s}{N_p}I_{crit} &< I_{Load} + \frac{\Delta I}{2} - \frac{V_{out}}{L_f}(1-D)\frac{T}{2} \\ I_{Load} &< \frac{N_s}{N_p}I_{crit} + \frac{\Delta I}{2} - \frac{V_{out}}{L_f}(1-D)\frac{T}{2} \end{aligned} \tag{3.8}$$

อัตราขยายแรงดันของ ZVS-PWM หาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_s}{N_p} D_{eff} \tag{3.9}$$

$$D = D_{eff} + \Delta D \tag{3.10}$$

โดยส่วนสูญเสียของดิวตี้ไซเคิล หาได้จากขอบขาขึ้นและขอบขาลงของกระแสปฐมภูมิ ในรูปที่ 3.12

$$\Delta D = \frac{I_1 + I_2}{\frac{V_{in}}{L_r} \cdot \frac{T}{2}} \tag{3.11}$$

$$\Delta D = \frac{\frac{N_s}{N_p}}{\frac{V_{in}}{L_r} \cdot \frac{T}{2}} \left(2I_{Load} - \frac{V_{out}}{L_f}(1-D)\frac{T}{2} \right) \tag{3.12}$$

จากสมการที่ 3.12 และสมการที่ 3.10

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \frac{N_s}{N_p} + \frac{\frac{N_s}{N_p}}{\frac{V_{in}}{L_r} \cdot \frac{T}{2}} \left(2I_{Load} - \frac{V_{out}}{L_f}(1-D)\frac{T}{2} \right)$$

$$= D_{eff} + \frac{\frac{N_s}{N_p}}{\frac{V_{in}}{L_r} \cdot \frac{T}{2}} \left(2I_{Load} - \frac{V_{out}}{L_f}(1-D)\frac{T}{2} \right)$$

$$= D_{eff} + \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{2L_r}{V_{in}} \cdot \frac{1}{T} \left(2\frac{V_{out}}{R} - \frac{V_{out}}{L_f}(1-D)\frac{T}{2} \right)$$

$$= D_{eff} + \frac{N_s}{N_p} \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot \frac{2L_r}{T} \left(2\frac{1}{R} - \frac{1}{L_f}(1-D)\frac{T}{2} \right)$$

$$= D_{eff} + \left(\frac{N_p}{N_s} \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \frac{2L_r}{T} \left(2\frac{1}{R} - \frac{1}{L_f}(1-D)\frac{T}{2} \right) \left(\frac{N_s}{N_p} \right)^2$$

$$= D_{eff} + D_{eff} \left(\frac{4L_r}{TR} - \frac{L_r}{L_f}(1-D) \right) \left(\frac{N_s}{N_p} \right)^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = D_{eff} + \frac{4L_r D_{eff}}{TR} - \frac{L_r D_{eff}}{L'_f} + \frac{L_r D_{eff} D}{L'_f}$$

$$D - \frac{L_r D_{eff} D}{L'_f} = D_{eff} + \frac{4L_r D_{eff}}{TR} - \frac{L_r D_{eff}}{L'_f}$$

$$\left(1 - \frac{L_r D_{eff}}{L'_f}\right) D = D_{eff} + \frac{4L_r D_{eff}}{TR} - \frac{L_r D_{eff}}{L'_f}$$

$$D = \frac{D_{eff} + \frac{4L_r D_{eff}}{TR'} - \frac{L_r D_{eff}}{L'_f}}{1 - \frac{L_r D_{eff}}{L'_f}}$$

$$= \frac{D_{eff} + \frac{4L_r}{TR'} - \frac{L_r}{L'_f}}{\frac{1}{D_{eff}} - \frac{L_r}{L'_f}}$$

$$D = \frac{D_{eff} + \frac{4L_f}{TR'} - \frac{L_r}{L'_f}}{\frac{1}{D_{eff}} - \frac{L_r}{L'_f}} \qquad (3.13)$$

ถ้าให้ (1 - D) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $2I_{Load}$ จากสมการที่ 3.12 จะได้

$$\Delta D = \frac{\frac{N_s}{N_p}}{\frac{V_{in}}{L_r} \cdot \frac{T}{2}} (2I_{Load}) \qquad (3.14)$$

แทนในสมการที่ 3.10

$$D = D_{eff} + \frac{\frac{N_s}{N_p}}{\frac{V_{in}}{L_r} \cdot \frac{T}{2}} (2I_{Load})$$

$$= D_{eff} + \frac{N_s}{N_p} \frac{V_{out}}{V_{in}} \frac{2L_r}{T} \left(\frac{2}{R}\right)$$

$$= D_{eff} + \left(\frac{N_p}{N_s} \frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \frac{2L_r}{T} \left(\frac{2}{R}\right) \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= D_{eff} + D_{eff}\left(\frac{4L_r}{TR}\right)\left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2$$

$$= D_{eff}\left(1+\frac{4L_r}{TR'}\right)$$

$$D_{\max} \geq D = \frac{N_p}{N_s}\frac{V_{out}}{V_{in}}\left(1+\frac{4L_r}{R'}f_s\right) \quad (3.15)$$

3.5.5 หลักการออกแบบ

จากรูปที่ 3.12 ความชันของกระแสปฐมภูมิที่เวลา $t_2 - t_4$ หรือ $t_6 - t_8$ แปรผกผันกับ L_r เมื่อพิจารณาให้ V_{in} คงที่จากสมการที่ 3.6 ค่า L_r คำนวณจากค่ากระแสปฐมภูมิต่ำสุดที่ต้องการให้เกิดการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ ถ้าหากต้องการให้เกิดการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ที่กระแสค่าน้อยๆ ค่า L_r จะต้องมีค่ามาก แต่เมื่อกระแสมากขึ้น จากสมการที่ 3.11 ค่า ΔD มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่า D_{eff} จากสมการที่ 3.9 มีค่าน้อยลงทำให้ไม่สามารถรักษา V_{out} ไว้ได้จากสมการที่ 3.9 จะต้องชดเชยด้วยการลดค่า N_p/N_s ถึงจะรักษาแรงดัน V_{out} ไว้ได้ แต่ผลจากค่า D_{eff} ที่น้อยจะทำให้อุปกรณ์นำกระแสสูงที่เวลาน้อย เป็นการสร้างความเครียดให้กับอุปกรณ์สวิตช์ และต้องใช้อุปกรณ์สวิตช์ที่ทนกระแสสูง โดยปกติจะออกแบบให้เกิดการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ที่ 50% ถึง 100% ของกระแสพีกัด

เมื่อกำหนดช่วงกระแสภาระที่ให้เกิดการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ ทำให้ทราบค่า L_r ถ้าพิจารณาที่ความถี่ เมื่อความถี่ลดลงนั้นหมายถึงคาบเวลามีค่ามากขึ้น แต่ ΔD มีค่าเท่าเดิมทำให้ D_{eff} มีค่ามากขึ้นส่งผลให้ N_p/N_s ในการออกแบบมีค่ามากขึ้นได้

3.6 หม้อแปลงสวิตชิ่งความถี่สูง

หม้อแปลงสวิตชิ่งความถี่สูง (Switching Transformer) จัดเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย ผู้ออกแบบสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายจึงจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึง

1. รูปแบบที่เป็นไปได้ในลักษณะต่างๆของหม้อแปลง
2. ความเหมาะสมในการใช้งาน
3. การคำนวณขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ และขนาดลวดทองแดง
4. ความปลอดภัยทางไฟฟ้า
5. การสูญเสียในหม้อแปลง

3.6.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลงสวิตชิ่ง

หม้อแปลงสวิตชิ่งจะมีหน้าที่หลักในการลดทอนแรงดันไฟตรงที่อินพุตคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งอาจมีค่าสูง ให้มีค่าลดลงเป็นแรงดันไฟฟ้าค่าต่ำที่เอาต์พุตและทำให้เกิดการแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ได้ เพื่อป้องกันอันตรายจากการถูกไฟฟ้าดูด โดยส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงสวิตชิ่งประกอบไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1.1 แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite core)

เฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic material) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์จะมีผลทำให้เกิดความหนาแน่นแม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนแกนอากาศ โดยแกนเฟอร์ไรต์มีค่าอิ่มตัวฟลักซ์แม่เหล็กค่อนข้างสูงและเกิดการสูญเสียในตัวมันต่ำที่ความถี่สูงๆ ดั้งนั้นหม้อแปลงสวิตชิ่งจึงนิยมใช้แกนเฟอร์ไรต์มากที่สุด โดยจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับการใช้งานและมาตรฐานการออกแบบ

3.6.1.2 บอบบิ้น (Bobbin)

บอบบิ้นหรือแบบรองพัน ปกติจะทำจากพลาสติกชนิดทนความร้อนได้สูงและไม่ติดไฟ โดยบอบบิ้นจะช่วยให้การพันขดลวดบนแกนเฟอร์ไรต์สะดวกขึ้น และป้องกันปัญหาการเกิดลัดวงจรระหว่างขดลวดกับแกนเฟอร์ไรต์ได้ โดยจะมีขนาดมาตรฐานตามมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์

3.6.1.3 ลวดทองแดงอาบน้ำยา (Enamelled Copper Wire)

การพันขดลวดทั้งไพรมารี่และเซคั่นดารี่ของหม้อแปลงสวิตชิ่งที่กำลังไม่สูงนักปกติจะใช้ลวดทองแดงอาบน้ำยาพันบนแกนบอบบิ้นเพื่อให้ได้จำนวนรอบตามที่ต้องการ ขนาดของลวดขดลวดทองแดงที่พันนั้น ขึ้นอยู่กับค่ากระแสสูงสุดที่ผ่านลวด ความถี่และผลข้างเคียงอื่น ๆ

3.6.1.4 เทปฉนวน (Insulation Tape)

เทปฉนวนจะมีหน้าที่สำหรับพันเป็นตัวรองระหว่างชั้นของขดลวดในหม้อแปลงสวิตชิ่ง และทำการแยกส่วนทางไฟฟ้าระหว่างขดไพรมารี่และขดเซคั่นดารี่ด้วยวัสดุที่ใช้ทำเป็นเทปฉนวนอาจเป็นพวกไมลาร์ (Mylar) หรือโพลีเอสเตอร์ (Polyester) การเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบและค่าความปลอดภัยที่ต้องการจากหม้อแปลงสวิตชิ่งเป็นหลัก

3.6.2 การเลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์

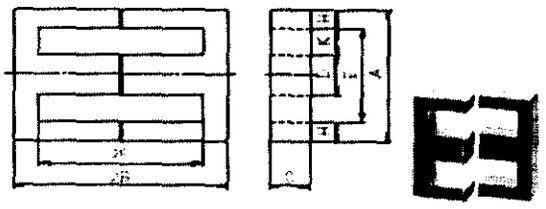
3.6.2.1 ลักษณะและขนาดมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์

โดยทั่วไปแกนเฟอร์ไรต์สำหรับหม้อแปลงสวิตชิ่ง จะถูกผลิตออกมาที่ขนาดและรูปทรงต่างๆ ตามมาตรฐานเดียวกัน เช่น EI, EE, ETD หรือแกนแบบ POT เป็นต้น ปกติจะผลิตทำแกนเฟอร์ไรต์ออกมาในลักษณะคู่ประกบ และเพื่อความสะดวกในการประกอบเข้ากับบอบบิ้นโดยจะทำให้ทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์มีลักษณะเป็นวงบรรจบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EE Series

EE CORE
CORE SHAPES AND DIMENSIONS/CHARACTERISTICS

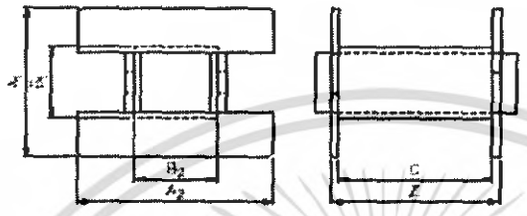


PRODUCT IDENTIFICATION

PE22 (1) EE (2) 320 (3) · 250 (4) · 20 (5)

(1) Material name
(2) Shape
(3) Dimension A
(4) Dimension 2B
(5) Dimension C

EE CORE BOBBIN



รูปที่ 3.13 แสดงตัวอย่างขนาดของแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงรายละเอียดของแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE

Part No.	A_e *(at PW) ±25%	Dimensions (mm) A	2B	C	D	E	2F	H	R	K	K×2F(mm²)
PE22 EE70-91-19	3800	70.0±1.5	81.0±1.0	19.5±0.5	19.5±0.5	46.6min.	71.0±1.0	10.0±0.5	0	15.3	1086
PC40 EE70-91-19	4910										
PE22 EE80-76-20	4590	80.0±1.5	76.0±1.0	20.0±0.5	20.0±0.5	58.6min.	56.0±0.8	10.0±0.5	0.5max.	20.0	1100
PC40 EE80-76-20	5720										
PE22 EE90-56-16	2960	90.0±2.0	56.4±1.0	16.5±0.5	25.0±1.0	60.0min.	30.4±1.0	12.5±0.5	0.5max.	20.0	608
PC40 EE90-56-16	7380										
PE22 EE320-250-20 *	—	320.0±5.0	250.0±1.0	20.0±1.0	100.0±2.4	217.0min.	150.0±3.0	50.0±1.0	0	60.0	7950
PC40 EE320-250-20 *	—										
PE22 EE70-108-31N	6350	70.0±1.5	108.0±1.0	31.6±0.5	22.2±0.5	46.3min.	85.6±1.0	11.1±0.5	2.0max.	12.8	1096
PC40 EE70-108-31N	7970										

* Measuring condition: T=23°C, f=1kHz, Hm=0.4A/m
* EE320x250x50-Z is a bonded product.

Part No.	Core factor C(/mm⁻¹)	Ce(/mm⁻¹)	Ae(mm²)	le(mm)	Ve(mm³)	Weight (g)
PE22 EE70-91-19	0.52779	0.13059	386	204	78690	394
PC40 EE70-91-19						
PE22 EE80-76-20	0.41978	0.11058	496	182	73940	372
PC40 EE80-76-20						
PE22 EE90-56-16	0.33583	0.09009	419	141	59050	306
PC40 EE90-56-16						
PE22 EE320-250-20	0.20954	0.05143	2000	577	1151160	6150
PC40 EE320-250-20						
PE22 EE70-108-31N	0.32982	0.04995	703	232	162900	815
PC40 EE70-108-31N						

EE CORE BOBBIN

Part No.	Dimensions (mm) A1	A2	B1	B2	C	Z	Cross sectional winding area A1(mm²)	Average winding length le(mm)	Weight (g)	Material
BE-80-S	56.5±0.5	81.0±0.5	25.2±0.5	25.2±0.5	47.5±2.5	51.5±2.5	747	159	32	FR1
BE-80-W	56.5±0.5	81.0±0.7	25.2±0.5	45.8±0.5	47.5±2.5	51.5±2.5	747	209	41	FR1

3.6.2.2 ลักษณะสมบัติของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์

ชนิดของเนื้อสารแกนเฟอร์ไรต์ที่แตกต่างกัน จะทำให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรต์แตกต่างกันด้วยถึงแม้จะมีขนาดเท่ากันทุกประการก็ตาม ดังนั้นใน

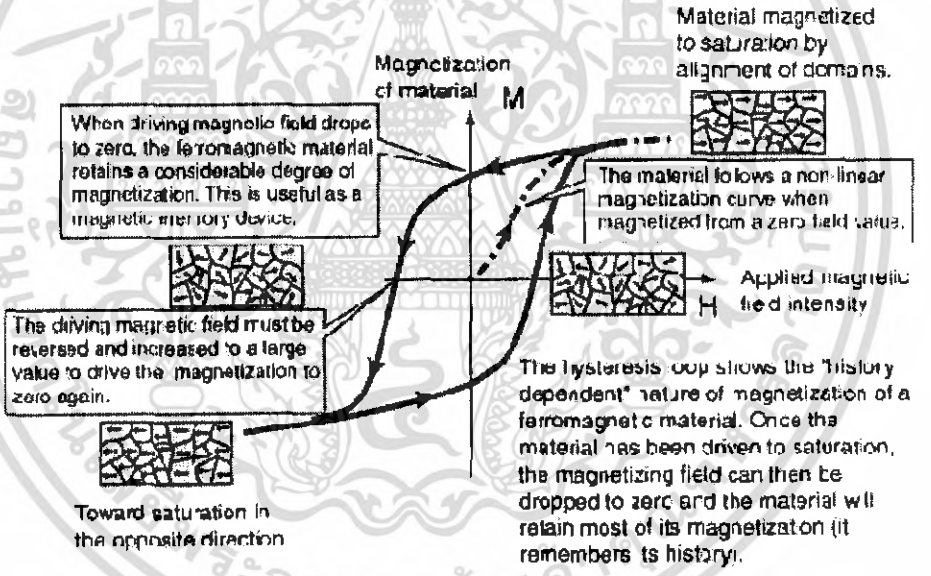
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นข้อมูลเนื้อสารที่ให้มากับแกนเฟอร์ไรต์จะต้องมีรายละเอียดคุณสมบัติของเนื้อสารแสดงไว้เสมอ โดยข้อมูลสำคัญที่เราจะทำความเข้าใจและศึกษาไว้คือ

1. วงรอบฮีสเตอริซีส (Hysteresis Loop)
2. กำลังสูญเสียในแกน (Core Loss)

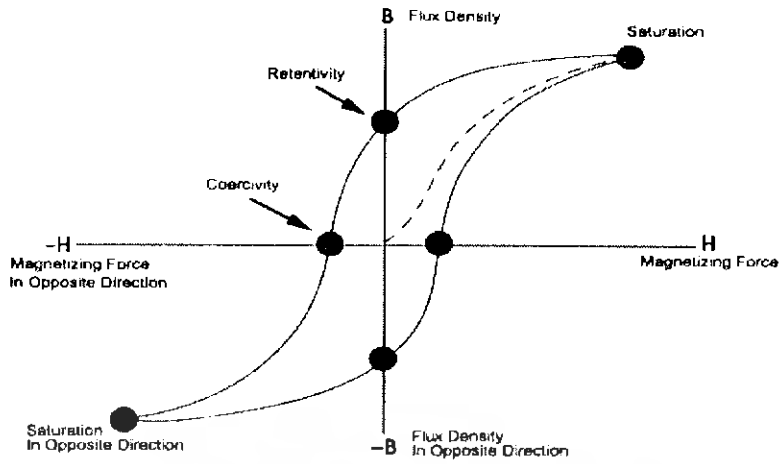
1. วงรอบฮีสเตอริซีส (Hysteresis Loop)

ภายในเนื้อสารของเฟอร์โรแมกนิติกนั้นจะประกอบไปด้วยพื้นที่เล็กๆ ที่เรียกว่าโดเมน (Domain) ซึ่งในแต่ละพื้นที่เล็กๆ ดังกล่าวจะมีการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic Moment) ในทิศทางเดียวกัน ทำให้สารแม่เหล็กมีค่าสูง โดยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิคูรี (T_C: Curie Temperature) ซึ่งถ้าหากอุณหภูมิที่ใช้งานมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิคูรีจะมีผลทำให้การเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็ก กระจัดกระจายไม่เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน ถ้าทำให้สารเฟอร์โรแมกนิติกเย็นตัวลง การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็ก จะเรียงตัวกันใหม่ในทิศทางที่ไม่แน่นอนทำให้ผลรวมของสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นถ้าทำให้วัสดุเฟอร์โรแมกนิติกมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรีจะหมายถึง การล้างแม่เหล็ก (Demagnetize) วัสดุเฟอร์โรแมกนิติกดังกล่าว



รูปที่ 3.14 การเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic Moment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 การหาวงรอบฮีสเตอริซีสของสารเฟอร์โรแมกนิติก

สำหรับการหาวงรอบฮีสเตอริซีสของสารเฟอร์โรแมกนิติกจะเริ่มต้นจาก การที่ทำให้สารมีความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิคูรี เพื่อทำให้โดเมนภายในสารของแม่เหล็กกระจัดกระจายไม่เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมด จากนั้นทำการป้อนแรงเคลื่อนแม่เหล็กโดยผ่านทางการจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดทองแดง เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ก็จะทำให้โดเมนเกิดการเรียงตัวกันตามทิศทางของความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) จนกระทั่งค่าความเข้มสนาม แม่เหล็กถึงค่า H_m ซึ่งนั้นก็หมายถึงจุดที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัว (Saturate) ตามทางเส้นประไปถึงจุด a ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และเมื่อทำการลดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กลง (H=0) ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กก็จะลดลงถึงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กดกค้าง (Retentivity) ที่จุด b ซึ่งจะคงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กดังนี้ตลอดไปถึงแม้ว่าจะหยุดป้อนความเข้มสนามแม่เหล็กแล้วก็ตาม และถ้าหากต้องการที่จะทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กดกค้างนี้หมดไปจะต้องทำการป้อนค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเท่ากับ H_c (Coercive Force) ที่จุด c จากนั้นทำการกลับทิศทางการป้อนความเข้มสนามแม่เหล็กอีกครั้ง ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กก็จะเพิ่มขึ้นจากจุด d ไปจุด e ไปจุด f และสิ้นสุดที่จุด a แสดงดังรูปที่ ก็จะได้วงรอบฮิสเดอริซีส ซึ่งวงรอบฮิสเดอริซีสดังกล่าวจะมีความสมมาตรกล่าวคือจะมีพื้นที่ซีกบวกเท่ากับซีกลบนั่นเอง

2. กำลังสูญเสียในแกน (Core Loss)

สำหรับกำลังสูญเสียในแกนเหล็กจะประกอบไปด้วย กำลังสูญเสียเนื่องจากฮิสเดอริซีส (Hysteresis Loss) และกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสวนภายในแกนแม่เหล็ก (Eddy Current Loss) ซึ่งจะมีรายละเอียดดังนี้

2.1 กำลังสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอริซีส (Hysteresis loss)

จากพื้นที่ภายในกราฟ B - H ในรูปที่ 3.15 ซึ่งหมายถึง ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นทุกคาบของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าด้านเข้าที่ป้อนให้กับสารแม่เหล็กนั้นโดยจะเรียกความสูญเสียดังกล่าวว่ากำลังสูญเสียเนื่องจากฮิสเดอริซีส (P_h) จะมีหน่วยเป็นวัตต์ ซึ่งหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_h = (\frac{1}{2} BHV_c).f \tag{3.16}$$

จากสมการดังกล่าวทำให้ทราบได้ว่า ถ้ากำหนดให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ซึ่งเป็นค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ B_m ปริมาตรแกน (V_c) มีค่าคงที่ ความสูญเสียฮิสเตอริซีสก็จะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือถ้าความถี่ใช้งานมีค่าสูงขึ้นจะทำให้กำลังสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอริซีสมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง และเมื่อเราแทนความเข้มของสนามแม่เหล็กจะได้สมการ

$$P_h = (\frac{1}{2} \frac{B_m^2}{\mu} V_c).f \tag{3.17}$$

จากสมการดังกล่าวทำให้ทราบได้ว่า ถ้ากำหนดให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ปริมาตรแกน (V_c) ค่าความถี่ใช้งาน (f) มีค่าคงที่ความสูญเสียฮิสเตอริซีสก็จะขึ้นอยู่กับค่าความซาบซึมแม่เหล็ก (μ) โดยถ้าเลือกแกนแม่เหล็กที่มีความซาบซึมได้สูงๆ ก็จะทำให้ค่าความสูญเสียฮิสเตอริซีสมีค่าต่ำ และในทำนองเดียวกันถ้าเลือกแกนแม่เหล็กที่มีความซาบซึมได้ต่ำๆ ก็จะทำให้ค่าความสูญเสียฮิสเตอริซีสมีค่าสูง

2.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสวนในแกนแม่เหล็ก (Eddy Current Loss)

พิจารณาโดยใช้กฎของฟาราเดย์ โดยค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดทองแดงแต่ละขดจะเท่ากับ

$$E_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \tag{3.18}$$

$$E_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \tag{3.19}$$

$$E_3 = N_3 \frac{d\phi}{dt} \tag{3.20}$$

สมการที่ 3.18 และ 3.19 จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ ในขณะที่สมการที่ 3.20 จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในแกนแม่เหล็กโดยจะมีค่าจำนวนรอบ (N_3) เท่ากับหนึ่ง เป็นผลทำให้เกิดกระแสวน (I_3) ภายในแกนแม่เหล็ก ซึ่งกระแสไหลวนดังกล่าวจะทำให้เกิดความร้อนภายในแกนแม่เหล็กนั้น สำหรับค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (P_e) สามารถนิยามได้ดังนี้

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \tag{3.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ P_e หมายถึง กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

K_e หมายถึง ค่าคงที่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเนื้อสารที่นำมาทำแกนแม่เหล็ก

B_m หมายถึง ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด

ดังนั้นกำลังสูญเสียในแกน (P_c) จะหาได้จาก

$$P_c = P_h + P_e \tag{3.22}$$

3.6.3 การเลือกใช้ลวดทองแดง

3.6.3.1 ลักษณะและขนาดมาตรฐานของเส้นลวดทองแดง

โดยทั่วไปแล้วเส้นลวดทองแดงจะถูกผลิตออกมาที่ขนาดและรูปทรงต่าง ๆ ตามมาตรฐาน เช่น AWG (American Wire Gauge), SWG (Standard Wire Gauge) และ BWG (Birmingham Wire Gauge) ซึ่งแต่ละมาตรฐานจะมีเบอร์ต่างๆ ซึ่งแต่ละเบอร์จะบอกขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดดังแสดงตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงขนาดของเส้นลวดทองแดง

Wire Gauge Table
A.W.G. in the table stands for American Wire Gauge (or Brown & Sharpe Wire Gauge).
S.W.G. stands for British Standard Wire Gauge. B.W.G. stands for Birmingham Wire Gauge.

Gauge			Diameter	Area	Gauge			Diameter	Area
A.W.G. (B&S)	SWG	B.W.G.	mm	mm^2	A.W.G. (B&S)	SWG	B.W.G.	mm	mm^2
-	22	22	0.711	0.3973	-	31	-	0.295	0.06819
22	-	-	0.644	0.3256	29	-	-	0.286	0.06422
-	23	23	0.635	0.3167	-	32	-	0.274	0.05908
-	-	-	0.610	0.2919	30	-	-	0.255	0.05097
23	-	-	0.573	0.2581	-	31	31	0.254	0.05067
-	24	24	0.559	0.2452	-	34	-	0.234	0.04299
24	-	-	0.511	0.2047	-	-	32	0.229	0.04104
-	25	25	0.508	0.2027	31	-	-	0.227	0.04039
-	26	26	0.457	0.1642	-	35	-	0.213	0.03575
25	-	-	0.455	0.1623	-	-	33	0.203	0.03243
-	27	-	0.417	0.1363	32	-	-	0.202	0.03203
-	-	27	0.406	0.1297	-	36	-	0.193	0.02927
26	-	-	0.405	0.1288	33	-	-	0.180	0.02540
-	28	-	0.376	0.1110	-	-	34	0.178	0.02488
27	-	-	0.361	0.1021	-	37	-	0.173	0.02343
-	-	28	0.356	0.09932	34	-	-	0.161	0.02014
-	29	-	0.345	0.09372	-	38	-	0.152	0.01824
-	-	29	0.330	0.08563	35	-	-	0.142	0.01589
28	-	-	0.321	0.08067	-	39	-	0.132	0.01370
-	30	-	0.315	0.07791	36	-	35	0.127	0.01267
-	-	30	0.315	0.07297	-	40	-	0.122	0.01167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในลวดทองแดง

เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าในสายตัวนำทองแดงจะไม่ได้ปรากฏล้อมรอบสายตัวนำทองแดงเท่านั้น แต่จะปรากฏภายในสายตัวนำทองแดงด้วยเช่นกัน และถ้ากำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำทองแดงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความสม่ำเสมอเท่าๆ กัน (Uniform Current) จะได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำภายในสายตัวนำทองแดง (L_{int}) จะมีค่าน้อยลงเมื่อรัศมี (r) เพิ่มขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดศูนย์กลางของตัวนำทองแดงจะมีค่าน้อยที่สุด เพราะความต้านทานมีค่าเท่ากันตลอดพื้นที่ผิวของตัวนำทองแดง ในขณะที่ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของตัวนำทองแดง ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดศูนย์กลางของสายตัวนำทองแดงมีค่ามากที่สุดนั่นเอง และค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายตัวนำทองแดงที่ผิวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อห่างจากจุดศูนย์กลางของตัวนำทองแดงเป็นลำดับ สำหรับกรณีไฟฟ้ากระแสสลับนั้นค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะแปรตามความถี่ใช้งาน และยิ่งความถี่ที่ใช้งานมีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าจะอยู่เฉพาะบริเวณผิวของตัวนำทองแดง ซึ่งผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะเรียกว่า ปรากฏการณ์ทางผิว (Skin effect)

โดยที่ค่าความต้านทานรวมที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรงและความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดจากผลของปรากฏการณ์ทางผิวจะเท่ากับ

$$R_{ac} = R_{dc} + R_{se} = R_{dc}(1+F) \tag{3.23}$$

โดยที่ R_{ac} หมายถึง ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ

R_{dc} หมายถึง ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

R_{se} หมายถึง ความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดจากผลของปรากฏการทางผิวซึ่งจะนิยามได้จาก

$$R_{se} = R_{dc} \cdot F \tag{3.24}$$

$$\frac{R_{ac}}{R_{dc}} = 1 + F \tag{3.25}$$

เมื่อ F หมายถึง ตัวประกอบปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect Factor) ซึ่งจะได้เป็นฟังก์ชันของ $\frac{d}{\delta}$ โดยที่

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_c}{\mu \cdot \omega}} = \sqrt{\frac{\rho_c}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_c \cdot f}} \tag{3.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ δ หมายถึง ความหนาของผิวตัวนำทองแดงกระแส (Skin Depth)
ρ_c หมายถึง ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของสายตัวนำทองแดง
μ_c หมายถึง ค่าความซาบซึมได้สัมพันธ์ของสายตัวนำทองแดง
d หมายถึง ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของสายตัวนำทองแดง

เนื่องจากค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสไฟฟ้าสลับสามารถหาได้จาก

$$R_{dc} = \rho_c \cdot \frac{l}{A} = \rho_c \cdot \frac{l}{(\pi \cdot r^2)} \tag{3.27}$$

$$R_{ac} = \rho_c \cdot \frac{l}{A} = \rho_c \cdot \frac{l}{\pi \cdot (r^2 - (r-\delta)^2)} = \rho \cdot \frac{l}{\pi \cdot r^2 \left(\frac{2\delta}{r} - \left(\frac{\delta}{r} \right)^2 \right)} \tag{3.28}$$

นำสมการที่ 3.27 หารด้วยสมการ 3.28 จะได้

$$\frac{R_{ac}}{R_{dc}} = \frac{1}{\left(\frac{2\delta}{r} - \left(\frac{\delta}{r} \right)^2 \right)} \tag{3.29}$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 3.29 จะเห็นได้ว่าถ้าทำให้ค่ารัศมีของสายตัวนำทองแดงมีค่าเท่ากับความหนาของผิวตัวนำทองแดงกระแส ($r = \delta$) จะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับต่อไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นถ้าทำให้รัศมีของสายตัวนำทองแดง (r) ที่ใช้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับของความหนาของผิวตัวนำทองแดงกระแจส $r \le \delta$ ก็จะทำให้ผลของปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect) ของตัวนำทองแดงมีค่าน้อยมากจนสามารถละเว้นไม่นำมาพิจารณาได้ นอกจากนั้นการเลือกใช้ตัวนำทองแดงที่มีพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำทองแดงมีขนาดใหญ่กว่าความหนาของผิวตัวนำทองแดงกระแส ก็จะไม่มีประโยชน์การนำกระแสไฟฟ้าได้เลย

ดังนั้นในทางปฏิบัติ จึงนิยมใช้สายตัวนำทองแดงที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับความหนาของผิวตัวนำทองแดงกระแสจำนวนหลายๆ เส้น นั่นคือ เลือกรัศมีของลวดทองแดงที่เล็กกว่าความหนาของผิวตัวนำทองแดงกระแส (Skin Depth) ที่ความถี่สูงสุดที่ใช้งาน
โดยที่ สำหรับค่ากำลังสูญเสียจากกระแสไฟฟ้าไหลเฉพาะที่ผิวของตัวนำทองแดงจะหาได้จาก

$$P_{cu,se} = 22 \cdot k_{Cu} \cdot \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \cdot J_{rms}^2 \qquad \frac{mW}{cm^3} \tag{3.30}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ k_{Cu} หมายถึง ตัวประกอบการบรรจุขดลวดต่อพื้นที่ (Copper Fill Factor)

$J_{rms} = \frac{I_{rms}}{A}$ หมายถึง ค่าความหนาแน่นกระแสในสายตัวนำทองแดง

3.6.4 การออกแบบหม้อแปลงสวิตชิ่งความถี่สูง

ในการออกแบบหม้อแปลงสวิตชิ่งความถี่สูง สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบก็คือ

การเลือกอุปกรณ์

1. ชนิด ลักษณะโครงสร้าง และขนาดของแกนแม่เหล็ก
2. ชนิด รูปร่าง ขนาด และจำนวนรอบที่ใช้ในการพัน N_1 และ N_2 .... N_n
3. ชนิด และลักษณะของฉนวน
4. ลักษณะโครงสร้างของ Case ตลอดจนการระบายความร้อน
5. คุณสมบัติทางไฟฟ้า และเชิงกลอื่นๆ

ข้อกำหนด

1. ขนาดของกำลังออก
2. ขนาดและรูปร่างรวมทั้งความถี่ของกระแสและแรงดัน
3. กำลังสูญเสีย ประสิทธิภาพ
4. Voltage Regulation
5. คุณสมบัติทางไฟฟ้าและเชิงกลอื่นๆ

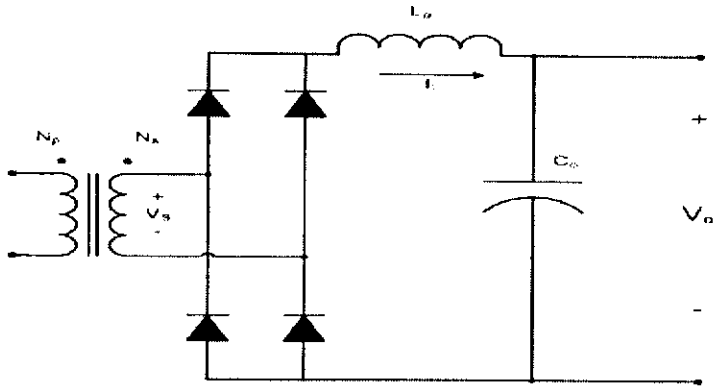
ขีดจำกัด

1. ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัวของแกนแม่เหล็ก
2. กำลังสูญเสียในลวดทองแดงและในแกนแม่เหล็ก
3. คุณสมบัติอื่น เช่น Permeability (μ)

3.7 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองทางด้านออก

วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองทางด้านออก ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ คือ ไดโอด ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ทั้งนี้เพราะเราต้องการได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มเติมให้กับกระบวนการที่เปลี่ยนสถานะของก๊าซให้เป็นพลาสมา เพราะแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะทำเกิดให้พลาสมาคงสถานะขณะเกิดพลาสมาได้ดีกว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ในส่วนของวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองทางด้านออกสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.16

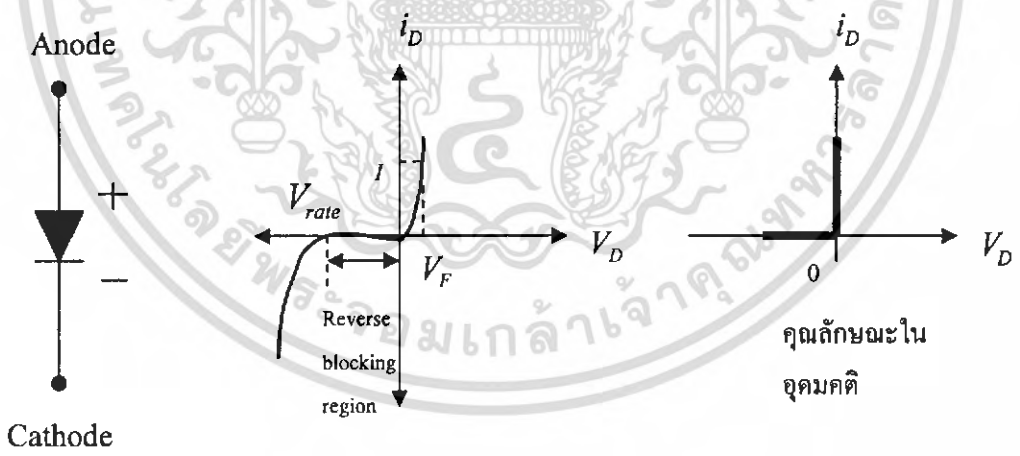
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แสดงส่วนของวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองทางด้านออก

3.7.1 ไดโอด

ไดโอดเป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่ง่ายที่สุด ดังรูปที่ 3.17 แสดงถึงสัญลักษณ์ของไดโอดและคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะในสภาวะทำงานอยู่ตัว (Steady-State) เมื่อไดโอดถูกไบอัสไปข้างหน้า (Forward Biased) ไดโอดจะนำกระแสโดยมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเล็กน้อยระดับหนึ่งโวลต์ และเมื่อไดโอดถูกไบอัสย้อนกลับ (Reverse Biased) จะมีกระแสรั่วขนาดน้อยมากจนอาจถือได้ว่าไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวไดโอดจนกระทั่งถึงจุดแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ย้อนกลับ (Reverse Breakdown Voltage) ซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องออกแบบให้ไดโอดไม่ทำงานจนถึงแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ย้อนกลับเพื่อความปลอดภัย

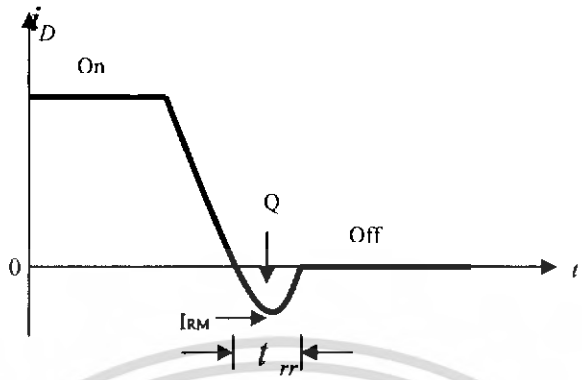


รูปที่ 3.17 สัญลักษณ์ คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอด

สำหรับคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าแบบอุดมคตินั้น เช่น ในขณะไดโอดนำกระแส และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดจะมีค่าเป็นศูนย์ในแบบอุดมคติและขณะไดโอดไม่นำกระแสหรือในช่วงไดโอดถูกไบอัสย้อนกลับไดโอดจะต้องสามารถทนแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงมาก ซึ่งเหมาะสำหรับในการวิเคราะห์ในการทำงานของตัวแปลงกำลังแต่ไม่ใช้สำหรับการออกแบบสำหรับใช้งานจริง



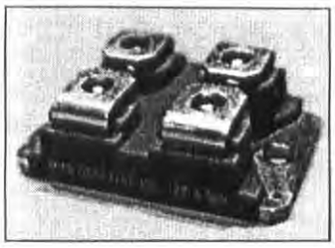
รูปที่ 3.18 ไดโอดขณะหยุดนำกระแส

เมื่อไดโอดเริ่มนำกระแส อาจพิจารณาได้ว่าเป็นการสวิตชิ่งในอุดมคติเพราะว่าช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (Turn-on Time) จะเร็วมากเมื่อเทียบกับช่วงเวลาภาวะช่วงคู่ (Transient) ในวงจรกำลัง แต่ในช่วงเวลาหยุดนำกระแส (Turn-off Time) จะมีกระแสไดโอดย้อนกลับในช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse Recovery Time, t_{rr}) ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ก่อนที่จะกลับสู่ศูนย์ โดยกระแสฟื้นตัวย้อนกลับ (ค่าเป็นลบ) จะกวาดล้างประจุในไดโอดให้หมดไปและเพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับได้ กระแสฟื้นตัวย้อนกลับจะมีผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกิน (Over Voltage) ในวงจรที่มีความเป็นเหนี่ยวนำ วงจรส่วนใหญ่ค่ากระแสฟื้นตัวย้อนกลับจะไม่ค่อยมีผลต่อคุณลักษณะด้านเข้าและด้านออกของตัวแปลงกำลัง ดังนั้นไดโอดจะถูกพิจารณาเสมือนเป็นอุดมคติในช่วงขณะไม่นำกระแส โดยไดโอดจะแบ่งชนิดของไดโอดออกตามความต้องการในการประยุกต์ใช้งาน จะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

1. **Schottky Diodes** มักจะใช้เมื่อต้องการแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมและเวลาฟื้นตัวย้อนกลับน้อยๆ ในประจุบันแรงดันขณะกระแสจะมีค่าประมาณ 0.3 โวลต์ ในขณะที่เวลาฟื้นตัวย้อนกลับโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในหน่วยนาโนวินาที ซึ่งมักจะใช้ในวงจรแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่ำๆ ไดโอดนี้จะทนแรงดันไฟฟ้าได้ระดับ 50 - 100 โวลต์ และพิกัดไฟฟ้าประมาณ 300 แอมป์

2. **ไดโอดฟื้นตัวเร็ว (Fast-recovery หรือ High speed diode)** มักจะใช้ในวงจรสวิตชิ่งความถี่สูงสำหรับวงจรแปลงผันกำลัง และใช้คู่กับสวิตช์แบบควบคุมได้ที่ต้องการเวลาฟื้นตัวย้อนกลับน้อยๆ ไดโอดกำลังขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้า 6,000 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 1,100 แอมป์จะมีค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับประมาณ 0.1-5 ไมโครวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ไดโอดฟื้นตัวเร็ว (Fast-Recovery Diode)

2. ไดโอดความถี่ต่ำ (Line-Frequency Diodes หรือ General Purpose Diode)

ไดโอดชนิดนี้ถูกออกแบบสำหรับใช้งานที่ความถี่ต่ำ เช่น ความถี่ไฟฟ้าในบ้าน 50 เฮิร์ท และมักจะออกแบบให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ ผลของไดโอดใช้งานที่ความถี่ต่ำทำให้มีช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับยาว แต่ในช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับของไดโอดดังกล่าวจะสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับคาบเวลาของความถี่ไฟฟ้าในบ้าน หรือความถี่ต่ำ ปัจจุบันไดโอดมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 6,000 โวลต์ และพิกัดกระแสไฟฟ้า 4,500 แอมป์

ในการพิจารณาพิกัดของไดโอดหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$I_{f(av)} = I_{out} x D \tag{3.31}$$

เมื่อ $I_{f(av)}$ คือ กระแสเดินหน้าเฉลี่ยสูงสุด (Maximum average forward current)

I_{out} คือ กระแสทางด้านขาออก

D คือ ตัวประกอบของวัฏจักรงาน จากข้อกำหนด พิกัดนำกระแสทางด้านขาออกที่โหลดเต็มพิกัดประมาณ 40 แอมป์ ที่วัฏจักรทำงาน = 0.5

3.7.2 ตัวเหนี่ยวนำ

สำหรับตัวเหนี่ยวนำในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังอาจจะต่ออยู่เพียงตัวเดียวในระบบ ทำหน้าที่เป็นโหลดหรือเป็นค่าพารามิเตอร์แฝง เช่น เป็นตัวเหนี่ยวนำตัวเอง (Self Inductance) ของสายตัวนำที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวเหนี่ยวนำแฝงที่ขาของตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และตัวเหนี่ยวนำรั้วไหลในหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ากรณีสภาวะชั่วขณะจะเท่ากับ

$$V_L = L\frac{di_L}{dt} \tag{3.32}$$

$$i_L(t) = i_L(t_1) + \frac{1}{L}\int_{t_1} V_L dt \quad t > t_1 \tag{3.33}$$

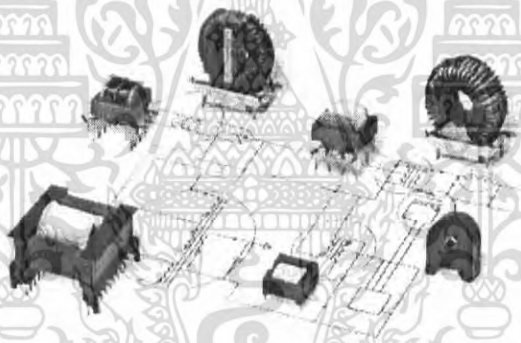
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $i_L(t_1)$ หมายถึง ค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นที่เวลา t_1 ของตัวเหนี่ยวนำ

จากสมการ 3.32 และ 3.33 จะเห็นได้ว่า กรณีที่ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีค่าสูงและพิจารณาช่วงเวลาที่สั้นมากๆ เท่ากับ dt อาจจะถือได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าดังกล่าว เป็นไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ (Constant Current) เพราะอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_L}{L} \approx 0 \tag{3.34}$$

หรือกล่าวอีกในหนึ่งคือ "กระแสตัวเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้" ดังนั้นถ้าค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูงมากๆ ก็อาจจะถือได้ว่าตัวเหนี่ยวนำดังกล่าวนั้นเปรียบเสมือนเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Current Source) ตลอดช่วงเวลา dt ซึ่งวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีค่าสูงๆ ดังกล่าว จะนิยมใช้ในกรณีที่ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่อกับวงจรที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรพัลส์ความถี่สูง



รูปที่ 3.20 ภาพตัวอย่างจริงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

3.7.2.1 การหาขนาดของตัวเหนี่ยวนำ

ในการหาขนาดของตัวเหนี่ยวนำ จะกำหนดให้ค่า Ripple ของกระแสทางด้านออก (ΔI_{out}) จะมีค่าสูงสุดไม่เกิน 20% ของกระแสเฉลี่ยทางด้านออก ดังนั้นค่าตัวเหนี่ยวนำ หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$L = \frac{E_{out} \cdot T_{off}}{0.2 \cdot I_L} \tag{3.35}$$

เมื่อ E_{out} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสทางด้านออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_{off} คือ ช่วงเวลาหยุดนำกระแสของสวิตช์ เนื่องจากค่า Ripple ของกระแสทางด้านออกสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ Duty Cycle = 0.5 ดังนั้นค่า T_{off} ที่จะทำให้ Ripple สูงสุด = $\frac{1}{2}T$

I_L คือ กระแสโหลดที่พิกัด

3.7.2.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductor Design) สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบก็คือ

การเลือกอุปกรณ์

1. ชนิด ลักษณะโครงสร้าง และขนาดของแกนแม่เหล็ก
2. ชนิด รูปร่าง ขนาด และจำนวนรอบที่ใช้ในการพัน N_1 และ N_2 .... N_n
3. ชนิด และลักษณะของฉนวน
4. ลักษณะโครงสร้างของ Case ตลอดจนการระบายความร้อน
5. คุณสมบัติทางไฟฟ้า และเชิงกลอื่นๆ

ข้อกำหนด

1. ขนาดของกำลังออก
2. ขนาดและรูปร่างรวมทั้งความถี่ ของกระแสและแรงดัน
3. กำลังสูญเสีย ประสิทธิภาพ
4. Voltage Regulation
5. คุณสมบัติทางไฟฟ้า และเชิงกลอื่นๆ
6. ขีดจำกัด
7. ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัวของแกนแม่เหล็ก
8. กำลังสูญเสียในลวดทองแดงและในแกนแม่เหล็ก
9. คุณสมบัติอื่น เช่น Permeability (μ)

3.7.3 ตัวเก็บประจุ

การหาตัวเก็บประจุสำหรับวงจรกรองด้านออก หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$C_{out} = \frac{\Delta I_{out}}{8 \cdot f \cdot \Delta v_{out}} \tag{3.36}$$

เมื่อ ΔI_{out} คือ 20% ของกระแสเฉลี่ยทางด้านออก

Δv_{out} คือ แรงดันกระเพื่อมทางด้านออก

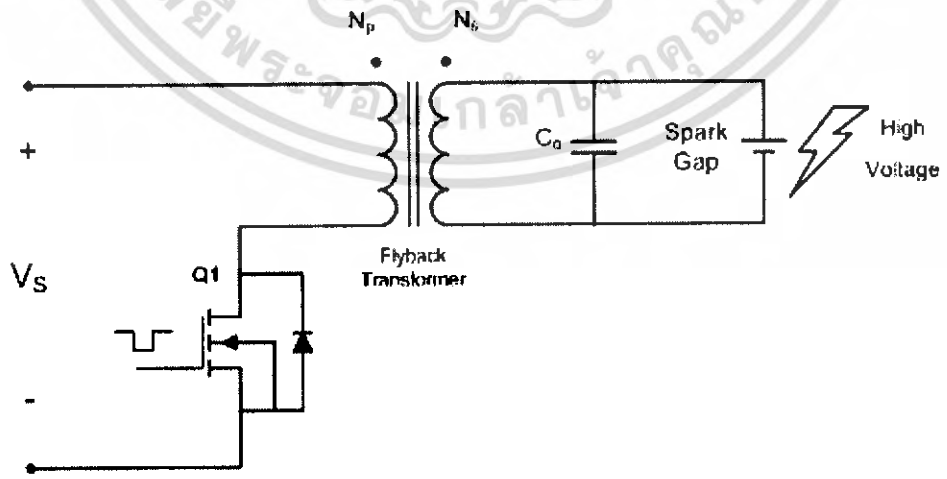
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

ในส่วนของต้นกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงของแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิ่งของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา ที่ได้ออกแบบขึ้นนี้เป็นส่วนสำคัญมากส่วนหนึ่ง เพราะการทำให้เกิดอาร์คพลาสมาโดยวิธีไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงนี้นิยมใช้กันแพร่หลาย ในกรณีที่แอโนดและแคโทดไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่เข้ามาแตะกัน เพื่อทำให้เกิดอาร์คได้เราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงเข้าช่วย เพื่อให้เกิดอาร์คซึ่งเป็นปรากฏการณ์ของก๊าซโดยทั่วๆ ไปที่มีโอกาสจะเกิดอาร์คอิสชาร์จได้ง่าย (Arc Discharge) เมื่อได้รับไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงโดยที่อาร์คความถี่สูงที่เกิดขึ้นนี้จะทำหน้าที่เป็นแนวทางเดินให้เกิดอาร์คหลัก ที่ได้จากวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่ได้ออกแบบขึ้น เมื่อเกิดอาร์คในช่วงแรกแล้วในช่วงเวลาอันสั้นก็จะทำให้เกิดอาร์คหลักรอบช่องว่างที่เป็นทางผ่านของพลาสมาก๊าซ ซึ่งถ้าเป็นลักษณะเช่นนี้เราอาจถือได้ว่า ได้เกิดอาร์คหลักคงที่พร้อมทั้งลำพลาสมาและไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงอีกต่อไป

สำหรับต้นกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่ได้ทดลองทำขึ้นนั้น จะทำงานในช่วงแรงดัน ประมาณ 3 กิโลโวลต์ ในช่วงความถี่ 40 กิโลเฮิร์ท โดยจะอาศัยหลักการของการเรโซแนนซ์ความถี่ของตัวเก็บประจุ Co และตัวเหนี่ยวนำ Lo ของ Coupling Coil จากการอาร์คของไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่สปาร์คแกบ (Spark Gad) และเชื่อมโยงความถี่สูงออกมาใช้งานที่วงจรด้านขาออกของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบฟลูบริดจ์ ในทางปฏิบัติแล้วจะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 50 โวลต์ จ่ายให้กับวงจรแปลงผันไฟฟ้าแล้วเข้าสู่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิและแรงไฟฟ้าดันทางด้านทุติยภูมิเป็น 3 กิโลโวลต์ เป็นต้นกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งในทางปฏิบัติจะใช้วงจร Flyback Converter หรือ Push-Pull Converter ในการทำงานของส่วนนี้

3.8.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงด้วยวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.21 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงด้วยวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

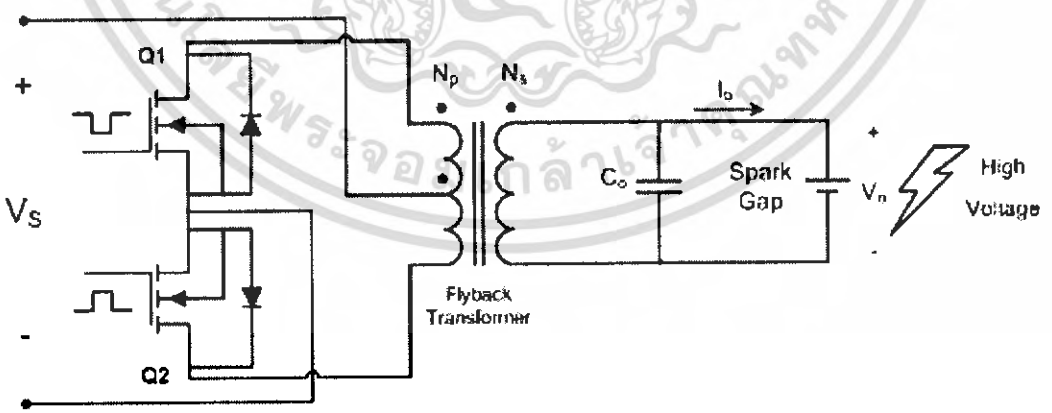
วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จัดอยู่ในประเภทการป้อนแบบแรงดันไฟฟ้า (Voltage feed) โดยมีรูปโครงสร้างของวงจรบั๊ก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แล้วนำมาประยุกต์ใช้ทำให้เกิด วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 3.21

รูปแบบของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์และวงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแสดงในรูปที่ 3.21 เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจร จะกำหนดเงื่อนไขของการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทั้งหมด เช่น สวิตช์และไดโอด จะถือว่าเป็นอุดมคติ
2. วงจรสมมูลจองหม้อแปลงไฟฟ้า จะถือว่าเป็นอุดมคติคือไม่มีตัวเหนี่ยวนำรั่ว (Leakage Inductance) แต่จะมีค่าตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก (Magnetizing Inductor : L_m) ขนานอยู่ด่อกับขดลวดด้านปฐมภูมิ (N_p) เท่านั้น
3. ตัวเก็บประจุด้านออกจะมีขนาดใหญ่มาก จนถือได้ว่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรมีค่าคงที
4. พิจารณาวงจรขณะที่ทำงานในสภาวะคงตัวเท่านั้น ซึ่งหมายถึง แรงดันและกระแสไฟฟ้าจะเป็นสัญญาณรายคาบ
5. ค่าดิวตี้ไซเคิ้ล (Duty Cycle) ของสวิตช์ D จะมีช่วงเวลาขณะนำกระแสเท่ากับ DT และมีช่วงเวลาจฯไม่นำกระแสเท่ากับ (1–D)T

สำหรับการทำงานของวงจรฟลายแบคจะคล้ายกับการทำงานของวงจรบั๊ก-บูสต์ โดยตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก (L_m) จะสะสมพลังงานขณะสวิตช์นำกระแส และจะคายพลังงานไปยังโหลดขณะสวิตช์ไม่นำกระแส การวิเคราะห์การทำงานของวงจรจะพิจารณาการทำงานของสวิตช์ทั้ง 2 สถานะ

3.8.2 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงด้วยวงจรพุช–พูลคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.22 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงด้วยวงจรพุช–พูลคอนเวอร์เตอร์

วงจรพุช–พลูคอนเวอร์เตอร์ หรือเรียกว่า วงจรพุช–พลูอินเวอร์เตอร์ (Push-Pull Inverter) ในรูปที่ 3.22 ต้องการหม้อแปลงแบบที่มีแท็บกลางด้านปฐมภูมิ โดยจะสมมติให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าด้านออก i_o ไหลอย่างต่อเนื่องและ เมื่อสวิตช์ Q_1 นำกระแส และสวิตช์ Q_2 ต้องไม่นำกระแส สวิตช์ Q_1 จะนำกระแสขณะ i_o เป็นบวก และ D_1 จะนำกระแสขณะ i_o เป็นลบ ซึ่งหากไม่พิจารณาทิศทางของกระแส i_o จะได้แรงดันไฟฟ้าด้านออก $V_o = V_s / n$ เมื่อ n เป็นอัตราส่วนจำนวนรอบด้านปฐมภูมิต่อรอบทุติยภูมิของหม้อแปลง ในทำนองเดียวกันเมื่อสวิตช์ เมื่อสวิตช์ Q_2 นำกระแส ซึ่งสวิตช์ Q_1 ต้องไม่นำกระแส จะได้แรงดันไฟฟ้าด้านออก $V_o = -V_s / n$

การสปาร์คแก็บสามารถขึ้นได้เมื่อ สวิตช์ Q_1 และ Q_2 นำและหยุดนำกระแสจะทำให้เกิดแรงดันและกระแสตกคร่อมและไหลผ่าน C_o ทำให้เกิดการชาร์จประจุขึ้นเมื่อแรงดันรูปคลื่นต่อไปมารวมกับแรงดันที่ตกคร่อม C_o จะทำให้เกิดแรงดันที่สูงขึ้นและเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณขั้วแอโนดและแคโทดของสปาร์กแก๊ป ทำให้เกิดการเบรกดาวด์ผ่านอากาศ แรงดันที่ C_o ก็จะคายประจุจนหมด แล้วเริ่มการเก็บประจุในรูปคลื่นต่อไป

วงจรพุช-พลูอินเวอร์เตอร์สามารถสวิตช์ในแบบ PWM หรือรูปคลื่นเหลี่ยมสำหรับแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะสามารถควบคุมได้จากสมการที่ 3.37

$$\hat{V}_{o1} = m_a \frac{V_s}{n} \text{ เมื่อ } m_a \le 1.0 \tag{3.37}$$

$$\frac{V_s}{n} < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi}\frac{V_s}{n} \text{ เมื่อ } m_a > 1.0 \tag{3.38}$$

สวิตช์จะต้องทนแรงดันไฟฟ้ายอดและกระแสไฟฟ้าดามพิกัดที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.39

$$V_Q = 2V_s \text{ และ } I_Q = i_{o,peak} / n \tag{3.39}$$

ข้อดีสามประการหลักการของวงจรพุช-พลูอินเวอร์เตอร์คือ

1. ในการนำกระแสแต่ละครั้งจะมีสวิตช์เพียงตัวเดียวเท่านั้นที่นำกระแส จึงเหมาะสำหรับในการประยุกต์ใช้งานที่มีระดับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงค่าต่ำๆ เช่น วงจรประจุแบตเตอรี่ เพื่อลดแรงดันตกคร่อมสวิตช์ให้น้อยที่สุด หรือหมายถึงการสูญเสียาการนำกระแสผ่านสวิตช์เรียกว่าความสูญเสียจากการนำกระแส (Conduction Loss)
2. สวิตช์ทั้งสองตัวจำมีกราวน์ร่วมกัน (Common Ground) แต่ข้อเสียของวงจรพุช-พูลอินเวอร์เตอร์ก็คือยากที่จะหลีกเลี่ยงการอิ่มตัวเนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงในหม้อแปลง
3. มีการแยกกำลังไฟฟ้าระหว่างด้านแหล่งจ่ายกับด้านโหลดออกจากกัน

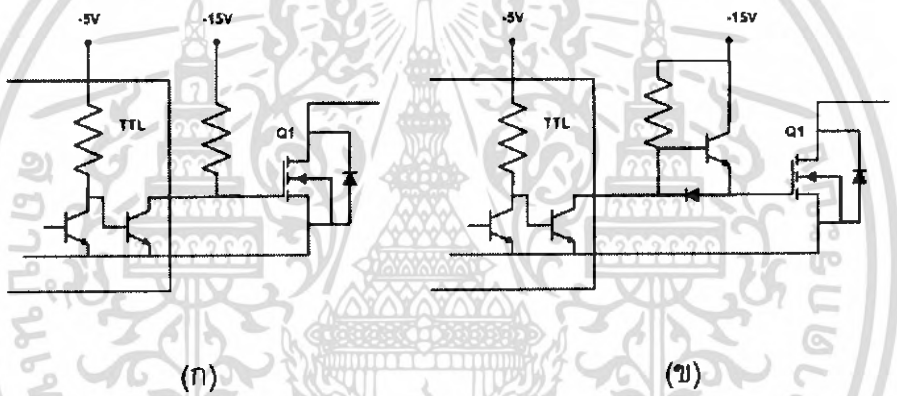
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟต

การขับเพาเวอร์มอสเฟต ให้นำกระแสนั้นแตกต่างจากขับกระแสไบแอส ในเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ สำหรับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กระแสจะไหลผ่านคอลเล็กเตอร์และอีมิตเตอร์ได้ก็ต่อเมื่อมีกระแสไบแอสไหลผ่านที่เบสและอีมิตเตอร์ แต่เพาเวอร์มอสเฟตจะมีกระแสไหลผ่านเดรนและซอร์สได้ก็ต่อเมื่อแรงดันตกคร่อมที่ขาเกตและซอร์สมีค่าอย่างต่ำเท่ากับค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) แต่ใช้กระแสต่ำ การขับเพาเวอร์มอสเฟต ให้นำกระแสจึงทำได้ง่ายและยุ่งยากน้อยกว่าเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มาก

3.9.1 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วย TTL

การขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วย ไอซี TTL โดยตรงนั้นสามารถทำได้แต่ไอซี TTL มีขีดจำกัดในการจ่ายกระแสและรับกระแสที่เอาท์พุต ซึ่งมีผลต่อความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์มอสเฟตและทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียสูงได้ การต่อวงจรขับชนิดนี้จึงจำเป็นต้องเพิ่มตัวอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อช่วยในการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์มอสเฟตเป็นไปอย่างรวดเร็ว



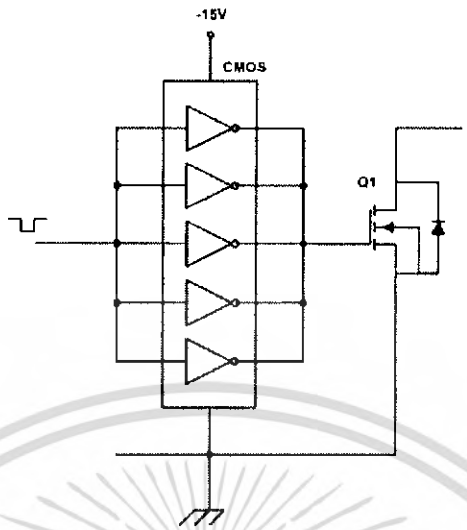
รูปที่ 3.23 แสดงการขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยไอซี TTL

รูปที่ 3.23 (ก) แสดงวงจรขับด้วยไอซี TTL ที่มีเอาท์พุทเป็นแบบคอลเล็กเตอร์เปิด การต่อพูลอัพรีซิสเตอร์เข้าช่วย เพื่อให้มีแรงดันสูงพอที่จะขับเพาเวอร์มอสเฟตให้ทำงานและการหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตเป็นไปได้เร็วขึ้นแต่ความเร็วขณะเริ่มนำกระแสยังมีค่าจำกัดอยู่เนื่องจากกระแสยังถูกจำกัดด้วยพูลอัพรีซิสเตอร์

รูปที่3.23 (ข) ทรานซิสเตอร์จะช่วยในการจ่ายกระแสได้มากขึ้นทำให้ความเร็วในการนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตดีขึ้น และลดกำลังสูญเสียในตัว ไอซี TTL ด้วยและวงจรขับจะเพิ่มทรานซิสเตอร์เข้ามาอีกหนึ่งตัวเพื่อให้การคายประจุที่ขาเกตเป็นไออย่างรวดเร็วและทำให้ความเร็วขณะเริ่มหยุดนำกระแสเป็นไปได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

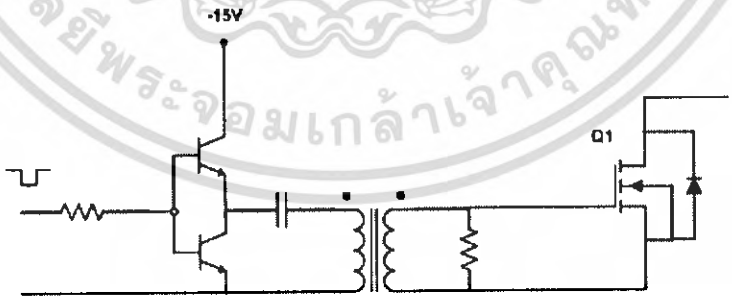
3.9.2 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยไอซี CMOS



รูปที่ 3.24 แสดงการขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยไอซี CMOS

เพาเวอร์มอสเฟตสามารถต่อโดยตรงเข้ากับไอซี CMOS ได้ในส่วนเอาท์พุทของไอซี COMS จะเป็นเฟตด่อกันในลักษณะคอมพลีเมนตารี ซึ่งสามารถทำงานได้ที่เรงดันไฟเลี้ยงตั้งแต่ 3 ถึง 8 โวลต์ โดยทั่วไปจะใช้ 12 ถึง 15 โวลต์ เพื่อให้เหมาะสมการขับเพาเวอร์มอสเฟต สำหรับการขับเพาเวอร์มอสเฟตที่ต้องนำกระแสสูงๆ การต่อ CMOS ในลักษณะขนานกันจะสามารถเพิ่มกระแสที่ขาเกต และทำให้ความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์มอสเฟตเป็นไปได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

3.9.3 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยหม้อแปลง



รูปที่ 3.25 แสดงวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยหม้อแปลง

ในกรณีของคอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์และฟลูบริดจ์ วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟสตัวบนตัวล่างจะต้องมีการแยกกราวด์ออกจากกัน จึง จำเป็นต้องให้หม้อแปลงหรือในกรณีที่ตอังการขับเพาเวอร์มอสเฟตมากกว่า 1 ตัว พร้อมกันก็จากต้องใช้หม้อแปลงช่วย การต่อหม้อแปลงพัลซ์

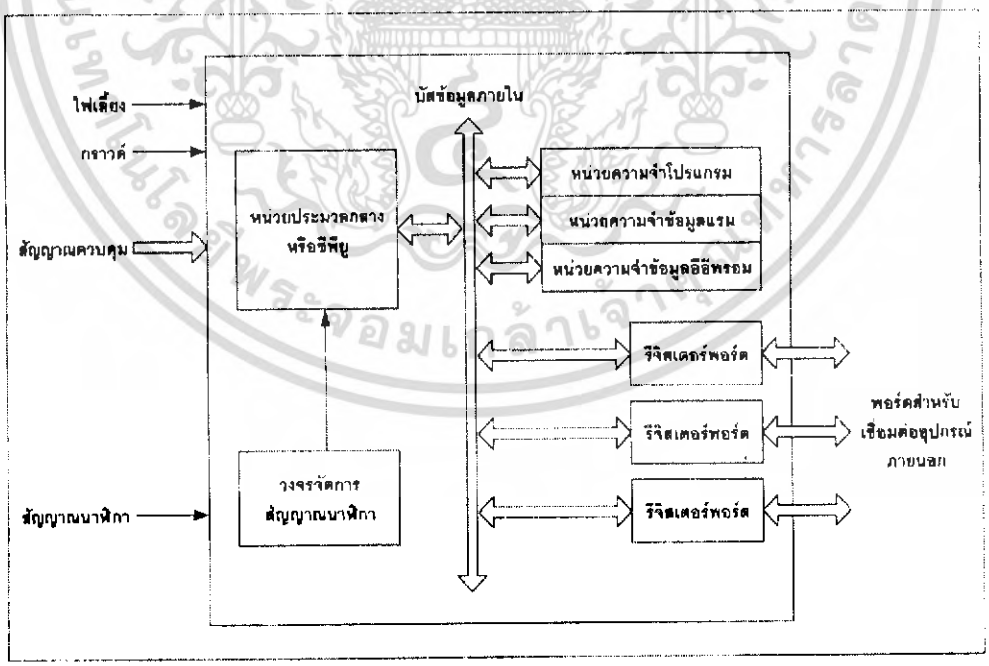
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ากับขาเกตและวงจรควบคุมโดยตรงอาจเกิดปัญหาการเลื่อนระดับของแรงดันเอาท์พุทที่หม้อแปลง และอาจมีปัญหาในการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟตได้ การต่อวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยหม้อแฟลงจึงวงควรทำในลักษณะดังรูปที่ 3.25

3.10 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) มาจากคำ 2 คำ คำหนึ่งคือ ไมโคร (micro) หมายถึง ขนาดเก และคำว่า คอนโทรลเลอร์ (Controller) หมายถึง ตัวควบคุมหรืออุปกรณ์ควบคุม ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ จึงหมายถึง อุปกรณ์ขนาดเล็ก แต่ในตัวอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กนี้ได้บรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ที่คนโดยส่วนใหญ่คุ้นเคย กล่าวคือ ภายในตัวของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู, หน่วยความจำและพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยได้บรรจุรวมกันอยู่ภายในตัวถังเดียวกัน ดังในรูปที่ 3.26 ซึ่งแสดงส่วนประกอบหลักที่สำคัญและกลไกการทำงานเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์

ซีพียูจะติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมเพื่ออ่านคำสั่งที่ระบุไว้ โดยจะต้องทำการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำผ่านสายสัญญาณที่เรียกว่า บัสแอดเดรส (Address bus) แล้วทำการอ่านข้อมูลคำสั่งออกมาจากหน่วยความจำโปรแกรมในแอดเดรสนั้นๆ หลังจากนั้นก็ทำการประมวลผล โดยมีหน่วยความจำข้อมูลแรมเป็นที่พักของข้อมูลที่อยู่ในระหว่างการประมวลผล หรืออาจมองว่าหน่วยความจำข้อมูลแรม



รูปที่ 3.26 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบหลักเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเสมือนกระดาษทดในการคำนวณก็ได้ ข้อมูลในการประมวลผลนั้นจะถูกส่งผ่านสายสัญญาณที่เรียกว่า บัสข้อมูล (Data Bus) แล้วส่งต่อไปยัง อุปกรณ์ภายนอกผ่านทางขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุต

3.10.1 การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถทำงานได้เมื่อจ่ายไฟเลี้ยงและต่อวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาให้แก่มัน จากนั้นซีพียูภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ จะติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมเพื่ออ่านข้อมูลคำสั่งแล้วทำงานตามคำสั่งที่บรรจุอยู่ในหน่วยความจำโปรแกรมนั่นหมายความว่าต้องมีการเขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำโปรแกรมก่อน โดยไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละเบอร์ก็จะมีรูปแบบของข้อมูลคำสั่งที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจะต้องอาศัยกระบวนการเขียนโปรแกรม (Programming) ภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมสามารถแบ่งได้ 2 ระดับคือ ภาษาสูง (High language) และภาษาแอสเซมบลี (Assembly language) โดยปกติไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาแอสเซมบลี เพราะเนื่องจากสามารถทำงานได้รวดเร็วผ่านกระบวนการแปลงข้อมูลคำสั่งเป็นข้อมูลเลขฐานสิบหกเพื่อทำงานตามคำสั่งเพียง 1 ขั้นตอนคือแปลงจากภาษาแอสเซมบลีเป็นข้อมูลเลขฐานสิบหก หรือที่เรียกว่า ออปโค้ด (Op-code) แต่ข้อเสียของการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาแอสเซมบลีคือ ผู้เขียนต้องทำความเข้าใจในชุดคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ในเบอร์นั้นๆ อย่างถ่องแท้ และเมื่อเปลี่ยนเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็ต้องทำการเรียนรู้และทำความเข้าใจชุดคำสั่งใหม่ ซึ่งอาจทำให้เสียเวลามาก และการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาแอสเซมบลี ผู้เขียนต้องมีทักษะในการเขียนโปรแกรมสูงพอสมควร และเข้าใจถึงสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอย่างดี

ในขณะที่การเขียนโปรแกรมด้วยภาษาสูง ตัวอย่างเช่น ภาษาซี ภาษาเบสิก จะต้องผ่านกระบวนการที่เรียกว่า คอมไพล์ (Compile) เพื่อแปลงภาษาระดับสูงเหล่านั้นเป็นภาษาเครื่องหรือออปโค้ดของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นั้นๆ เสียก่อนและโปรแกรมที่ใช้ในการคอมไพล์นั้นเรียกว่า คอมไพเลอร์ (complier) มักจะมีราคาแพง เมื่อใช้เครื่องมือทางซอฟต์แวร์ตัวนี้ ทำให้ผู้เขียนโปรแกรมอาจไม่จำเป็นต้องศึกษาสถาปัตยกรรมและชุดคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นั้นๆ อย่างลึกซึ้งเท่ากับการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาแอสเซมบลี ทั้งนี้เพราะคอมไพเลอร์จะทำหน้าที่ในส่วนนี้แทน ดังนั้นเมื่อผู้ใช้งานเปลี่ยนเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็เพียงแต่จัดหาโปรแกรมคอมไพเลอร์ที่เหมาะสมมาใช้งาน และศึกษาสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ใหม่อีกเพียงเล็กน้อยก็สามารถใช้งานได้ แต่ข้อเสียของการใช้คอมไพเลอร์คือ ราคาแพงมาก

3.10.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ 16F628

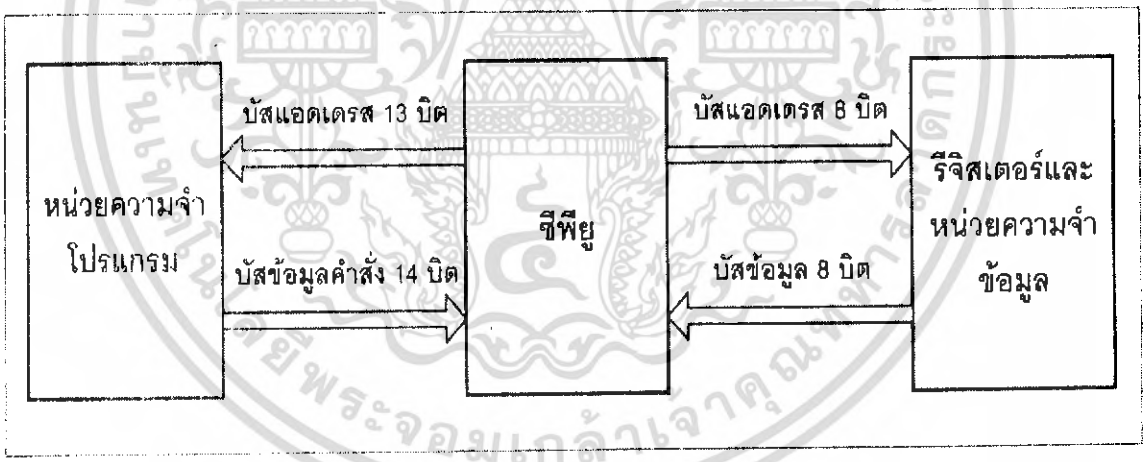
ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีสถาปัตยกรรมแบบฮาร์วาร์ด (Harvard Architecture) กล่าวคือ มีการจัดแยกหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลออกจากกัน มีบัสสำหรับติดต่อแยกกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.27 จะเห็นได้ว่าซีพียูภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะติดต่อหน่วยความจำโปรแกรมด้วยบัสของแอดเดรส 13 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และบัสของข้อมูลหน่วยความจำโปรแกรม 14 บิต ในขณะที่บัสติดต่อหน่วยความจำข้อมูลและรีจิสเตอร์ภายในเป็นแบบ 8 บิต

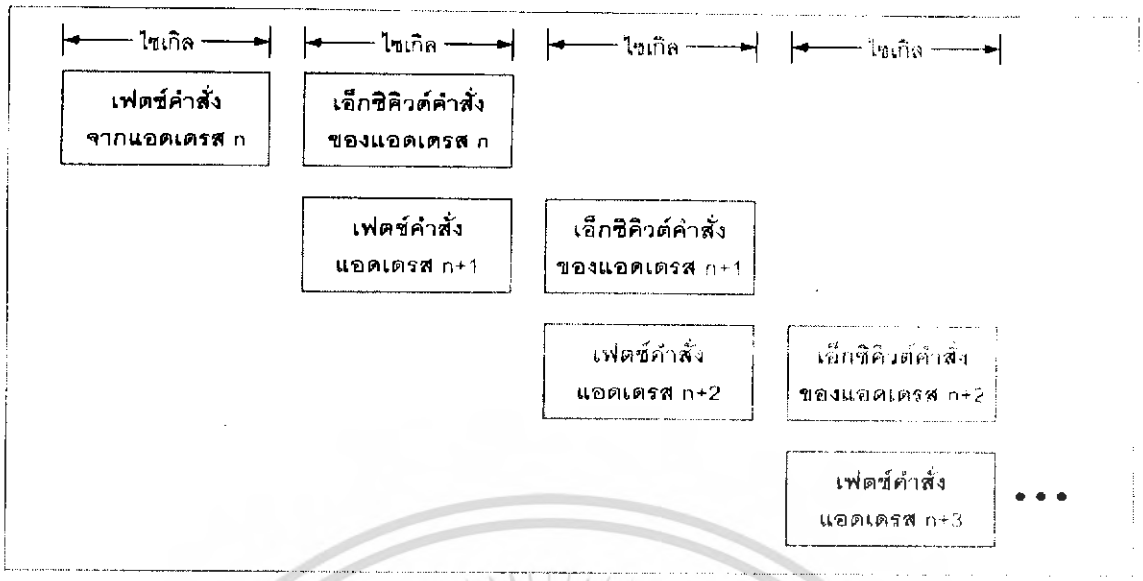
นอกจากการจัดสถาปัตยกรรมภายในแบบนี้แล้ว การกระทำคำสั่งทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ยังใช้กระบวนการที่เรียกว่า ไปป์ไลน์ (Pipeline) ทำให้สามารถเฟตช์คำสั่งถัดไป ในขณะที่กำลังเอ็กซิคิวต์คำสั่งในปัจจุบัน ส่งผลให้ความเร็วในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอรีเพิ่มมากขึ้น นั้นจึงเป็นที่มา ของความสามารถในการกระทำคำสั่ง 1 คำสั่งภายในสัญญาณนาฬิกา 1 ลูก (กระบวนการเฟตช์) เป็นกระบวนการเรียกคำสั่งออกจากหน่วความจำโปรแกรมแล้วทำการแปลคำสั่งนั้นให้ไปอยู่ในรหัสเลขฐาน 16 เพื่อทำให้ซีพียูเข้าใจ ส่วนกระบวนการเอ็กซิคิวต์ (Execute) เป็นการกระทำคำสั่งให้เกิดผลลัพธ์ตามที่คำสั่งนั้นๆกำหนด) สำหรับกระบวนการไปป์ไลน์แสดงดังในรูปที่ 3.28

เมื่อเริ่มต้นกระทำคำสั่งที่ 1 ซีพียูจะเฟตช์คำสั่งจากหน่วยความจำโปรแกรมที่แอดเดรส n จากนั้นทำการเอ็กซิคิวต์ในไซเกิลต่อมา และที่ไซเกิลของการเอ็กซิคิวต์คำสั่งที่แอดเดรส n นั้น ซีพียูก็จะเริ่มต้นเฟตช์คำสั่งจากแอดเดรส n+1 ทันที เมื่อเอ็กซิคิวต์คำสั่งที่แอดเดรส n เรียบร้อย ซีพียูก็จะสามารถเอ็กซิคิวต์คำสั่งแอดเดรส n+1 ต่อเนื่องกันไปได้ในทันที และในทำนองเดียวกัน ขณะที่กำลังเอ็กซิคิวต์คำสั่งแอดเดรส n+1 ซีพียูก็จะดำเนินการเฟตช์คำสั่งที่แอดเดรส n+2 ต่อไป

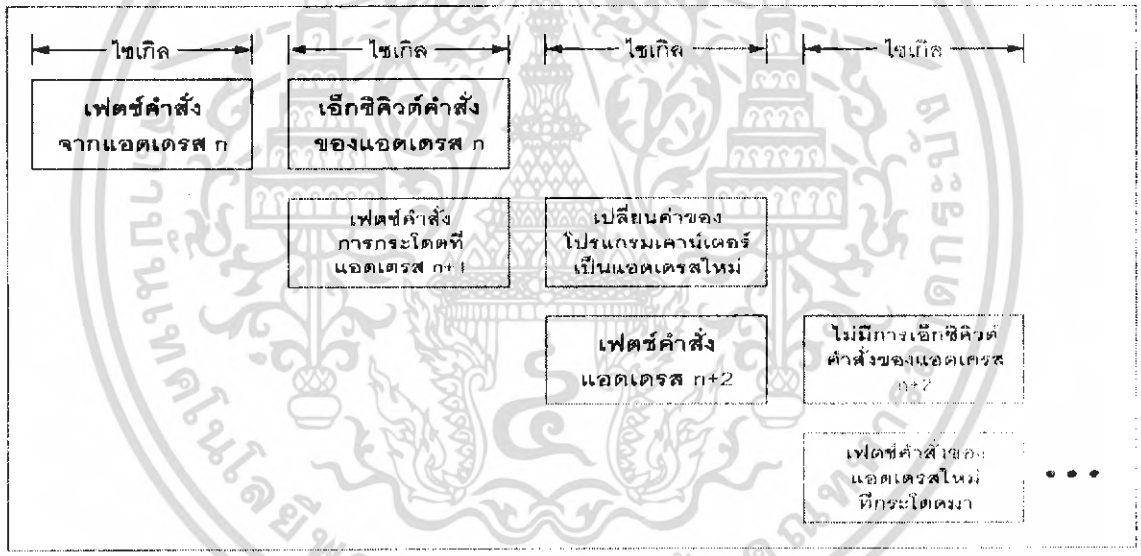


รูปที่ 3.27 ไดอะแกรมการทำงานพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์
ที่ใช้สถาปัตยกรรมแบบฮาร์วาร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 แสดงไดอะแกรมของกระบวนการไปป์ไลน์ที่ใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC



รูปที่ 3.29 แสดงไดอะแกรมของกระบวนการไปป์ไลน์เมื่อกระทำคำสั่งการกระโดด

แต่ถ้าคำสั่งที่กระทำนั้นเป็นคำสั่งการกระโดด จะมีขั้นตอนที่เพิ่มขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 3.29 เมื่อทำการเอ็กซิคิวต์คำสั่งที่แอดเดรส n ซีพียูก็จะทำการเฟตช์คำสั่งที่แอดเดรส n+1 ปรากฏว่าคำสั่งที่แอดเดรส n+1 นั้นเป็นคำสั่งการกระโดด ดังนั้นในไซเกิลถัดไปจึงยังไม่เกิดการเอ็กซิคิวต์ในทันที แต่จะเป็นการเปลี่ยนค่าของโปรแกรมเคาน์เตอร์ (PC : Program Counter) ซึ่งเป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้ในการระบุแอดเดรสสถัดไปที่ซีพียูจะไปทำงาน ทำให้เกิดการกระโดดไปยังแอดเดรสใหม่ ในระหว่างที่เกิดการกระโดดไปยังแอดเดรสใหม่นั้น ซีพียูจะทำการเฟตช์คำสั่งที่แอดเดรส n+2 ต่อไปตามขั้นตอนปกติแต่ทว่าเมื่อการกระโดดสิ้นสุดลง แอดเดรส

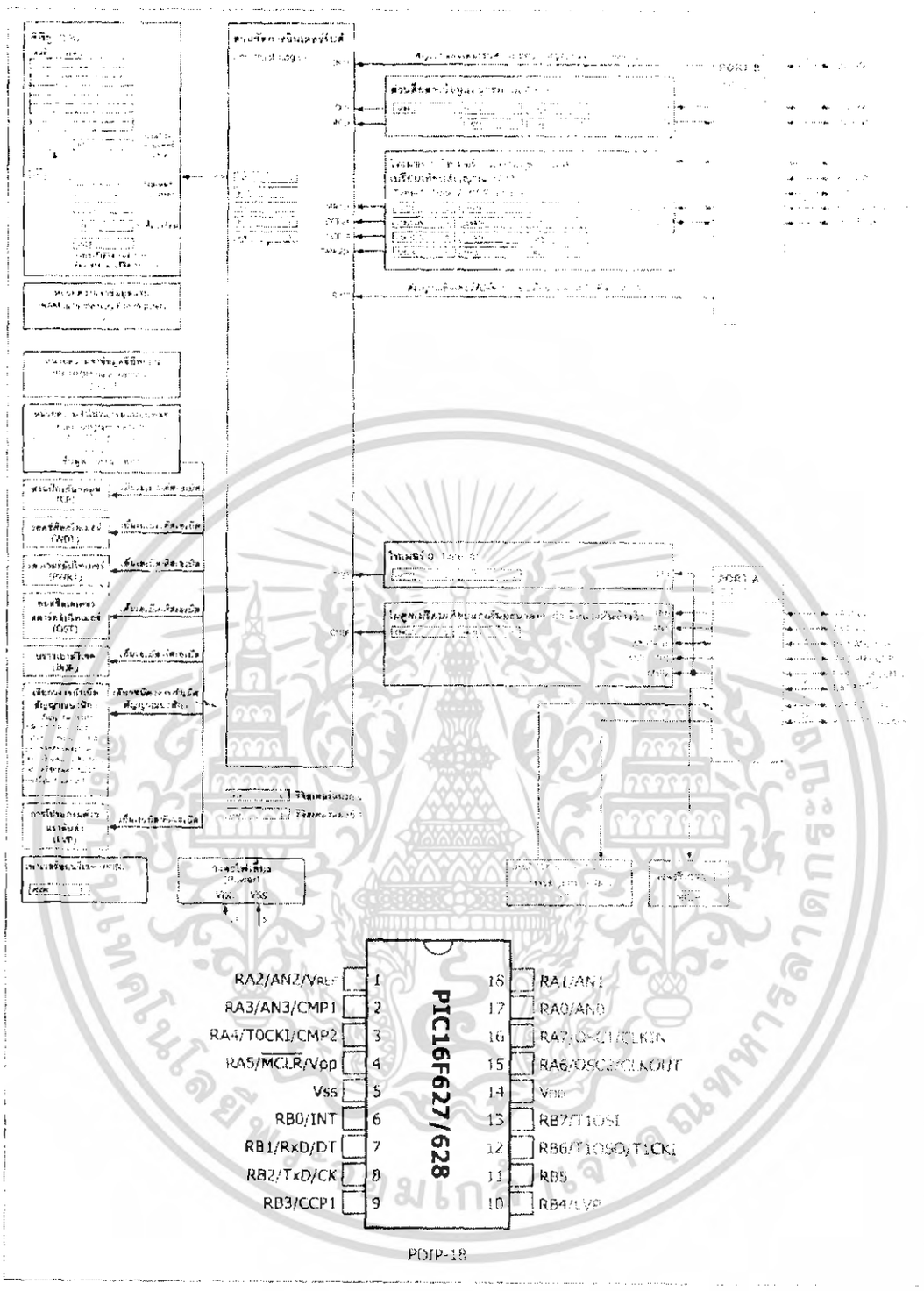
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการทำงานเปลี่ยนไป จึงไม่เกิดการเอ็กซิคิวต์คำสั่งที่แอดเดรส n+2 แต่จะเกิดการเฟตช์คำสั่งที่แอดเดรสใหม่กระโดดมาแทน จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการทำงานตามปกติต่อไป ดังนั้นคำสั่งการกระโดด จึงต้องใช้ขนาดของหน่วยความจำมากกว่า 1 ไบต์ ส่งผลให้ต้องใช้สัญญาณนาฬิกาในการกระทำคำสั่งในกลุ่มนี้ 2 ลูก ซึ่งแตกต่างจากคำสั่งอื่นๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ที่ใช้สัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ลูก

3.10.3 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F628

แสดงดังในรูปที่ 3.30 ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักก็จะเหมือนกับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F628 แต่จะมีส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามามากพอควร ได้แก่ วงจรบราวเอาต์รีเซต (Brown-out reset) สำหรับสร้างสัญญาณรีเซตซีพียูเมื่อไฟเลี้ยงลดต่ำลงเกินกว่าที่กำหนด, วงจรโปรแกรมข้อมูลด้วยแรงงดันต่ำ (*Low-Voltage Programming*), ไทเมอร์ที่มีมากถึง 3 ตัว, โมดูลแรงดันเปรียบเทียบ (Reference Voltage Module), โมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาลอก 2 ชุด (Analog Comparator), วงจรสื่อสารอนุกรม (USART : Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) และโมดูลตรวจจับสัญญาณ-เปรียบเทียบข้อมูล-วงจรสร้างสัญญาณมอดูเลชั่นทางความกว้างของพัลส์หรือ PWM (CCP : *Capture Compare Pulse-width modulation module*) นอกจากนั้นขนาดของหน่วยความจำทั้งส่วนโปรแกรม, ข้อมูล, รีจิสเตอร์ และหน่วยความจำอีอีพรอมในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F628 ก็มีเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 ไดอะแกรมโครงสร้างการทำงานและการจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F628

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10.4 คุณสมบัติทางเทคนิคของ PIC16F62X

1. ซีพียูเป็นแบบ RISC (Reduce Instruction-Set Computer) มีคำสั่งใช้งานเพียง 35 คำสั่ง ความถี่สัญญาณนาฬิกา ตั้งแต่ไฟตรงถึง 20 เมกกะเฮิร์ท (สูงสุด)
2. ขนาดหน่วยความจำโปรแกรม 1 กิโลวัดต์ สำหรับ PIC16F627 และ 2 กิโลวัดต์ สำหรับ PIC16F628
3. หน่วยความจำแรมข้อมูล 224 ไบต์
4. หน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอม 128 ไบต์
5. ตอบสนองแหล่งกำเนิดอินเตอร์รัปต์ได้ 10 แหล่ง
6. มีสแต็ก 8 ระดับ
7. มีวงจรเพาเวอร์ออนรีเซต (POR), เพาเวอร์อัปไทเมอร์ (PWRT) และออสซิลเลเตอร์สตาร์ตอัปไทเมอร์ (OST)
8. มีวอตช์ด็อกไทเมอร์ (WDT) ที่มีวงจรออสซิลเลเตอร์ในตัว ทำให้มีความน่าเชื่อถือในการทำงานสูง
9. เลือกป้องกันข้อมูลทั้งในหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูล และเลือกระดับการป้องกันได้
10. เลือกใช้วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาได้ 6 โหมดหลัก
    a. โหมด EC ใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก
    b. โหมด ER ใช้ตัวต้านทานภายนอก
    c. โหมด INTRC ใช้วงจร RC ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์มี 2 ความถี่ให้เลือก
    d. โหมด LP ใช้คริสตอลพลังงานต่ำ ความถี่สูงสุดไม่เกิน 200 กิโลเฮิร์ท
    e. โหมด XT ใช้คริสตอล ความถี่ตั้งแต่ 100 กิโลเฮิร์ท สูงสุดไม่เกิน 4 เมกกะเฮิร์ท
    f. โหมด HS ใช้คริสตอลความถี่สูง สูงสุดไม่เกิน 20 เมกกะเฮิร์ท (ต้องใช้กับรุ่นที่รองรับความถี่ 20 เมกกะเฮิร์ทด้วย)
11. สามารถโปรแกรมในวงจรได้
12. กระแสซิงก์และซอร์สของพอร์ต 25 มิลลิแอมป์
13. สามารถโปรแกรมโดยใช้แรงดัน +5 โวลต์ ได้
14. ไฟเลี้ยง +3 ถึง +5.5 โวลต์
15. ขาพอร์ตปกติ 15 บิต สูงสุด 16 บิต เมื่อทำงานในโหมด INTRC และกำหนดให้ MCLR เป็นพอร์ตอินพุต
16. ไทเมอร์ 3 ตัว (ไทเมอร์ 0, 1, 2)
17. มีโมดูล CCP (Capture/Compare/PWM) 1 ชุด
18. มีโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาลอก 2 ชุด
19. มีโมดูลสร้างแรงดันอ้างอิง
20. มีโมดูลสื่อสารข้อมูลอนุกรม USART

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21. มีโมดูลตรวจจับระดับแรงดันไฟเลี้ยงหรือบราวเอาต์ดีเท็กชั่น (Brown-out Detection) เพื่อสร้างสัญญาณรีเซตซีพียูหรือเรียกว่า บราวเอาต์รีเซต (Brown-out reset :BOR)
22. การใช้พลังงานไฟฟ้าในกรณีไม่ขับโหลด
23. น้อยกว่า 2 มิลลิแอมป์ ที่ +5 โวลต์ และสัญญาณนาฬิกา 4 เมกกะเฮิร์ท 15 ไมโครแอมป์ ที่ +3 โวลต์ และสัญญาณนาฬิกา 32 กิโลเฮิร์ท
24. น้อยกว่า 1 ไมโครแอมป์ ในโหลดประหยัดพลังงานหรือสแตนด์บายที่ไฟเลี้ยง

3.11 หัวคบพลาสมา (Torch)

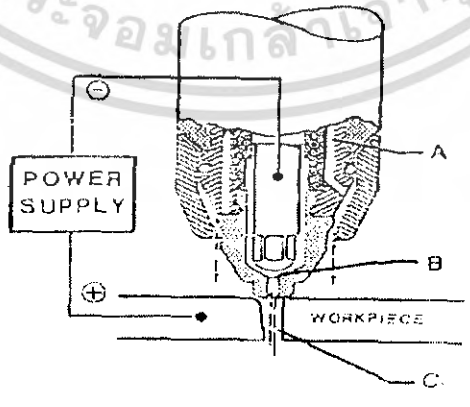
วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในดันกำเนิดอาร์คพลาสมามี 3 ชนิด คือ ทังสเตน ทองแดง และแกรไฟต์

ทังสเตน

ตามปกติแล้วจะใช้ทังสเตนเป็นขั้วไฟฟ้าลบ ทังสเตนที่ใช้จะเป็นโลหะบริสุทธิ์ หรือจะมีทอเรียมหรือเซอร์โคเนียปนอยู่ด้วย เหตุที่ใช้ทังสเตนเป็นขั้วไฟฟ้า เพราะทังสเตนมีคุณสมบัติให้อิเล็กตรอนเมื่อได้รับความร้อน (Thermionic Emission) ได้ง่ายและมีจุดหลอมตัวสูง

ทองแดง

ตามปกติจะใช้ทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้าบวก โดยจะนิยมใช้เนื่องจาก นำความร้อน และนำไฟฟ้าได้ดี ของเสียของทองแดงคือมีจุดหลอมตัวต่ำ การใช้ทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้าจึงต้องมีการระบายความร้อนได้เพียงพอ หรือมีกลไกมาหมุนตรงบริเวณที่รอรับอาร์ค เพื่อกระจายความร้อนมิให้ได้รับมากเกินไปจนเกิดหลอมละลายได้ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ไม่สูงมากนัก ถ้ากำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก จะใช้ก๊าซที่นำมาทำเป็นพลาสมาก๊าซ การออกแบบลักษณะขั้วไฟฟ้ามีความสำคัญมากในงานดันกำเนิดพลาสมา เนื่องจากการออกแบบที่ไม่เหมาะสม จะทำให้เกิดอาร์คไม่ทั่วถึง เป็นผลให้พลาสมาที่เกิดขึ้นไม่เสถียรภาพ โดยปกติจะออกแบบให้ขั้วไฟฟ้าด้านหนึ่งมีลักษณะเป็นแท่ง อีกด้านหนึ่งเป็นวงแหวน หรือรูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.31



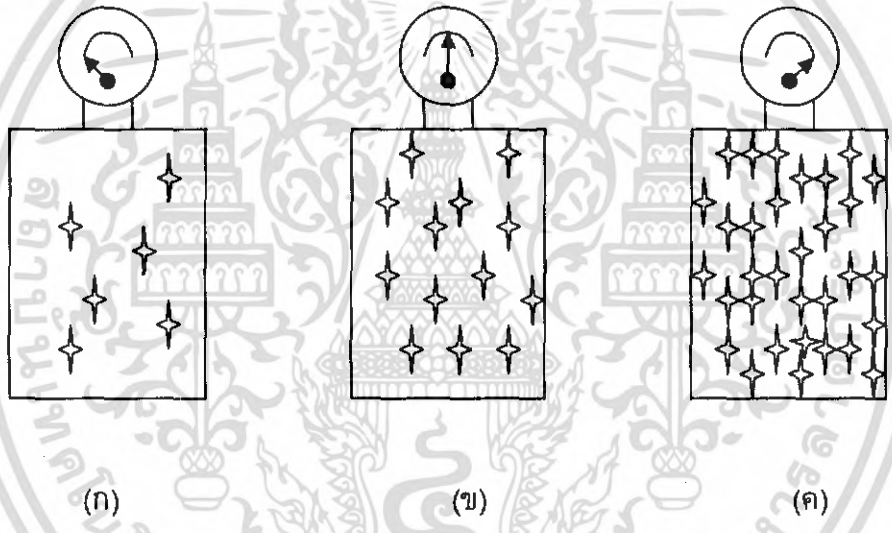
รูปที่ 3.31 แสดงหัวคบพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสมาก๊าซจะผ่านเข้ามารอบๆ ขั้วไฟฟ้าผ่านอาร์ค แล้วพุ่งผ่านรูขั้วไฟฟ้า ที่เจาะไว้ออกไปด้านนอก Zone A เพื่อเป็นการระบายความร้อนออกจากคบพลาสมา อีกส่วนหนึ่งจะผ่านบริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งสอง Zone B ใน Zone C นั้นเป็น Zone ที่ก๊าซถูกเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมาโดยสมบูรณ์ และอุณหภูมิที่สูงของพลาสมาที่เกิดขึ้นได้ถูกส่งผ่านไปยังชิ้นงาน

3.12 เครื่องอัดอากาศ (Air compressor)

เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) จะทำหน้าที่ผลิตลม เพื่อที่จะนำมาใช้เป็นพลาสมาก๊าซ โดยจะเพิ่มความดันของอากาศ หรือก๊าซให้สูงขึ้น โดยที่ความดันของก๊าซ จะมีผลโดยตรงกับอุณหภูมิของก๊าซ นั่นคือ เมื่อความดันของก๊าซเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของก๊าซก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เราสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 แสดงโมเลกุลและความดันของก๊าซ

จากรูปที่ (ก) แสดงภาพของโมเลกุลในบรรยากาศ โมเลกุลเคลื่อนที่แต่ความเร็วไม่ถึงดังนั้นแรงกระแทกผนังจึงน้อยเข็มความดันจึงขึ้นน้อย

จากรูปที่ (ข) แสดงภาพของโมเลกุลในบรรยากาศเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลจะเคลื่อนที่รวดเร็วขึ้น จึงทำให้แรงกระแทกสูงขึ้น เข็มความดันจึงสูงขึ้น และถ้าเปิดภาชนะโมเลกุลก็จะออกมาจากภาชนะ

จากรูปที่ (ค) ก๊าซถูกอัด ความหนาแน่นสูงขึ้น ทำให้เกิดแรงกระแทกสูงกระทำกับฝาผนัง มีผลทำให้ความดันสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศ ก่อนที่จะถูกอัดเครื่องอัดอากาศนั้นจะประกอบด้วย 1 ส่วนออกซิเจน และ 4 ส่วนไนโตรเจนโดยปริมาตร ซึ่งรายละเอียดขององค์ประกอบของอากาศแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงองค์ประกอบของอากาศ

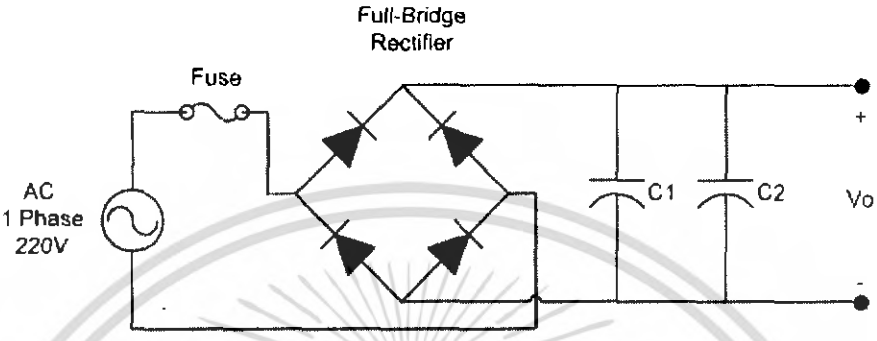
องค์ประกอบของอากาศ	ไนโตรเจน (N_2)	ออกซิเจน (O_2)	อาร์กอน (A_r)	คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	ไอน้ำ ฝุ่น น้ำมัน ฯลฯ
ร้อยละโดยปริมาตร (%)	79.09	20.95	0.93	0.03	มีบ้าง
ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	75.53	23.14	1.28	0.05	มีบ้าง

ถ้าคิดอย่างละเอียดแล้วจะพบว่า อากาศเป็นก๊าซผสมซึ่งประกอบด้วย ไนโตรเจน ออกซิเจนและก๊าซเฉื่อย ดังนั้นจากการศึกษา พบว่าอากาศที่ผ่านการอัดด้วยเครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) มีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่เราจะนำมาเป็น พลาสมาก๊าซ สำหรับเป็นต้นกำเนิดความร้อน และสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้พลาสมาก๊าซจากเครื่องอัดอากาศที่ความดันประมาณ 3.1 – 6.5 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่ง

4.1 วงจรเรียงกระแสและกรองกระแส



รูปที่ 4.1 วงจรเรียงกระแสความถี่ต่ำและฟิวส์

4.1.1 การเลือกฟิวส์

เนื่องจากการเลือกใช้งานมอสเฟต IRFP460 ที่มีขนาดทนแรงดัน 500 โวลต์ และทนกระแสสูงสุดได้ 20 แอมป์ แต่เมื่อนำมาใช้งานจริงที่สภาวะอุณหภูมิที่สูงขึ้นก็จะทำให้กระแสพิกัดของมอสเฟตลดลงดังนั้นจะต้องนำอุณหภูมิที่ใช้งานไปหาค่ากระแสจากกราฟคุณสมบัติของมอสเฟตดังรูปที่ 4.2

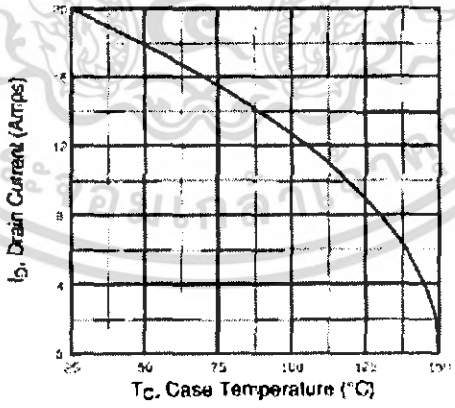


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสพิกัดและอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำมอสเฟตมาใช้งานจะเลือกใช้ที่อุณหภูมิประมาณ $60^{\circ}C$ ดังนั้นกระแสพิกัดของมอสเฟตจะเป็น 15 แอมป์ และเมื่อนำมอสเฟตมาต่อขนานกันจะได้กระแสพิกัดที่ 30 แอมป์ ดังนั้นเราจะเลือกใช้ฟิวส์ที่มีขนาด 30 แอมป์

4.1.2 การเลือกขนาดของไดโอดเรียงกระแสแบบฟลูบริดจ์

การเลือกไดโอดเรียงกระแสนั้นจะต้องคำนึงถึงขนาดกระแสพิกัดที่ไหลผ่านไดโอด โดยจะคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$I_e \approx \frac{P_{in}}{V_{in}}$$

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า = 220 โวลต์

ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (V_m) = 220×1.414 โวลต์

= 310 โวลต์

แรงดันกระเพื่อม (V_r) = 0.10×310 โวลต์

= 31 โวลต์

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฉลี่ย = แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุด – ($\frac{V_r}{2}$) โวลต์

= 310 – (31/2) โวลต์

= 294.5 โวลต์

เมื่อ P_{in} = 4,000 วัตต์, V_{in} = 294.5 โวลต์

ดังนั้น I_e = กำลังไฟฟ้าด้านเข้าสูงสุด / แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฉลี่ย

= 4,000 / 294.5

= 13.5 แอมป์

4.1.3 การคำนวณหาตัวเก็บประจุ

การคำนวณค่าความจุไฟฟ้า C คำนวณได้ดังนี้

สำหรับข้อกำหนดของแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่ง สำหรับเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมามีกำลังไฟฟ้าด้านเข้าประมาณ 4,000 วัตต์ ดังนั้น ค่าตัวเก็บประจุ C หาได้จากสมการที่ 3.3

$$C = \frac{I_e \Delta t}{\Delta V_{ripple}}$$

โดยที่ I_e = 13.5 แอมป์

เวลา t ≈ 1/2 ของคาบเวลาไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ไฟกระแสสลับ 50 Hz, คาบเวลา 20 มิลลิวินาที)

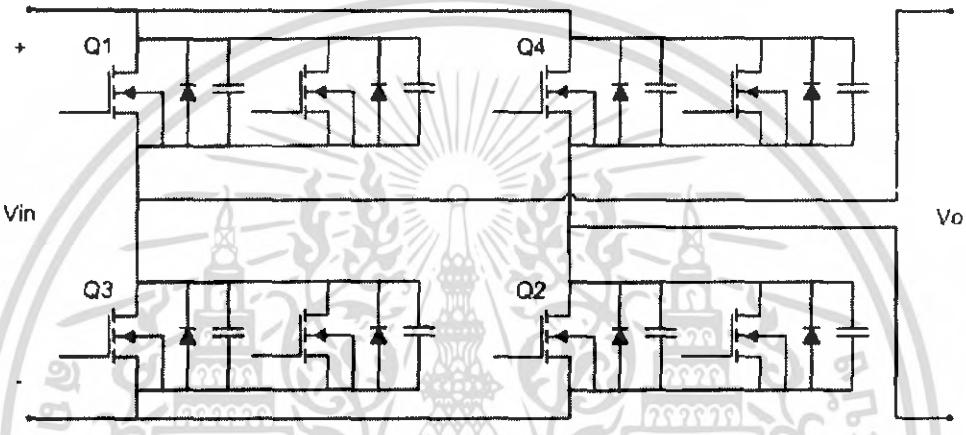
≈ 10 มิลลิวินาที

ดังนั้นค่า C ที่ต้องการคือ = 13.5×0.01 / 31

= 4,355 ไมโครฟารัด

สำหรับคาปาซิเตอร์ที่เลือกใช้จะเป็นแบบอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งต้องมีขนาดความจุรวม 4,500 ไมโครฟารัด โดยในที่นี้จะเลือกเป็น C1, C2 ≈ 2,500 ไมโครฟารัด 450 โวลต์

4.2 วงจรฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.3 วงจรฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

การหาขนาดของสวิตซ์

ขนาดของแรงดันสูงสุดคร่อมสวิตซ์ ที่ใช้ในวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ จะมีค่าไม่เกิน 310 โวลต์ สำหรับกรณีแรงดันจากแหล่งจ่ายเป็น 220 โวลต์ และสามารถหาขนาดของสวิตซ์ได้โดยใช้สมการ

ขนาดแรงดันของสวิตซ์มอสเฟสกำลัง = $220\times\sqrt{2}$ = 310 โวลต์

และจากสมการที่ 3.4

$$I_p = \frac{P_{in}}{T_d V_{in}}$$

โดยที่ P_{in} = 4,000 วัตต์, T_d = 0.8, V_{in} = 310 โวลต์

ดังนั้น I_p = 4,000 / (0.8×310)

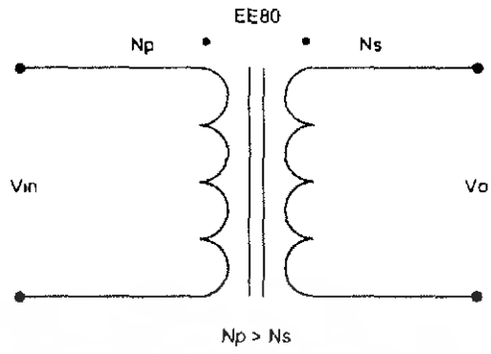
= 16 แอมป์

ทำการเลือกมอสเฟตที่ทนกระแสพิกัด 20 แอมป์ และทนแรงดัน 310 โวลต์

จะได้มอสเฟต IRFP 460 ขนานกัน 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 หม้อแปลงสวิตชิ่งความถี่สูง



รูปที่ 4.4 หม้อแปลงความถี่สูงแบบแกน EE80

ขั้นตอนการออกแบบการคำนวณหม้อแปลงสวิตชิ่งความถี่สูง

1. ข้อกำหนดการออกแบบหม้อแปลง

1.	แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า	310 ± 15%	โวลต์
2.	ความถี่ที่ใช้งาน	40	กิโลเฮิร์ท
3.	แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่พิกัด	100	โวลต์
4.	กำลังไฟฟ้าด้านออกที่พิกัด	4000	วัตต์
5.	กระแสไฟฟ้าด้านออกที่พิกัด	40	แอมป์

2. คำนวณหาขนาดของแกนแม่เหล็ก

การเลือกหรือกำหนดขนาดแกนแม่เหล็กมีวิธีการคำนวณ 2 วิธี

1. Area Product Ap Approach
2. Core Geometry Kg Approaach

ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะในกรณี Area Product Ap Approach เพราะเป็นวิธีที่ง่าย เหมาะสำหรับกับบุคคลที่กำลังเริ่มศึกษาที่ยังไม่มีประสบการณ์

2.1 การออกแบบโดยใช้วิธีการคำนวณแบบ Ap Approach

1. คำนวณหาค่า Area Product ซึ่งเป็นการหาค่าผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (S) กับพื้นที่ของช่องหน้าต่าง (W) ดังสมการที่ 4.1

$$A_p = W \cdot S = \frac{P_{out}}{2 \cdot k \cdot B_{max} \cdot f \cdot J} \qquad (4.1)$$

เมื่อ k คือ ขีดจำกัดของหน้าต่าง มีค่าในช่วง 0.3 - 0.6

B_{max} คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งค่า B_{max} จะขึ้นกับชนิดของแกนแม่เหล็กในแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f คือ ความถี่ในการใช้งาน

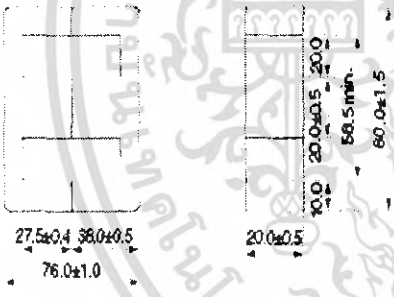
J คือ ค่าความหนาแน่นกระแสในสายตัวนำทองแดง ($J_{rms} = \frac{I_{rms}}{A}$) โดยวิธีนี้เป็นการออกแบบที่ใช้อุณหภูมิเพิ่ม (T_{rise}) ซึ่งอยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแสในสายตัวนำทองแดง J = 3 - 5 $\frac{A}{mm^2}$

ดังนั้น $$A_p = W \cdot S = \frac{4000}{2 \cdot 0.6 \cdot 0.25 \cdot 40k \cdot 3x10^{-6}} = 0.11x10^6$$

2. เลือกชนิด ลักษณะโครงสร้างและขนาดของแกนแม่เหล็ก โดยเลือกขนาดของแกนให้ A_p มากกว่า $0.11x10^{-6}$ โดยเลือกแกนเฟอร์ไรต์ ชนิด EE80x76x20 เนื่องจาก มีค่า A_p มากกว่า $0.11x10^{-6}$ ซึ่งมีค่า

$$A_p = 2 \cdot A_c x A_{cw}$$
$$A_p = 2 \cdot 400x1100 = 0.8x10^6$$

EE80X76X20



Parameter			
Core constant	C_1	mm^{-1}	0.44878
	$C_2 \times 10^{-2}$	mm^{-3}	0.1106
Effective magnetic path length	l_e	mm	182
Effective cross-sectional area	A_e	mm^2	406
Effective core volume	V_e	mm^3	73910
Cross-sectional center leg area	A_c	mm^2	400
Minimum cross-sectional area	Amin.*	mm^2	400LC*
Winding cross-sectional area	A_{cw}	mm^2	1100
Weight(approx.)		g	372

* The symbol followed A min. value shows minimum cross-sectional area part. C is center pole part, L is outer pole part, B is the back part.

Part No.	AL-value* (nH/N²)	Calculated output power(kW) (forward converter mode)
PE22 EE80X76X20	4590±25%	1.4(100kHz)
PC40 EE80X76X20	5720±25%	1.5(100kHz)

* AL-value: T=23°C, f=1kHz, Hm=0.4A/m

รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้างและขนาดของแกนแม่เหล็ก

3. คำนวณหาจำนวนรอบขดลวดเหนี่ยวนำทางด้านปฐมภูมิ (N_1) และทางด้านทุติยภูมิ (N_2) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 4.2 ดังนี้

$$N_1 = \frac{V_1}{2 \cdot B_{max} \cdot S \cdot f} \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{310}{2 \cdot 0.25 \cdot (20x40) \cdot 10^{-6} \cdot 40k} = 19.4 \quad \approx 20 \text{ รอบ}$$

$$N_1 = \frac{V_2}{2 \cdot B_{\max} \cdot S \cdot f} \tag{4.3}$$

$$= \frac{100}{2 \cdot 0.25 \cdot (20x40) \cdot 10^{-6} \cdot 40k} = 6.25 \quad \approx 7 \quad \text{รอบ}$$

คำนวณหาขนาดของขดลวดตัวนำ (A_w) เมื่อ

$$N_1 A_{w1} = N_2 A_{w2} \tag{4.4}$$

$$A_{w2} = \frac{I_{2,rms}}{J} = \frac{40}{3} = 13.3 \quad mm^2$$

$$A_{w1} = \frac{N_2 A_{w2}}{N_1} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{I_{2,rms}}{J} = \frac{7}{20} \cdot \frac{40}{3} = 4.6 \quad mm^2$$

5. เลือกขนาดของขดลวดทองแดงให้ A_w ใหญ่กว่า 13.3 และ 4.6 นั่นคือ 14 และ 5 ตามลำดับ

6. เลือกเบอร์ขดลวด โดยจะต้องหาค่าความหนาของผิวตัวนำทองแดงกระแส (Skin depth) ก่อน จากสมการที่ 3.26

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_c}{\mu \cdot \omega}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2x10^8}{4\pi x10^{-7} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 40k}} = 0.503 \quad mm$$

โดยเลือกรัศมีของขดลวดทองแดงที่เล็กกว่าค่าความหนาของผิวตัวนำทองแดงกระแส (Skin depth) จากตารางที่ 3.2 เลือกเบอร์ของขดลวดทองแดง เบอร์ SWG27 มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.417 mm พื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.1363 mm^2

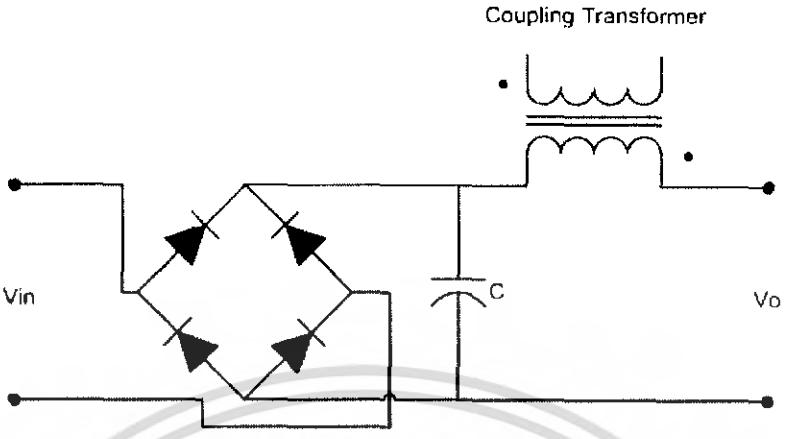
7. หาจำนวนเส้นที่มาดีเกลียวทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิได้ดังนี้

จำนวนเส้นทางด้านปฐมภูมิ = $\frac{A_{w1}}{0.1363} = \frac{5}{0.1363} = 36.2 \approx 37$ เส้น

จำนวนเส้นทางด้านปฐมภูมิ = $\frac{A_{w2}}{0.1363} = \frac{14}{0.1363} = 101.4 \approx 102$ เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองทางด้านออก



รูป 4.6 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองทางด้านออก

4.4.1 ไดโอด

จากสมการที่ 3.31 เราจะสามารถหาขนาดของกระแสพิกัดของไดโอด

$$I_{f(av)} = I_{out} x\, D$$

ดังนั้น

$I_{f(av)}$ = (กำลังด้านออกที่พิกัด/แรงดันด้านออกที่พิกัด) × 0.5

$$I_{f(av)} = \frac{3000}{100} x\, 0.5 = 15 \qquad \text{แอมป์}$$

ดังนั้น ในทางปฏิบัติได้เลือกใช้ไดโอดที่ทนกระแส $I_{f(av)}$ ได้ในขนาดพิกัด 30 แอมป์

4.4.2 ตัวเหนี่ยวนำ

จากสมการที่ 3.35

$$L = \frac{E_{out} \cdot T_{off}}{0.2 \cdot I_L}$$

ดังนั้นจะหาขนาดของ L ได้ดังนี้

$$T_{off} = \frac{1}{2} x 25 x 10^{-6} = 12.5 x 10^{-6} \text{ วินาที}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = \frac{100x12.5x10^{-6}}{0.2 \cdot 40} = 156.25 \text{ ไมโครเฮนรี่}$$

ขั้นตอนการออกแบบการคำนวณตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบโดยใช้วิธีการคำนวณแบบ Ap Approach

1. คำนวณหาค่า Area Product ซึ่งเป็นการหาค่าผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (S) กับพื้นที่ของช่องหน้าต่าง (W) ดังสมการที่ 4.5

$$A_p = W \cdot S = \frac{L \cdot I^2_{peak}}{k \cdot B_{max} \cdot J} \qquad (4.5)$$

เมื่อ k คือ ขีดจำกัดของหน้าต่าง มีค่าในช่วง 0.3 - 0.6

B_{max} คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งค่า B_{max} จะขึ้นกับชนิดของแกนแม่เหล็กในแต่ละชนิด

J คือ ค่าความหนาแน่นกระแสในสายตัวนำทองแดง ($J_{rms} = \frac{I_{rms}}{A}$) โดยวิธีนี้เป็นการออกแบบที่ใช้อุณหภูมิเพิ่ม (T_{rise}) ซึ่งอยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแสในสายตัวนำทองแดง J = 3-5 $\frac{A}{mm^2}$

ดังนั้น $$A_p = W \cdot S = \frac{156.25x10^{-6}x40^2}{0.6 \cdot 0.25 \cdot 3x10^{-6}} = 0.55x10^6$$

2. เลือกชนิด ลักษณะโครงสร้างและขนาดของแกนแม่เหล็ก โดยเลือกขนาดของแกนให้ A_p มากกว่า $0.11x10^{-6}$ โดยเลือกแกนเฟอร์ไรต์ ชนิด EE80x76x20 เนื่องจาก มีค่า A_p มากกว่า $0.11x10^{-6}$ ซึ่งมีค่า

$$A_p = 2 \cdot A_c x A_{cw}$$

$$A_p = 2 \cdot 400x1100 = 0.8x10^6$$

3. คำนวณหาจำนวนอบขดลวดเหนี่ยวนำ (N) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 4.6

$$N = \frac{L \cdot I_{peak}}{B_{max} \cdot S} \qquad (4.6)$$

$$= \frac{156.25x10^{-6}x40}{0.25 \cdot (20x20) \times 10^{-6}} = 62.5 \approx 63 \text{ รอบ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. คำนวณหาขนาดของขดลวดตัวนำ (A_w) เมื่อ

$$A_w = \frac{I_{2,rms}}{J} = \frac{40}{3} = 13.3 \quad mm^2$$

5. เลือกขนาดของขดลวดทองแดงให้ A_w ใหญ่กว่า 13.3 นั่นคือ 14 mm^2 เลือกเบอร์ขดลวด โดยจะต้องหาค่าความหนาของผิวตัวนำทองแดงกระแส (Skin depth) ก่อน จากสมการที่ 3.26

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_c}{\mu \cdot \omega}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2x10^{8}}{4\pi x10^{-7} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 40k}} = 0.503 \quad mm$$

โดยเลือกรัศมีของขดลวดทองแดงที่เล็กกว่าค่าความหนาของผิวตัวนำทองแดงกระแส (Skin depth) จากตาราง เลือกเบอร์ของขดลวดทองแดง เบอร์ SWG27 มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.417 mm พื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.1363 mm^2

หาจำนวนเส้นที่มาดีเกลียวได้ดังนี้

$$\text{จำนวนเส้นลวดทองแดง} = \frac{A_{w2}}{0.1363} = \frac{14}{0.1363} = 101.4 \approx 102 \text{ เส้น}$$

4.4.3 ตัวเก็บประจุ

จากสมการที่ 3.36

จากข้อกำหนด

ΔI_{out}	=	0.20x40	
	=	8	แอมป์
Δv_{out}	=	0.10	โวลต์
f	=	40000	เฮิร์ท

ดังนั้น ตัวเก็บประจุ

$$C_{out} = \frac{8}{8x40000x0.10}$$

$$= 250 \quad \text{ไมโครฟารัด}$$

ในทางปฏิบัติเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 300 ไมโครฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

จากสมการที่ 4.7

$$V_{out} = 2\delta_{\max} V_{in} (\frac{N_s}{N_p}) \qquad (4.7)$$

ดังนั้น

ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้ $\delta_{\max}$ = Duty Cycle = 0.46

V_{in} = 50 Vdc, N_p = 40 รอบ, N_s = 2000 รอบ

$$V_{out} = 0.92 \times 50 \times (\frac{2000}{40}) = 2{,}300V$$

ปริมาตรของแกนจากในสมการที่ 4.1 $A_p = W \cdot S = \dfrac{P_{out}}{2 \cdot k \cdot B_{\max} \cdot f \cdot J}$

ดังนั้น

P_{out} = 230 Watt, k = 0.3-0.6, $B_{\max}$ = 0.25, f = 40 kHz, J = 3 - 5 $\dfrac{A}{mm^2}$

$$A_p = W \cdot S = \frac{230}{2 \cdot 0.6 \cdot 0.25 \cdot 40k \cdot 3x10^{-6}} = 6{,}388.89$$

MECHANICAL DIMENSIONS (mm)

PART	CORE TYPE	FIG.	A	B	C	D	E	L	S	T
0_44125UC	U core	3	41.78 ± .81	25.4 ± .13	11.94 ± .25	15.9 ± .2	18.8 ± .56	-	3.18 ± .13	34.66 nom
0_44130UC	U core	3	41.78 ± .11	30.5 ± .3	11.94 ± .25	20.8 min	18.8 ± .56	-	3.18 ± .13	34.66 nom
0_45716UC	U core	3	57.65 ± 1.7	28.6 + 0, - .4	15.9 ± .4	15.5 + 1, -0	27.6 ± .9	-	4.8 ± .2	49.8 ± .8

FIGURE 1

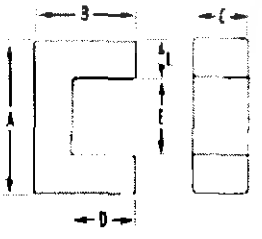


FIGURE 2

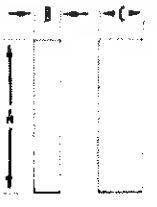
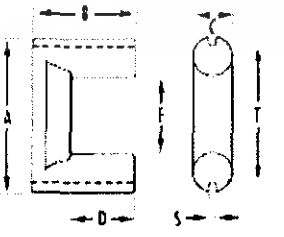


FIGURE 3



รูปที่ 4.7 แกนเหล็กเฟอร์ไรต์ที่ใช้สำหรับเป็นหม้อแปลงฟลายแบค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสสูงสุด (I_C) ที่จะผ่านมอสเฟตแต่ละตัวขณะนำกระแสในสมการที่ 4.8 คือ

$$I_C = \frac{P_{out}}{\eta \delta_{t(\max)} V_{in}} \tag{4.8}$$

ดังนั้นจะได้

P_{out} = 230 Watt, $\delta_{\max}$ = 0.46, V_{in} = 50 Vdc, η = 0.8

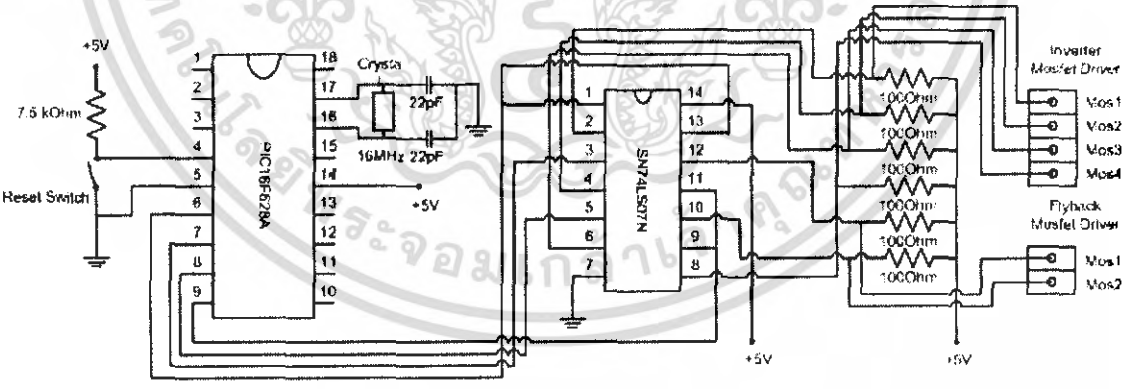
$\delta_{t(\max)} = 0.46 \times 2 = 0.92$

$$I_C = \frac{230}{0.8 \times 0.92 \times 50} = 6.25 \text{ A}$$

ดังนั้นจะต้องเลือกมอสเฟตที่ทนกระแส 50V, 6.25A

4.6 วงจรควบคุม

PIC16F628A จะทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณขับมอสเฟตแต่ละตัว โดยการเขียนโปรแกรมลงไปในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ และจะได้สัญญาณออกที่ขา 6, 7, 8 และ 9 โดยลักษณะสัญญาณจะถูกเลื่อนเฟสเรียบร้อยแล้ว สัญญาที่ได้ยังไม่สามารถนำไปขับมอสเฟตได้โดยตรงแต่จะต้องผ่านบัฟเฟอร์ SN74LS07N ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ แล้วส่งผ่านไปขับขาเกตของมอสเฟต IRF510 ต่อไป

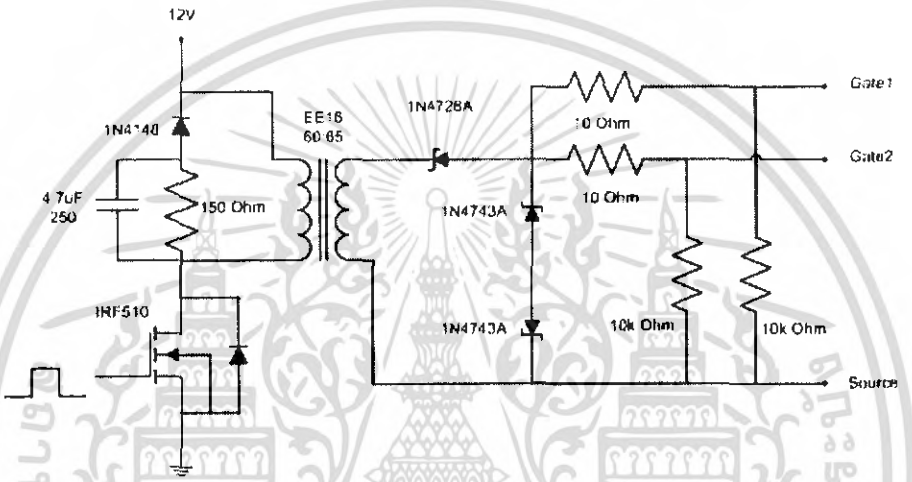


รูปที่ 4.8 วงจรควบคุมและจ่ายแรงดันสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตหรือวงจรแยกกราวด์

เมื่อสัญญาณที่ถูกเลื่อนเฟสที่ได้จากการเขียนโปรแกรมลงใน PIC จะถูกส่งผ่านเข้ามาขาเกตของมอสเฟต IRF510 จะทำหน้าที่ในการสวิตช์แรงดัน 12V ผ่านหม้อแปลงแยกกราวด์ โดยใช้หม้อแปลงขนาด EE16 พันลวดเป็น 1:1 ตัวเก็บประจุ 4.7uF, ความต้าน 150Ω, ไดโอด 1N4148 จะช่วยลดกระแสที่เกิดในช่วงหยุดนำกระแสของหม้อแปลง สัญญาณแรงดันขนาด 12V จะถูกส่งผ่านไปทางทุติยภูมิ และซีเนอร์ไดโอด 1N4743A ทั้ง 2 ตัวจะทำหน้าที่ในตัดขนาดแรงดันที่เกิน 13V แล้วจะได้สัญญาณขับขาเกตที่คร่อมความต้านทาน 10kΩ ดังรูปที่ 4.9 โดยจะได้สัญญาณขับขาเกต G1-S, G2-S



รูปที่ 4.9 วงจรแยกกราวด์ขับขาเกตของมอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

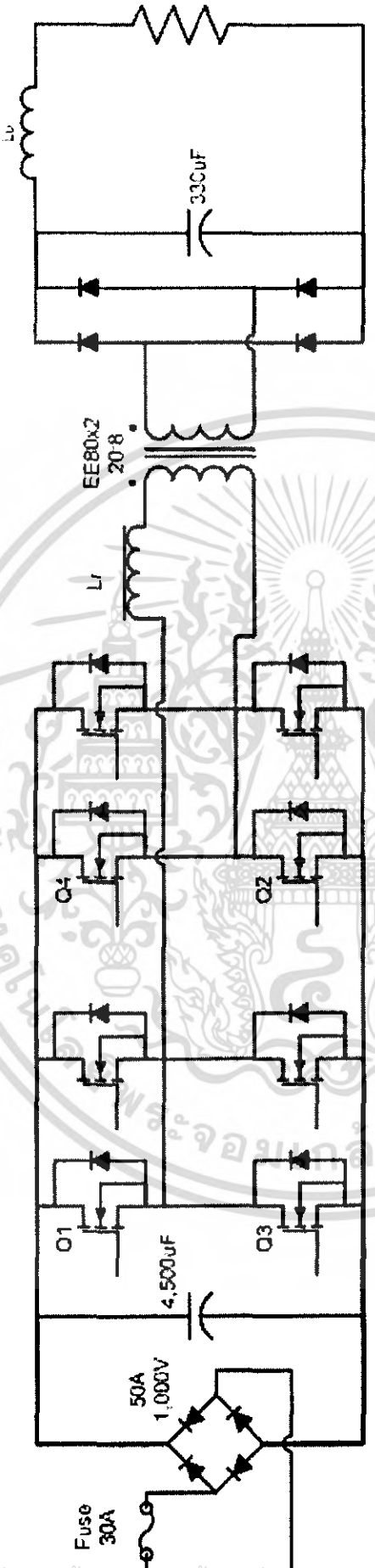
บทที่ 5
ผลการทดลอง

การทดลองนี้จะทำการทดสอบสัญญาณรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการจ่ายโหลดโดยใช้โหลดที่เป็นหลอดไฟฟ้าในการทดสอบเพื่อหาพิกัดกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้

1. Digital Oscilloscopes รุ่น DL1620 1 เครื่อง
2. สาย Probe 1×10 1 เส้น
3. สาย Probe 1×100 1 เส้น
4. Differential Probe 1×200 1 ชุด

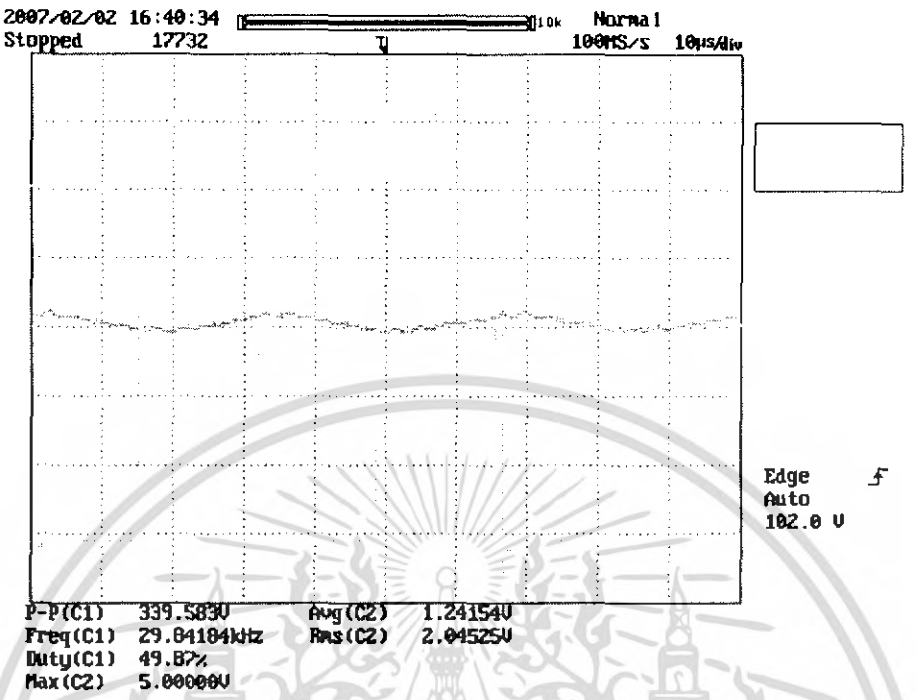
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 วงจรไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

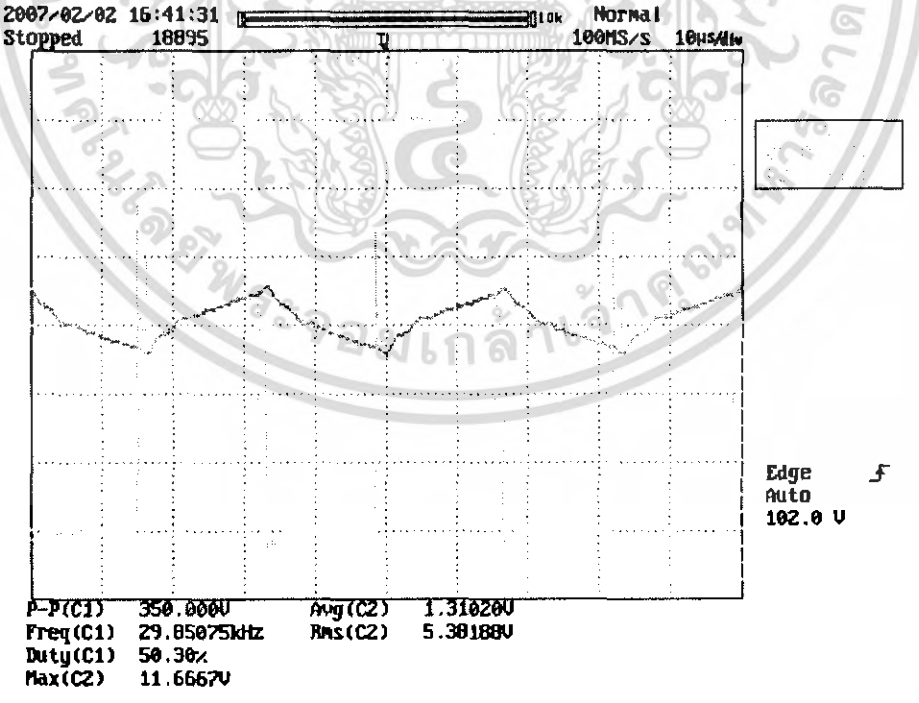
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 ผลทดสอบรูปสัญญาณ



รูปที่ 5.2 แรงดันและกระแสที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด

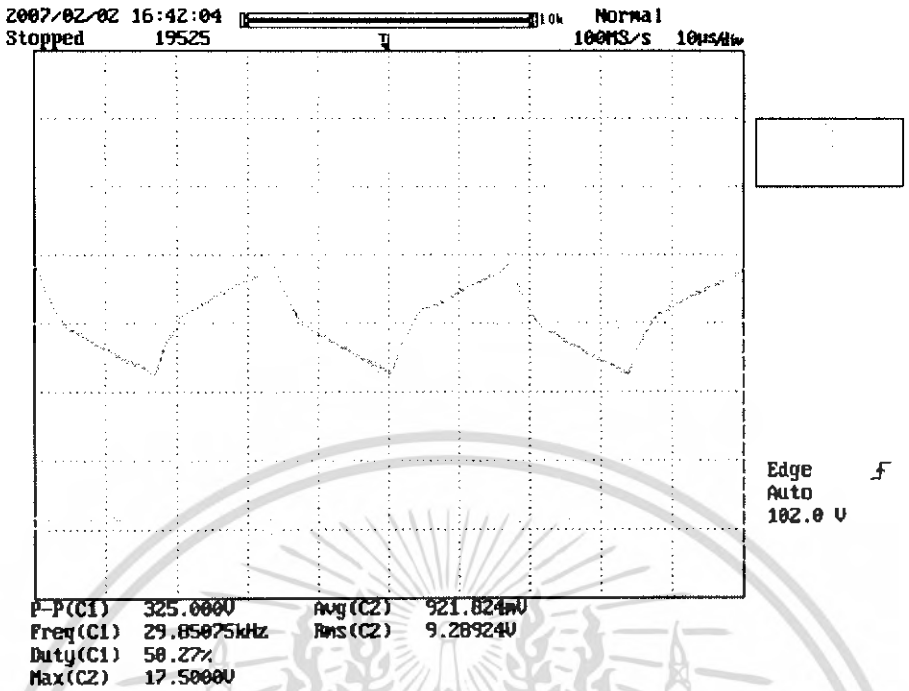
CH1=[50V/div], CH2=[20V/div]



รูปที่ 5.3 แรงดันและกระแสที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงขณะมีโหลด 10 แอมป์

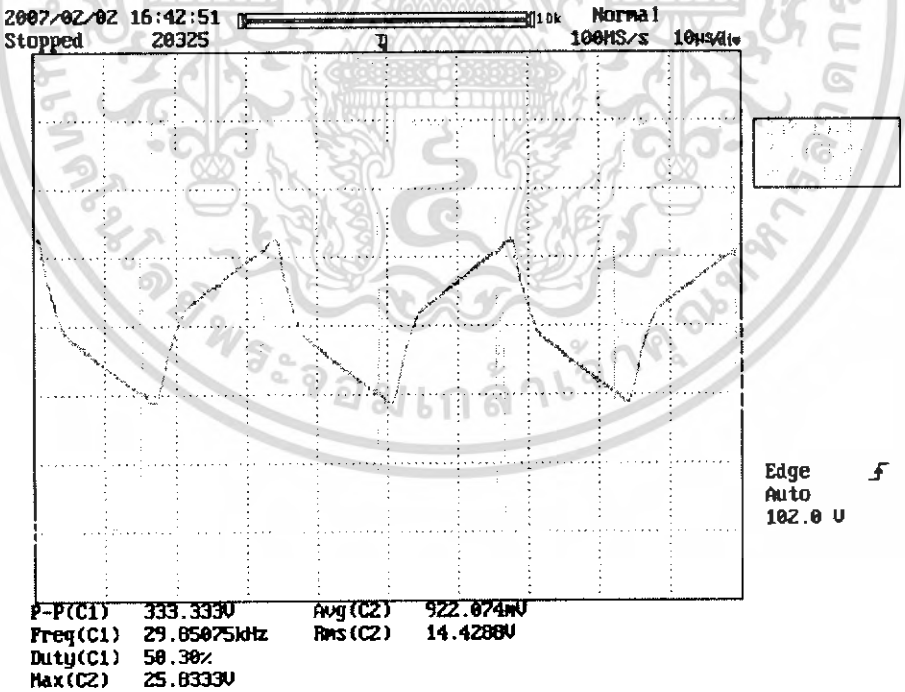
CH1=[50V/div], CH2=[20V/div]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แรงดันและกระแสที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงขณะมีโหลด 20 แอมป์

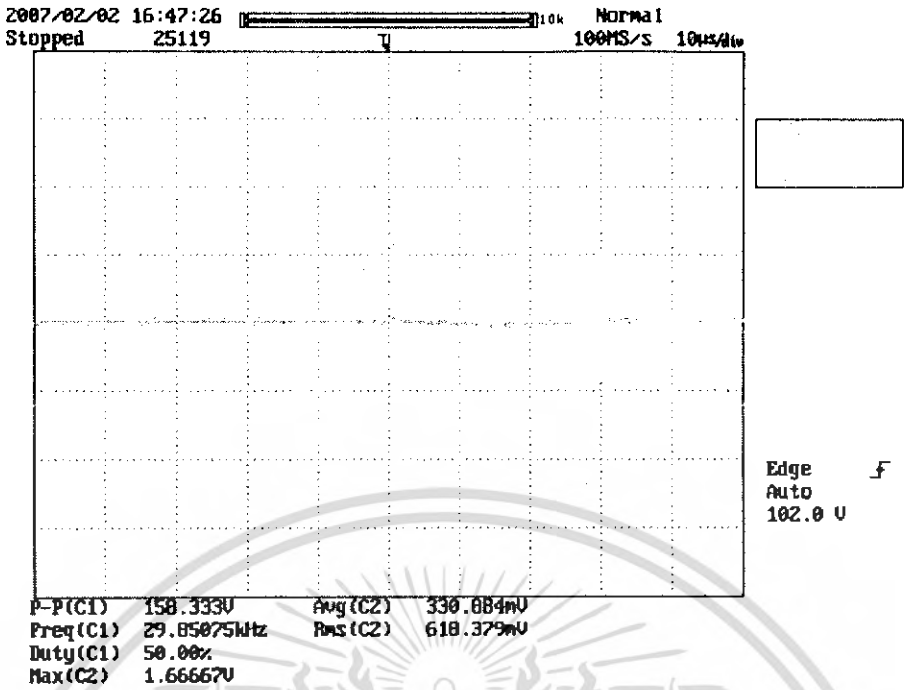
CH1=[50V/div], CH2=[20V/div]



รูปที่ 5.5 แรงดันและกระแสที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงขณะมีโหลด 30 แอมป์

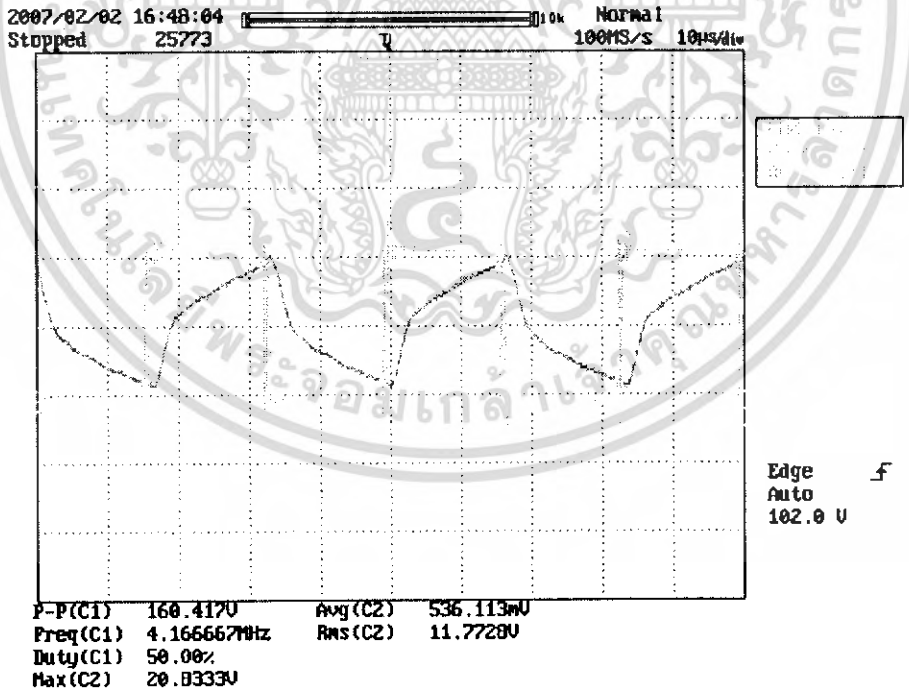
CH1=[50V/div], CH2=[20V/div]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แรงดันและกระแสที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด

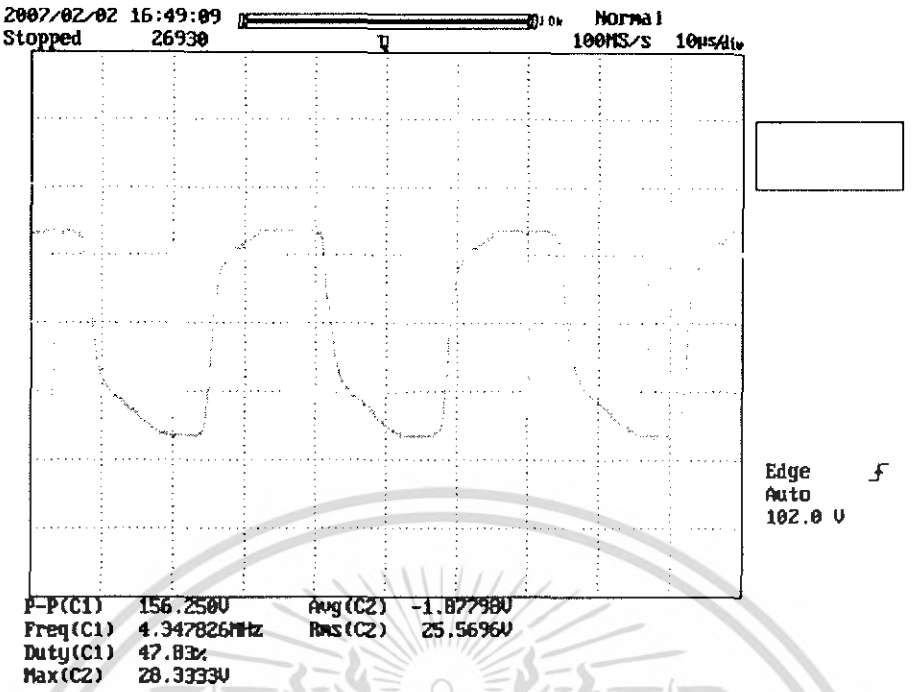
CH1=[50V/div], CH2=[20V/div]



รูปที่ 5.7 แรงดันและกระแสที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงขณะมีโหลด 10 แอมป์

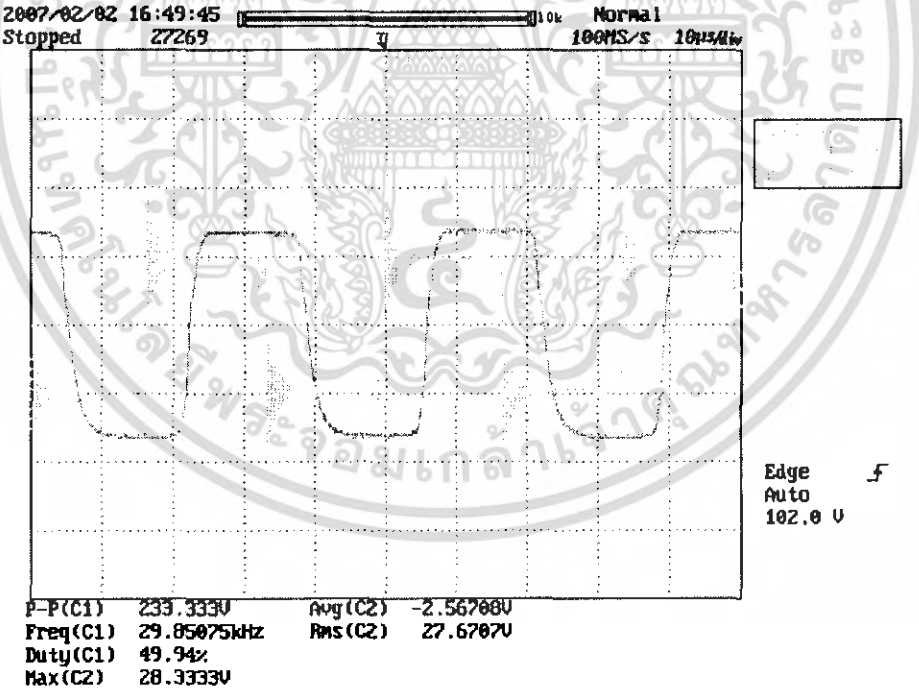
CH1=[50V/div], CH2=[20V/div]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แรงดันและกระแสที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงขณะมีโหลด 20 แอมป์

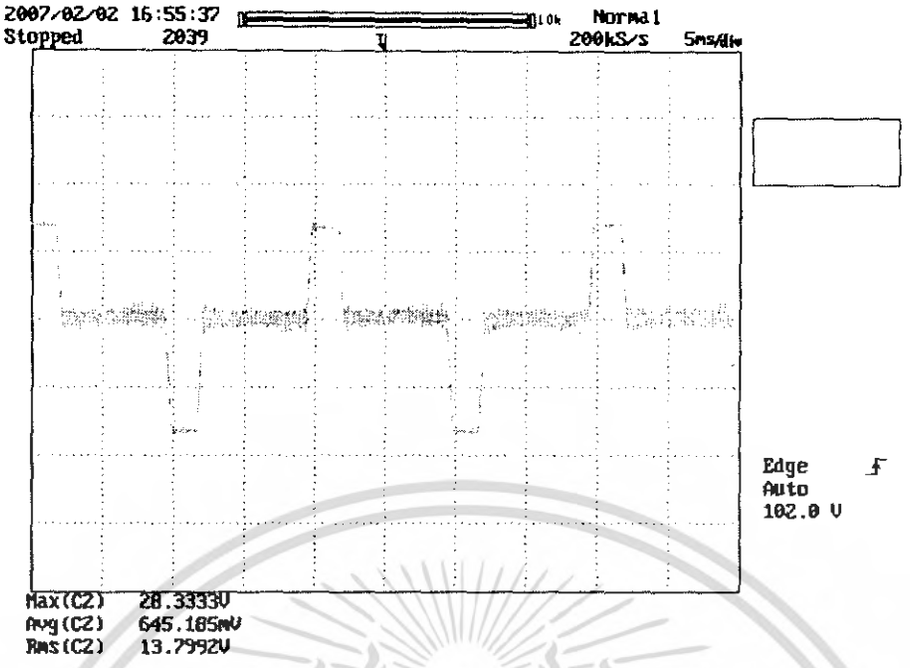
CH1=[50V/div], CH2=[20V/div]



รูปที่ 5.9 แรงดันและกระแสที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงขณะมีโหลด 30 แอมป์

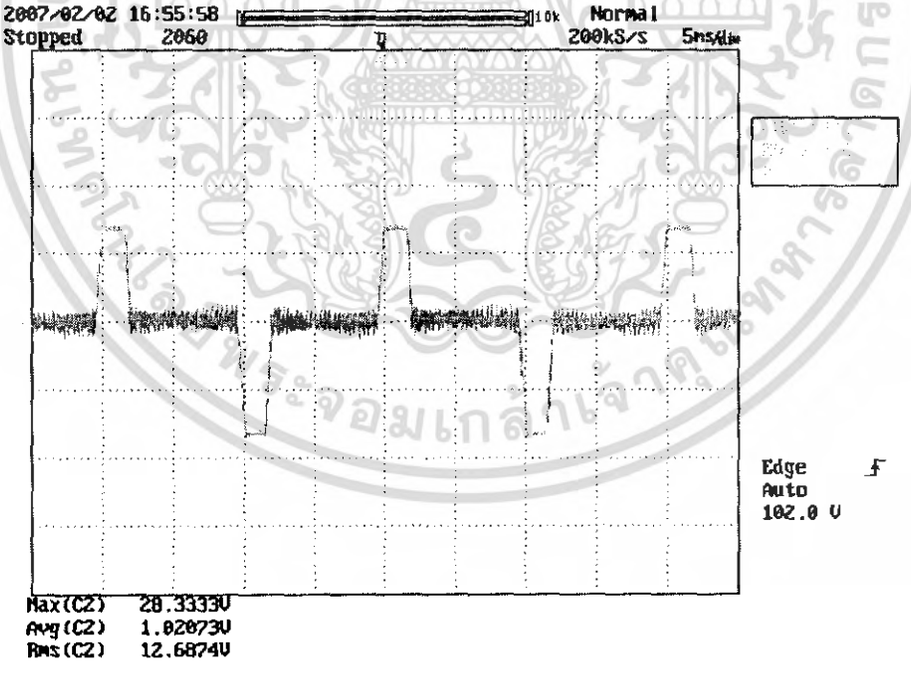
CH1=[50V/div], CH2=[20V/div]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 กระแสอินพุท 30 แอมป์

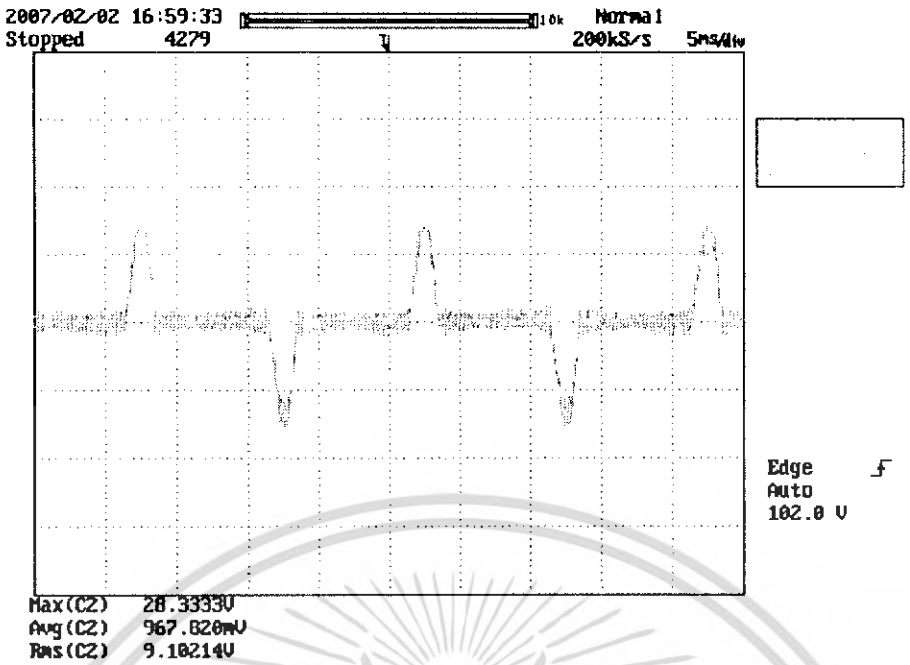
CH2=[20V/div]



รูปที่ 5.11 กระแสอินพุท 20 แอมป์

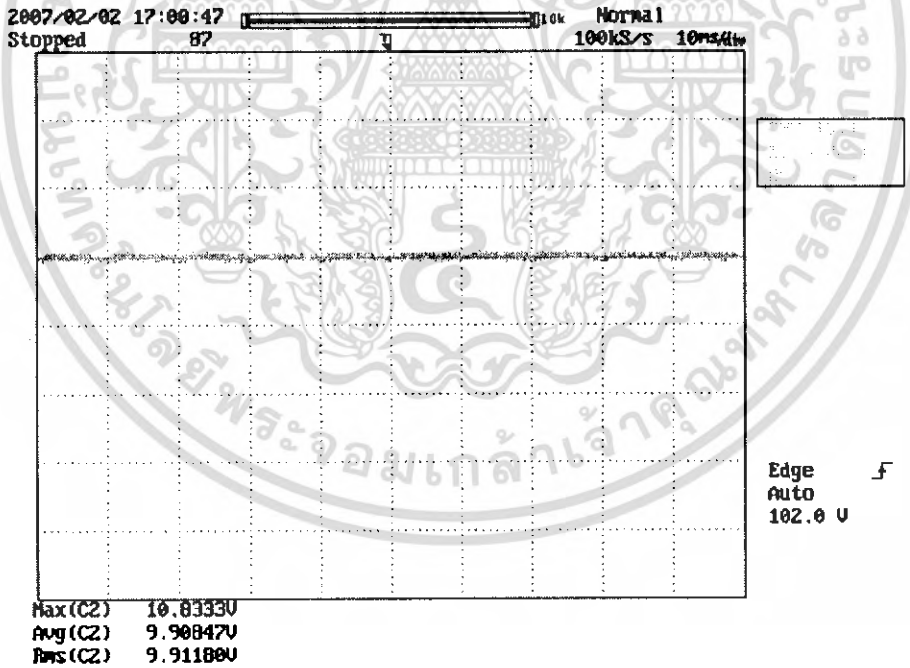
CH2=[20V/div]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 กระแสอินพุท 10 แอมป์

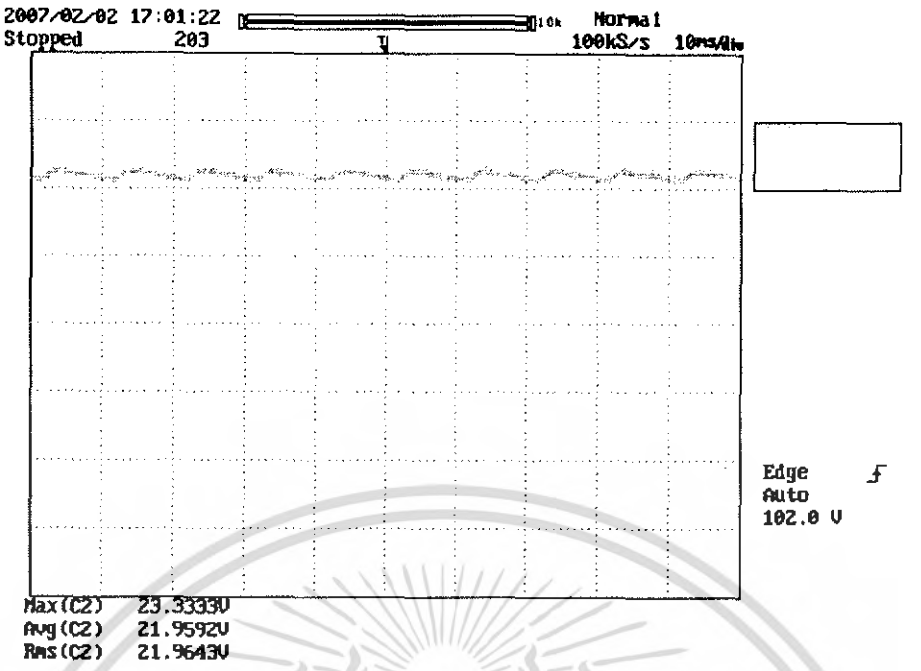
CH2=[20V/div]



รูปที่ 5.13 กระแสเอาท์พุท 10 แอมป์

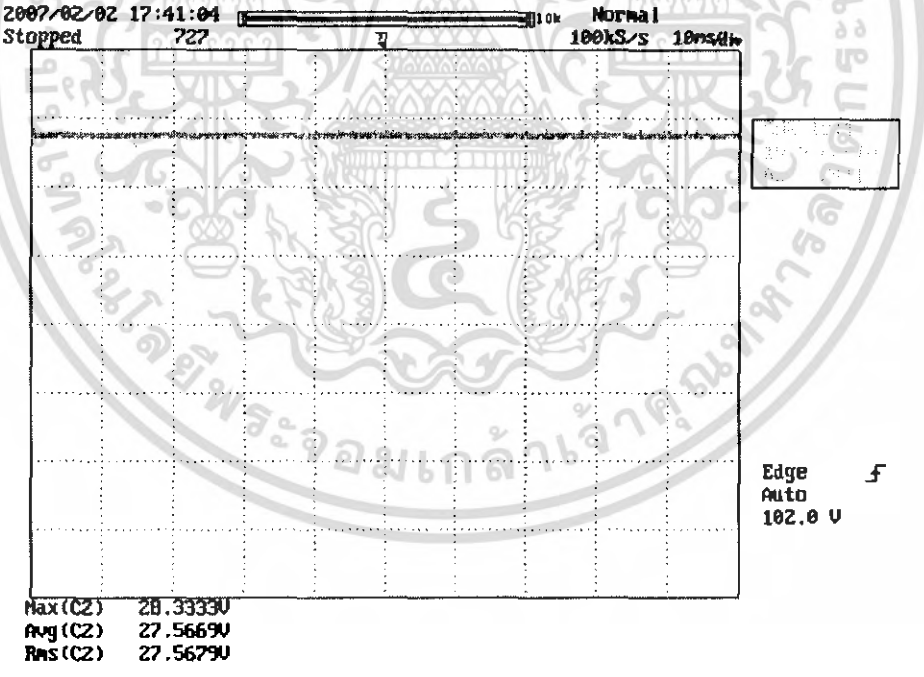
CH2=[10V/div]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 กระแสเอาท์พุท 20 แอมป์

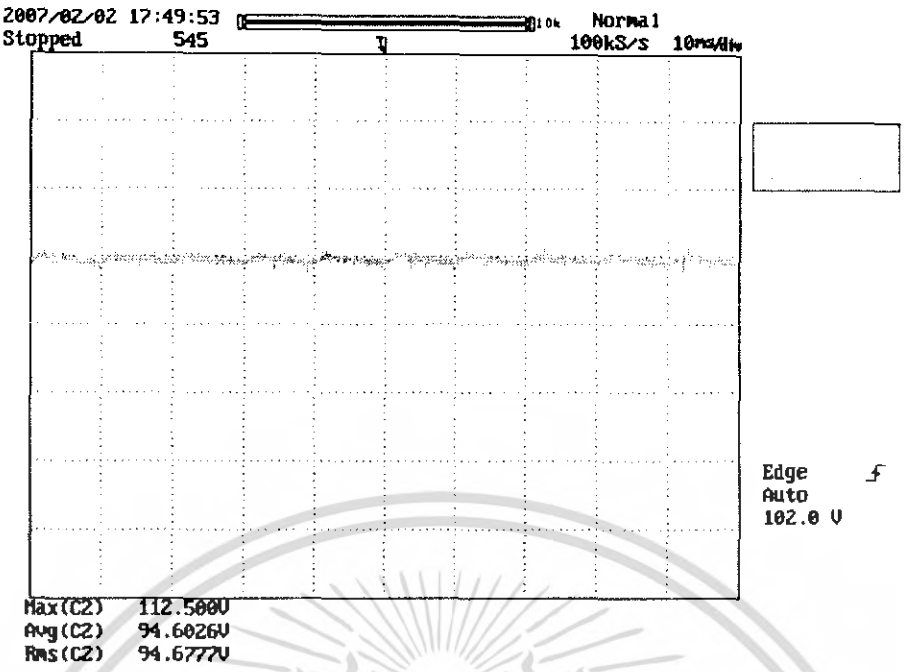
CH2=[10V/div]



รูปที่ 5.15 กระแสเอาท์พุท 30 แอมป์

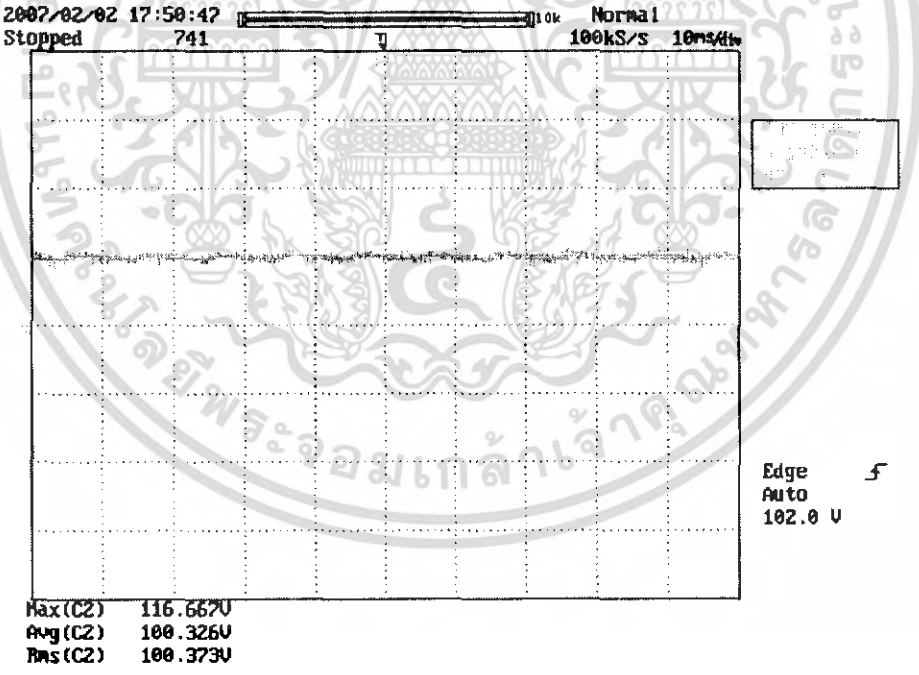
CH2=[10V/div]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 แรงดันเอาท์พุทขณะมีโหลด กระแส 30 แอมป์

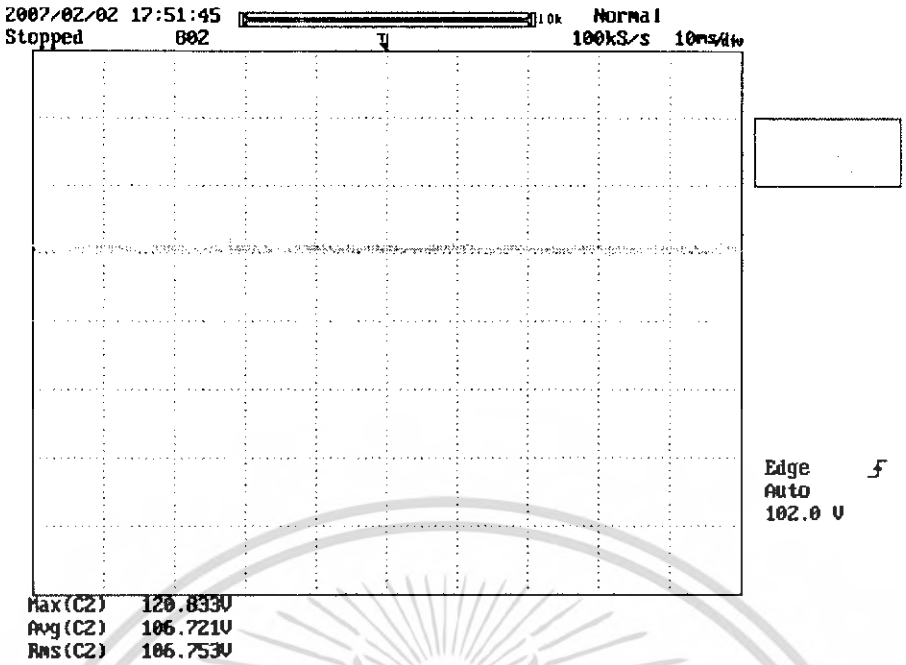
CH2=[0.1kV/div]



รูปที่ 5.17 แรงดันเอาท์พุทขณะมีโหลด กระแส 20 แอมป์

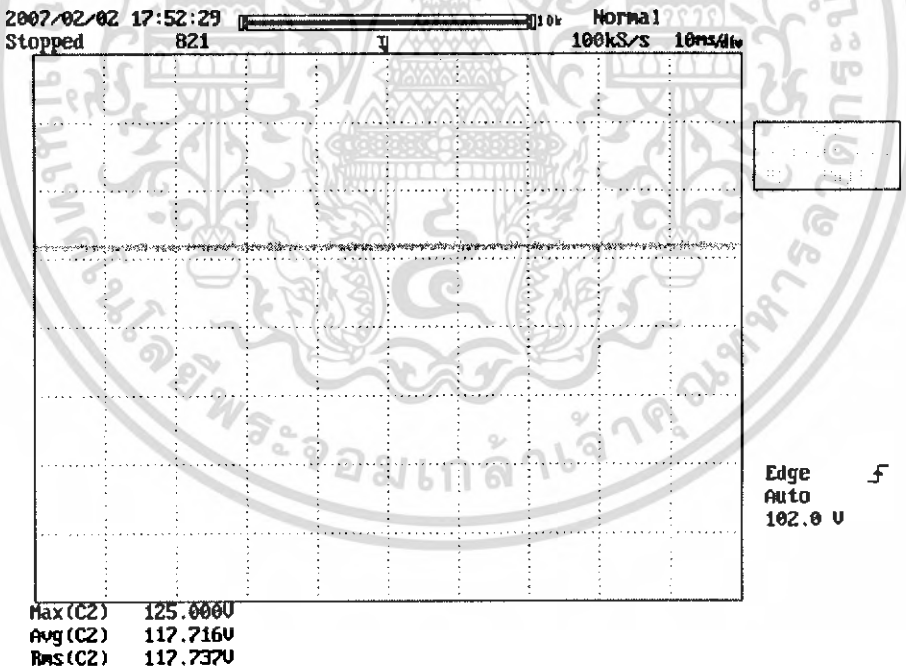
CH2=[0.1kV/div]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 แรงดันเอาท์พุทขณะมีโหลด กระแส 10 แอมป์

CH2=[0.1kV/div]



รูปที่ 5.19 แรงดันเอาท์พุทขณะไม่มีโหลด

CH2=[0.1kV/div]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

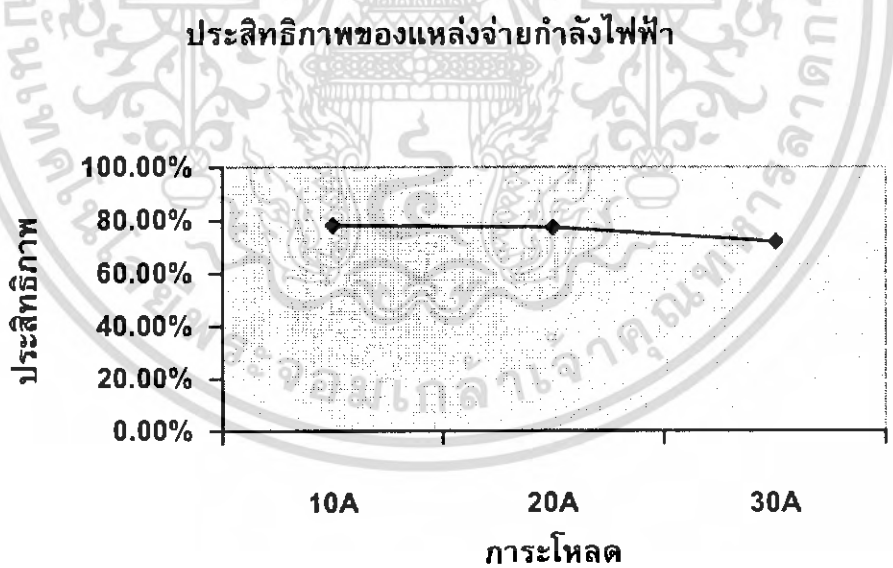
5.2 ผลการทดลองกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพ

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้าด้านออก

ด้านขาออก		
กระแส	**แรงดัน**	**พลังงานขาออก**
9.91 A	106.72 Vdc	1,057.60 W
21.96 A	100.33 Vdc	2,203.25 W
27.56 A	94.60 Vdc	2,607.74 W

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง

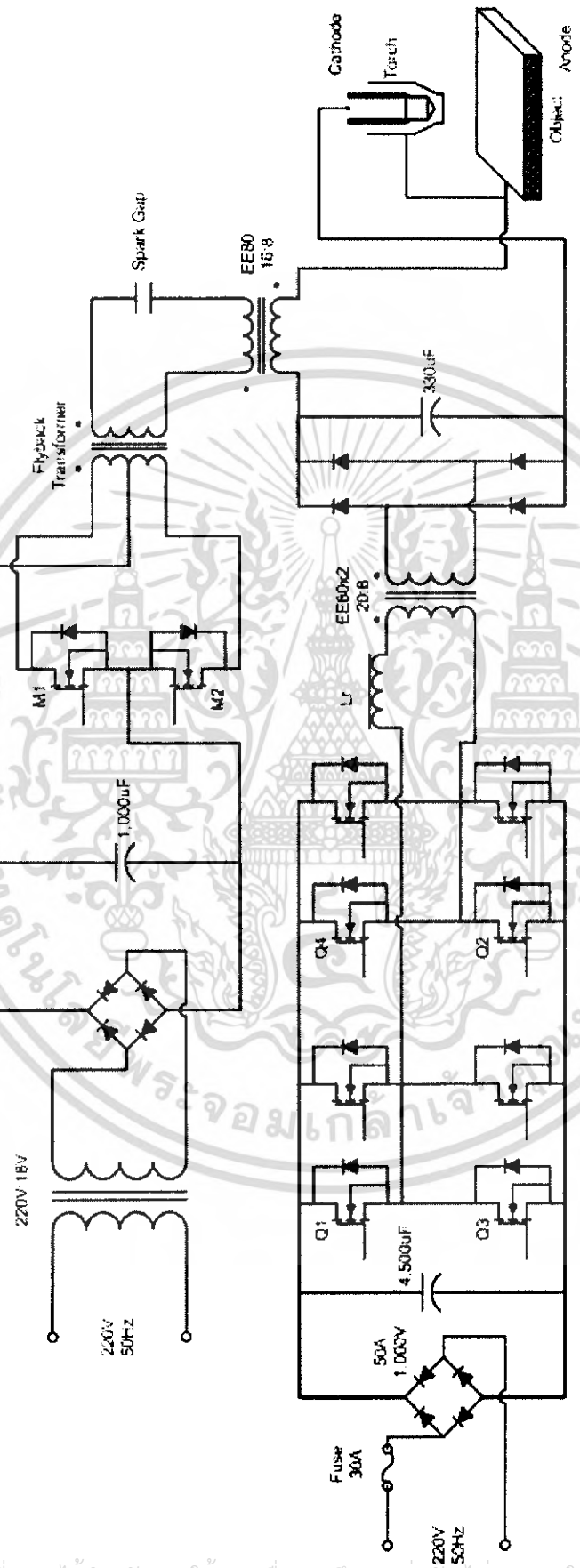
โหลดด้านออก	พลังงานขาเข้า	พลังงานขาออก	ประสิทธิภาพ %
10 A	1,352.43 W	1,057.60 W	78.20%
20 A	2,845.11 W	2,203.25 W	77.44 %
30 A	3,621.86 W	2,607.74 W	72.00%



รูปที่ 5.20 รูปกราฟแสดงประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

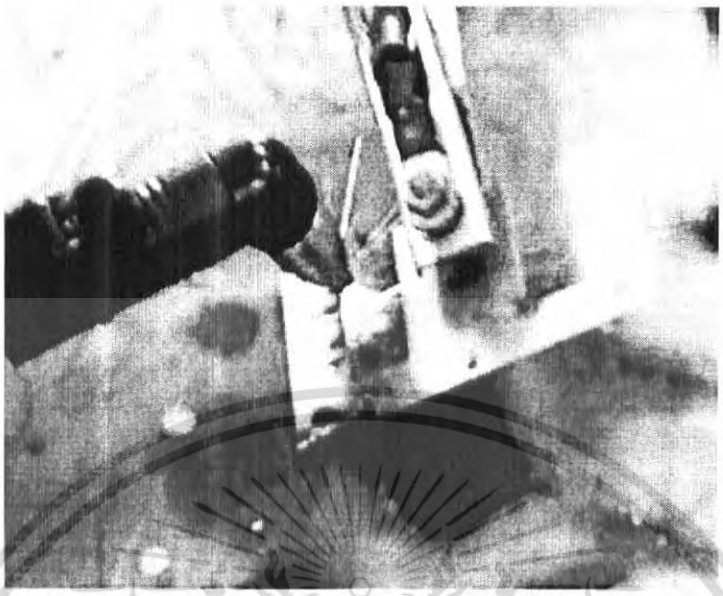
5.3 การทดสอบตัดชิ้นงานโลหะ



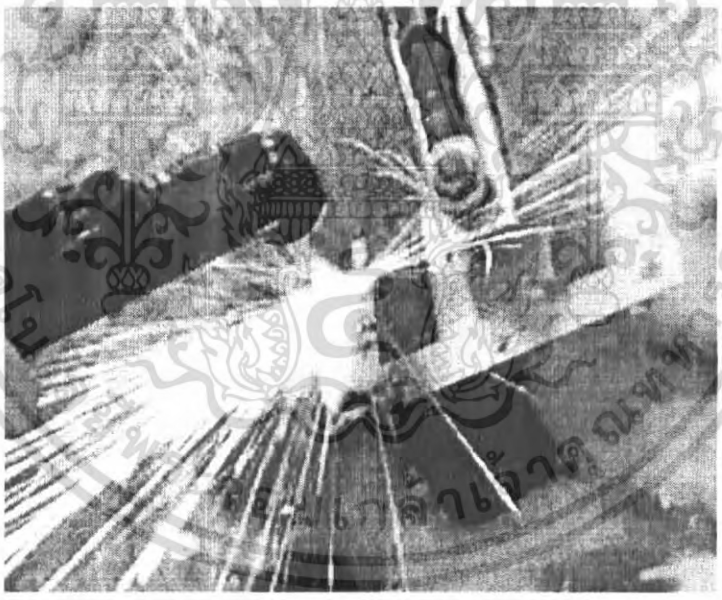
รูปที่ 5.21 วงจรไฟฟ้ารวมของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดลำพลาสมา

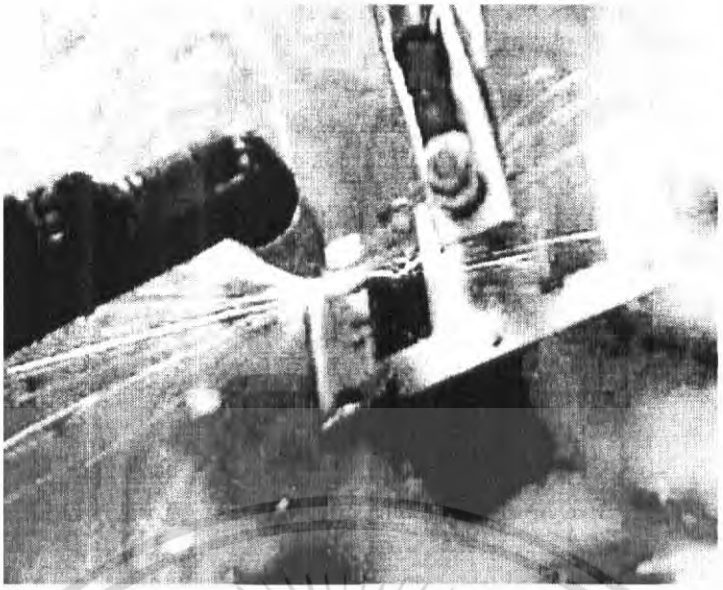


รูปที่ 5.22 เริ่มเกิดลำพลาสมา



รูปที่ 5.23 เกิดลำพลาสมาเต็มในขณะทำการตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 การตัดโลหะด้วยลำพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปและเสนอแนวทางที่จะดำเนินการ

6.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การออกแบบเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมามีแนวคิดที่จะใช้วงจรที่ง่ายไม่ซับซ้อนมีจำนวนวงจรน้อยเพื่อให้เกิดความน่าเชื่อในการทำงานมากที่สุด การสร้างสัญญาณขับมอสเฟตจาก PIC มีสัญญาณที่เสถียรทำให้มอสเฟตทำงานได้อย่างสมบูรณ์ และการนำอากาศมาใช้เป็นพลาสมาก๊าซนั้นเนื่องจากอากาสสามารถหาได้ง่ายและมีอยู่โดยทั่วไป เป็นการประหยัดเมื่อเทียบกับก๊าซชนิดอื่นๆ

การอาร์คของลำพลาสมาจะเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อมีการเกิดอาร์คไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง เมื่อเราทำการทดลองในที่นี้จะทำให้อาร์คหลักเกิดตามได้โดยง่าย โลหะจะถูกหลอมเหลวและขาดออกจากกันด้วยความร้อนที่สูง การใช้งานนานๆ ก็อาจจะทำให้แท่ง Cathode ที่อยู่ภายในของหัวคบหรือหัวตัดหลอมเหลวทำให้เสียรูปทรง ลำอาร์คก็จะไม่เป็นลำเรียวตรง ดังนั้นจะต้องคอยตัวเช็คและเปลี่ยนหัวใหม่

การใช้เทคนิคการสวิตชิ่งที่แรงดันศูนย์จะช่วยให้ขนาดของแผ่นระบายอากาศเล็กลง แต่ก็ต้องคำนึงถึงการเลื่อนเฟสที่ถูกต้องรวมไปถึงกระแสจะเกิดขึ้นในขณะทำการตัดจริง กระแสที่สูงจะก่อให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์มอสเฟต เพราะในขณะทำการตัด จะเหมือนลักษณะการลัดวงจรเพราะมีค่าความต้านทานที่ต่ำมาก

ข้อเสียของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมาในครั้งนี้

1. การทำให้เกิดลำอาร์คหลักยังทำได้ยากเนื่องจากข้อจำกัดทั้งแรงดันและกระแส
2. ยังขาดวงจรป้อนกลับและวงจรป้องกันไฟฟ้า
3. ไม่สามารถปรับขนาดของอุปกรณ์ให้เล็กลงตามที่คาดหวังไว้
4. ลักษณะแนวตัดยังไม่เป็นเส้นขนาดเล็กสวยงามและตัดโลหะได้บางลง

ปัญหาที่พบในการทดลอง

1. พิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องยังไม่มากเพียงพอที่จะตัดโลหะขนาดหนาได้
2. มักเกิดกระแสเกินพิกัดในขณะทำการตัดซึ่งอาจจะทำให้เกิดความเสียหายกับมอสเฟตได้

6.2 แนวทางที่จะดำเนินการ

เนื่องจากโครงงานเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมาในปีนี้จัดทำขึ้นเป็นครั้งแรก จึงเป็นเครื่องต้นแบบเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาต่อไป ตั้งแต่การพัฒนาให้พิกัดกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดแนวอาร์คหลักต่อเนื่องมากขึ้นทำให้การตัดโลหะเกิดความสวยงาม และต้องมีการพัฒนาวงจรป้อนกลับและวงจรป้องกัน และลดขนาดของอุปกรณ์เพิ่มสเถียรภาพในการทำงานให้สูงขึ้น สุดท้ายก็จัดเข้ากล่องโลหะให้สะดวกในการไปใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] N. Mohan, T .M. Underland, and W.P. Robins, **Power Electronics Converter Application and Design**, John Wiley & Sons, Inc., 1989.

[2] Abraham I. Pressman, **Switching Power Supply Design**, McGraw-Hill, 1991

[3] Roth, J. Reece, **Industrial Plasma Engineering**, Bristol, Institute of Physics, 1995

[4] **วีระเชษฐ์ ขันเงิน และวุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพ, สำนักพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พริ้นติ้ง, 2547

[5] ปรากฤต เหลี่ยงประดิษฐ์, "แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งความถี่สูงที่แรงดันสวิตช์ศูนย์", **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543

[6] ชวลิต เปี่ยมวารี และคณะ, "เครื่องเชื่อมอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง", **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546**

[7] สุริยา ธงชัย, "แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่งของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา", **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536**

[8] บุญวัฒน์ ว่องไวทวีทรัพย์ และประเสริฐ แก้วกาญจน์, "เครื่องตัดโลหะด้วยลำพลาสมา", **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

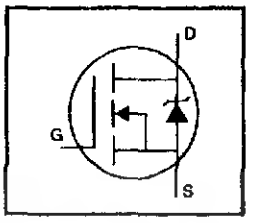
International
IOR Rectifier

PD-9.512B

IRFP460

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements



V_{DSS} = 500V

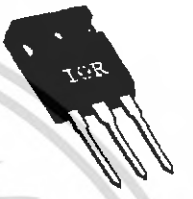
$R_{DS(on)}$ = 0.27Ω

I_D = 20A

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.



TO-247AC

DATA SHEETS

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ T_C = 25°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10 V	20	A
I_D @ T_C = 100°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10 V	13	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	80	
P_D @ T_C = 25°C	Power Dissipation	280	W
	Linear Derating Factor	2.2	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	±20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	960	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ①	20	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	28	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	3.5	V/ns
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +150	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	*10 lbf-in (1.1 N·m)*	

Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	0.45	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	40	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

IOR

Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	V_{GS}=0V, I_D= 250μA
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.63	—	V/°C	Reference to 25°C, I_D= 1mA
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	Ω	V_{GS}=10V, I_D=12A ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V_{DS}=V_{GS}, I_D= 250μA
g_{fs}	Forward Transconductance	13	—	—	S	V_{DS}=50V, I_D=12A ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	V_{DS}=500V, V_{GS}=0V
		—	—	250		V_{DS}=400V, V_{GS}=0V, T_J=125°C
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V_{GS}=20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V_{GS}=-20V
Q_g	Total Gate Charge	—	—	210	nC	I_D=20A
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	29		V_{DS}=400V
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	110		V_{GS}=10V See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	18	—	ns	V_{DD}=250V
t_r	Rise Time	—	59	—		I_D=20A
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	110	—		R_G=4.3Ω
t_f	Fall Time	—	58	—		R_D=13Ω See Figure 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	13	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	4200	—	pF	V_{GS}=0V
C_{oss}	Output Capacitance	—	870	—		V_{DS}= 25V
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	350	—		f=1.0MHz See Figure 5

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	20	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	80		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	T_J=25°C, I_S=20A, V_{GS}=0V ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	T_J=25°C, I_F=20A
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	5.7	8.6	μC	di/dt=100A/μs ④
I_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)

② V_{DD}=50V, starting T_J=25°C, L=4.3mH R_G=25Ω, I_{AS}=20A (See Figure 12)

③ I_{SD}≤20A, di/dt≤160A/μs, V_{DD}≤$V_{(BR)DSS}$, T_J≤150°C

④ Pulse width ≤ 300 μs; duty cycle ≤2%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

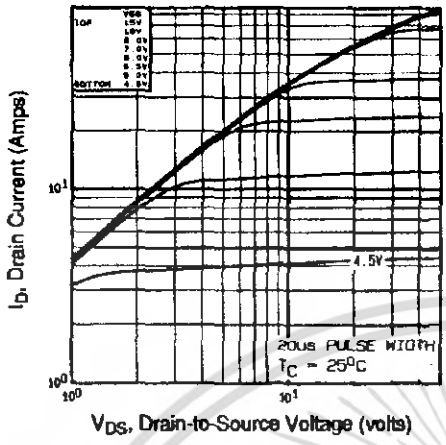


Fig 1. Typical Output Characteristics, T_C=25°C

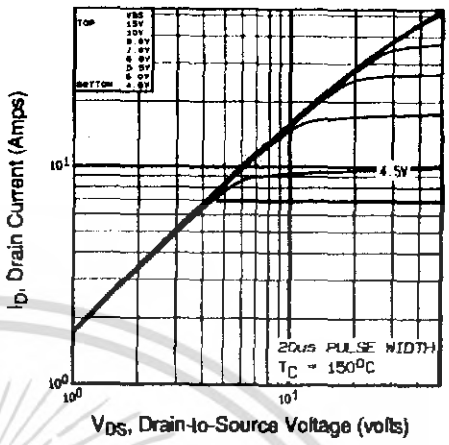


Fig 2. Typical Output Characteristics, T_C=150°C

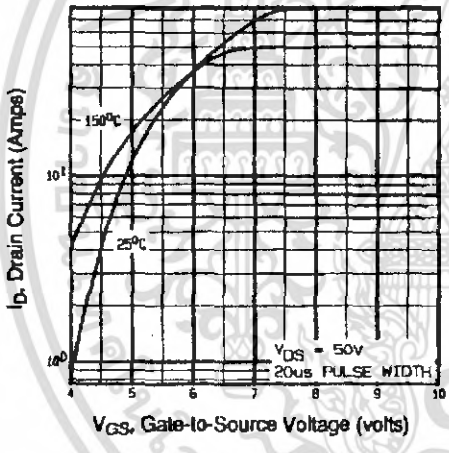


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

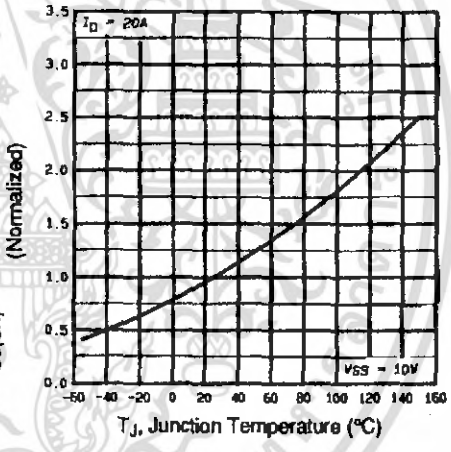


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

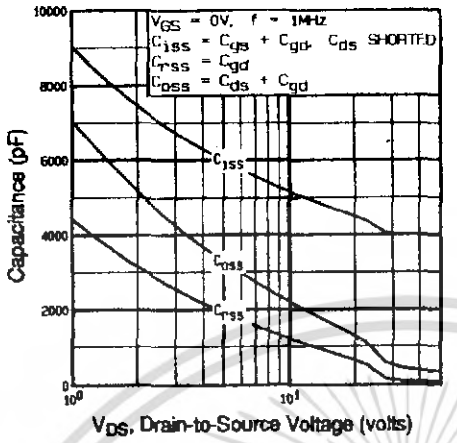


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

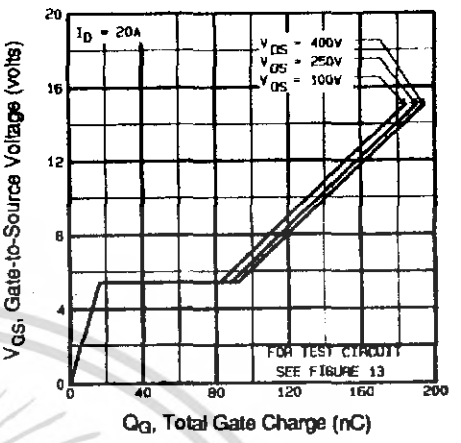


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

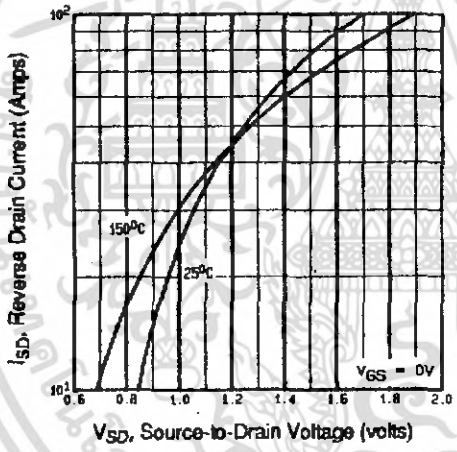


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

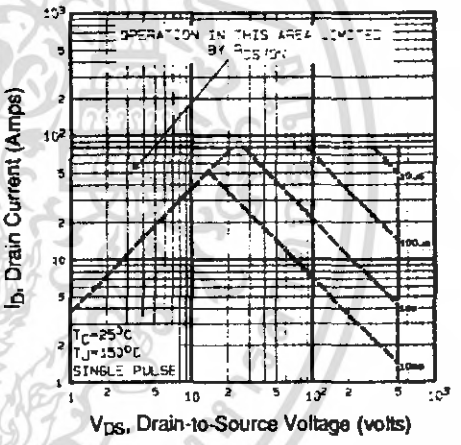


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

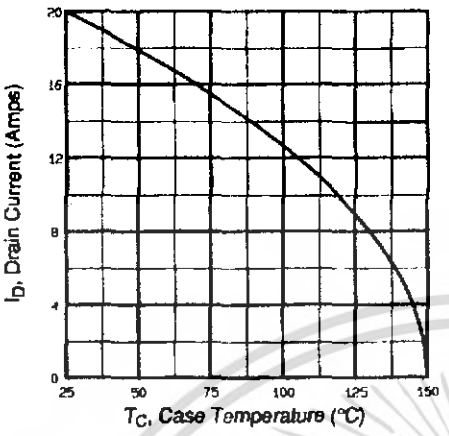


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

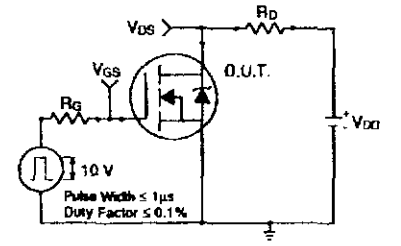


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

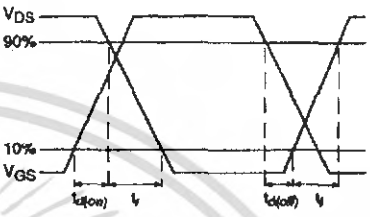


Fig 10b. Switching Time Waveforms

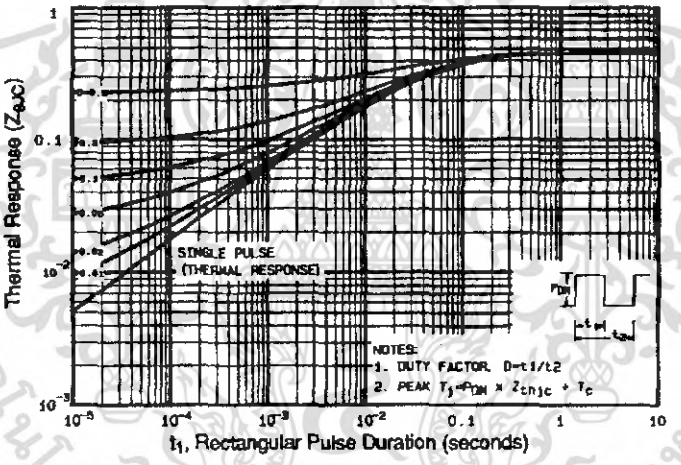


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

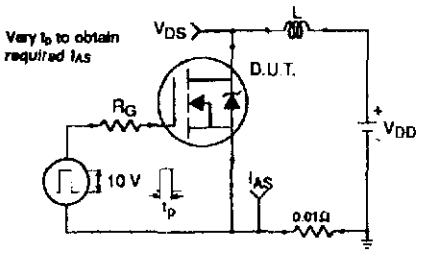


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

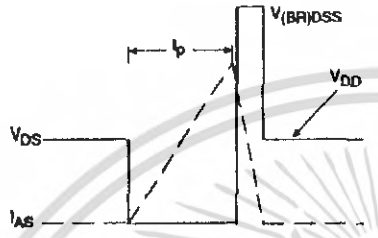


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

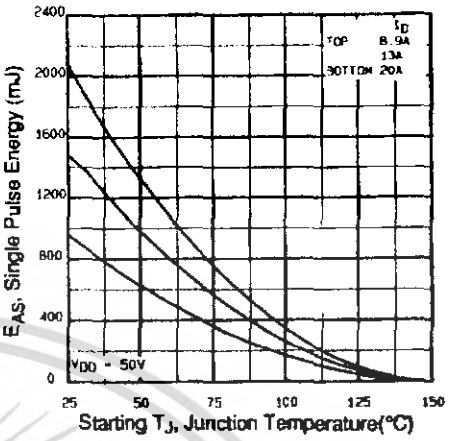


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

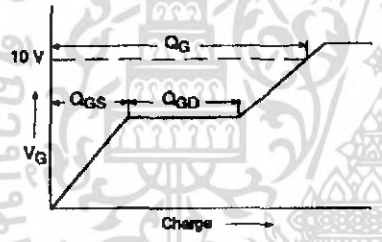


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

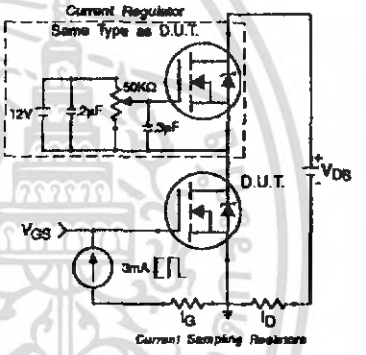


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Appendix A: Figure 14, Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit – See page 1505

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1511

Appendix C: Part Marking Information – See page 1517

International IOR Rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GBPC 40, 50 SERIES

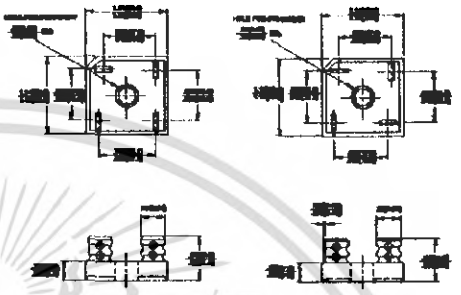
High Current 40, 50 AMPS. Single Phase Glass Passivated Bridge Rectifiers

Voltage Range
50 to 1000 Volts
Current
40, 50.0 Amperes

Features

- ✧ UL Recognized File # E-96005
- ✧ The plastic material used carries Underwriters Laboratory Flammability Recognition 94V-0
- ✧ Integrally molded heatsink provide very low thermal resistance for maximum heat dissipation
- ✧ Universal 4-way terminals; snap-on, wrap-around, solder or P.C. board mounting
- ✧ Surge overload ratings 400 amperes
- ✧ Terminals solderable per MIL-STD-202, Method 208
- ✧ Typical I_R less than 0.2 uA
- ✧ High temperature soldering guaranteed: 260°C/ 10 seconds / .375", (9.5mm) lead lengths
- ✧ Isolated voltage from case to lead over 2500 volts

GBPC40 **GBPC40-M**



Dimensions in inches and (millimeters)

Maximum Ratings and Electrical Characteristics
Rating at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.
Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.
For capacitive load, derate current by 20%

Type Number		-005	-01	-02	-04	-06	-08	-10	Units
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage		50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS Voltage		35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC Blocking Voltage		50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum Average Forward Rectified Current @T_C= 55°C	GBPC40 GBPC50	40.0 50.0							A
Peak Forward Surge Current, Single Sine-wave Superimposed on Rated Load (JEDEC method)	GBPC40 GBPC50	400 400							A
Maximum Instantaneous Forward Voltage Drop Per Element at Specified Current	GBPC40 @20A GBPC50 @25A	1.1							V
Maximum DC Reverse Current at Rated DC Blocking Voltage Per Element		10							uA
Typical Thermal Resistance (Note 1) RθJC		1.5							°C/W
Operating and Storage Temperature Range T_J, T_{STG}		-50 to +150							°C

Notes. 1. Thermal Resistance from Junction to Case.
2. Suffix"M" - Terminal Location Face to Face.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RATINGS AND CHARACTERISTIC CURVES (GBPC40005 THRU GBPC4010 / GBPC50005 THRU GBPC5010)

FIG.1- MAXIMUM FORWARD CURRENT DERATING CURVE

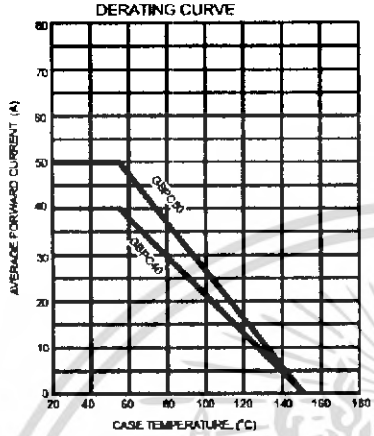


FIG.2- MAXIMUM NON-REPETITIVE FORWARD SURGE CURRENT

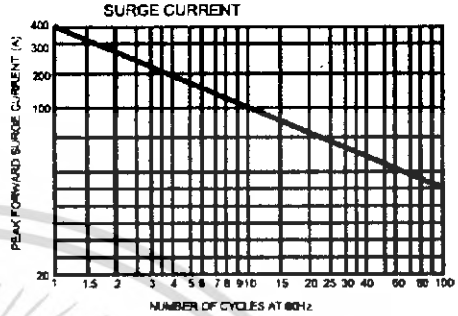


FIG.3- TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS PER BRIDGE ELEMENT

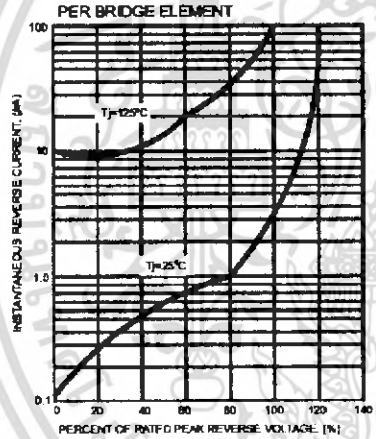
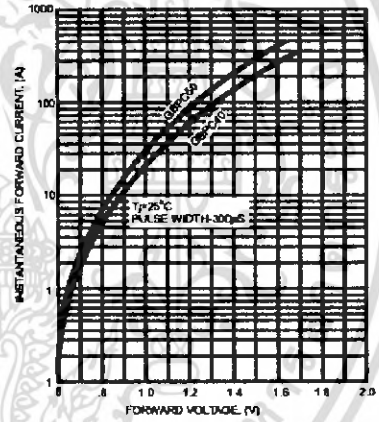


FIG.4- TYPICAL FORWARD CHARACTERISTICS PER BRIDGE ELEMENT



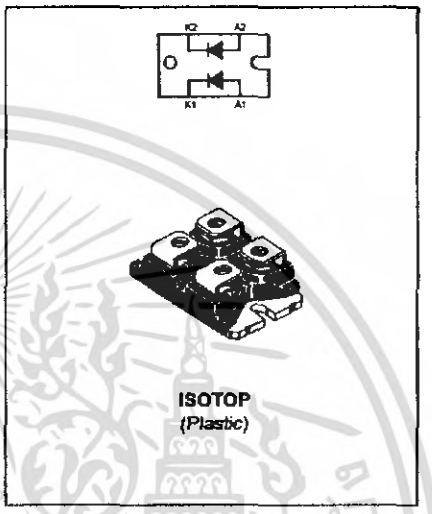
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BYV255V

HIGH EFFICIENCY FAST RECOVERY RECTIFIER DIODES

FEATURES

- SUITED FOR SMPS
- VERY LOW FORWARD LOSSES
- NEGLIGIBLE SWITCHING LOSSES
- HIGH SURGE CURRENT CAPABILITY
- HIGH AVALANCHE ENERGY CAPABILITY
- INSULATED :
  Insulating voltage = 2500 V_{RMS}
  Capacitance = 55 pF



ISOTOP
(Plastic)

DESCRIPTION

Dual rectifier suited for switchmode power supply and high frequency DC to DC converters.
Packaged in ISOTOP™ this device is intended for use in low voltage, high frequency inverters, free wheeling and polarity protection applications.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter			Value	Unit
$I_{F(RMS)}$	RMS forward current		Per diode	150	A
$I_{F(AV)}$	Average forward current δ = 0.5	Tc=110°C	Per diode	100	A
I_{FSM}	*Surge non repetitive forward current*	*tp=10ms* sinusoidal	*Per diode*	1600	A
Tstg Tj	Storage and junction temperature range			- 40 to + 150 - 40 to + 150	°C °C

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{RRM}	Repetitive peak reverse voltage	200	V

ISOTOP is a trademark of STMicroelectronics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMAL RESISTANCE

Symbol	Parameter		Value	Unit
Rth (j-c)	Junction to case	Per diode	0.4	°C/W
		Total	0.25	
Rth (c)	Coupling		0.1	°C/W

When the diodes 1 and 2 are used simultaneously :
Tj-Tc (diode 1) = P(diode 1) x Rth(j-c)(Per diode) + P(diode 2) x Rth(c)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Per diode)
STATIC CHARACTERISTICS

Symbol	Test Conditions		Min.	Typ.	Max.	Unit
I_R *	T_j = 25°C	$V_R = V_{RRM}$			100	µA
	T_j = 100°C				10	mA
V_F **	T_j = 125°C	I_F = 100 A			0.85	V
	T_j = 125°C	I_F = 200 A			1.00	
	T_j = 25°C	I_F = 200 A			1.15	

Pulse test : * tp = 5 ms, duty cycle < 2 %
** tp = 380 µs, duty cycle < 2 %

RECOVERY CHARACTERISTICS

Symbol	Test Conditions			Min.	Typ.	Max.	Unit
trr	T_j = 25°C	I_F = 0.5A I_R = 1A	Irr = 0.25A			55	ns
		I_F = 1A V_R = 30V	dI_F/dt = -50A/µs			80	
tfr	T_j = 25°C	I_F = 1A $V_{FR} = 1.1 \times V_F$	tr = 5 ns		10		ns
V_{FP}	T_j = 25°C	I_F = 1A	tr = 5 ns		1.5		V

TURN-OFF SWITCHING CHARACTERISTICS

Symbol	Test Conditions			Min.	Typ.	Max.	Unit
I_{RM}	T_j = 100°C	I_F = 100A Lp @ 0.05µH Vcc @ 0.6 V_{RRM}	dIF/dt = -200A/µs			16	A
			dI_F/dt = -400A/µs		24		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig.1 : Average forward power dissipation versus average forward current.

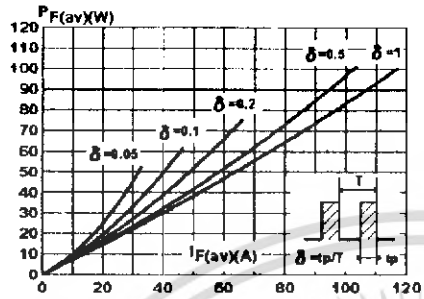


Fig.2 : Peak current versus form factor.

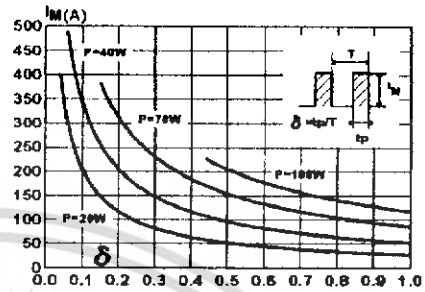


Fig.3 : Forward voltage drop versus forward current (maximum values).

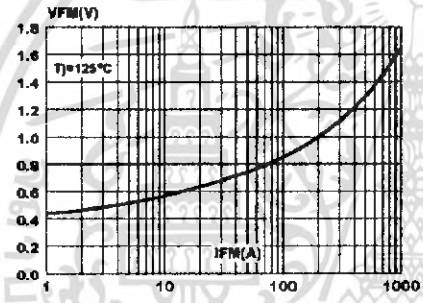


Fig.4 : Relative variation of thermal impedance junction to case versus pulse duration.

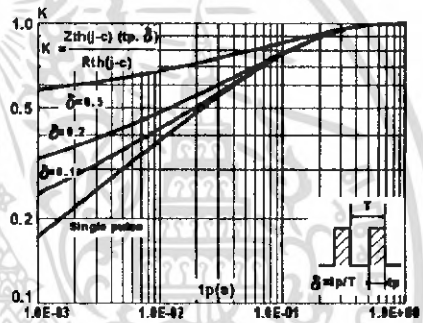


Fig.5 : Non repetitive surge peak forward current versus overload duration.

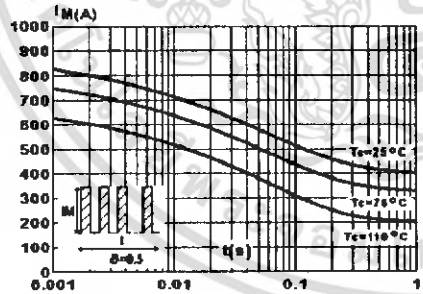
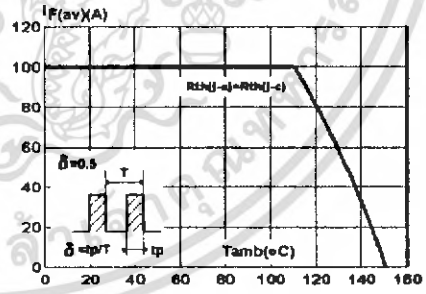


Fig.6 : Average current versus ambient temperature. (duty cycle : 0.5)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig.7 : Junction capacitance versus reverse voltage applied (Typical values)

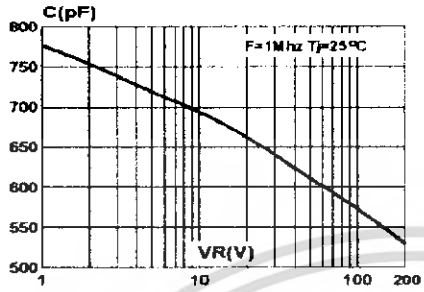


Fig.8 : Recovery charges versus dI_F/dt.

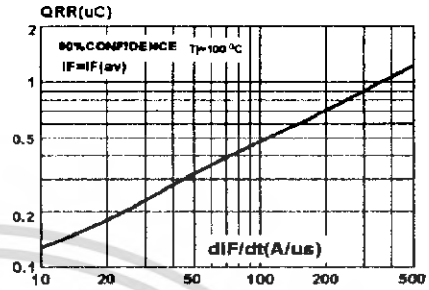


Fig.9 : Peak reverse current versus dIF/dt.

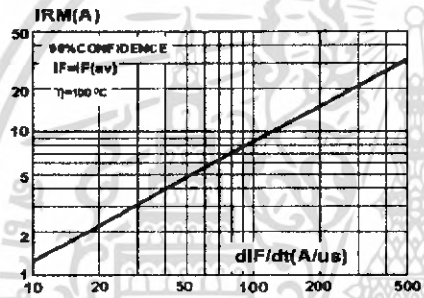
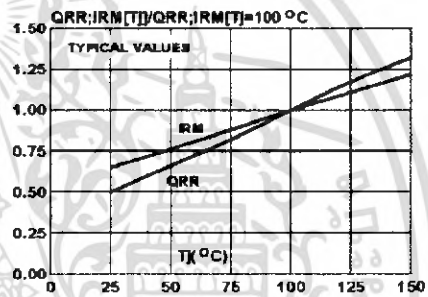
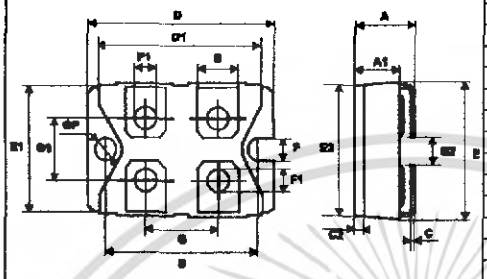


Fig.10 : Dynamic parameters versus junction temperature.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE MECHANICAL DATA
ISOTOP



REF.	DIMENSIONS			
	Millimeters		Inches	
	Min.	Max.	Min.	Max.
A	11.80	12.20	0.465	0.480
A1	8.90	9.10	0.350	0.358
B	7.8	8.20	0.307	0.323
C	0.75	0.85	0.030	0.033
C2	1.95	2.05	0.077	0.081
D	37.80	38.20	1.488	1.504
D1	31.50	31.70	1.240	1.248
E	25.15	25.50	0.990	1.004
E1	23.85	24.15	0.939	0.951
E2	24.80 typ.		0.976 typ.	
G	14.90	15.10	0.587	0.594
G1	12.60	12.80	0.496	0.504
G2	3.50	4.30	0.138	0.169
F	4.10	4.30	0.161	0.169
F1	4.60	5.00	0.181	0.197
P	4.00	4.30	0.157	0.69
P1	4.00	4.40	0.157	0.173
S	30.10	30.30	1.185	1.193

- **Marking** : Type number
- Cooling method : C
- Weight : 27 g
- Epoxy meets UL94, V0

Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied.
STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics

© 2000 STMicroelectronics - Printed in Italy - All rights reserved.

STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES
Australia - Brazil - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Italy - Japan - Malaysia
Malta - Morocco - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - U.S.A.

http://www.st.com

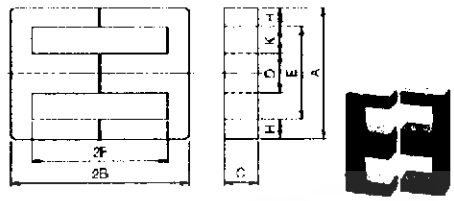
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(18/00)

TDK

EE Series

EE CORE
CORE SHAPES AND DIMENSIONS/CHARACTERISTICS

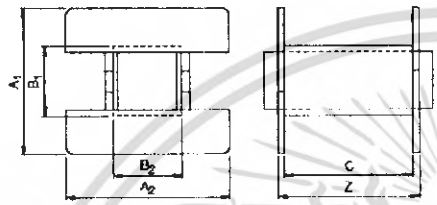


PRODUCT IDENTIFICATION

PE22 (1) EE (2) 320 × 250 × 20 (3) (4) (5)

(1) Material name
(2) Shape
(3) Dimension A
(4) Dimension 2B
(5) Dimension C

EE CORE BOBBIN



Bobbin is optional parts

Part No.	A_e*1 (nH/N²) ±25%	Dimensions (mm) A	2B	C	D	E	2F	H	R	K	K×2F(mm²)
PE22 EE70×91×19 PC40 EE70×91×19	3930 4910	70.0±1.5	91.0±1.0	19.5±0.5	19.5±0.5	48.5min.	71.0±1.0	10.0±0.5	0	15.3	1086
PE22 EE80×76×20 PC40 EE80×76×20	4580 5720	80.0±1.5	78.0±1.0	20.0±0.5	20.0±0.5	58.5min.	55.0±0.8	10.0±0.5	0.5max.	20.0	1100
PE22 EE90×56×16 PC40 EE90×56×16	5960 7360	90.0±2.0	56.4±1.0	16.5±0.5	26.0±1.0	68.0min.	30.4±1.0	12.5±0.5	0.8max.	20.0	608
PE22 EE320×260×20*2 PC40 EE320×250×20*2	— —	320.0±5.0	250.0±1.0	20.0±1.0	100.0±2.4	217.0min.	150.0±3.0	50.0±1.0	0	60.0	7950
PE22 EE70×108×31N PC40 EE70×108×31N	6360 7870	70.0±1.5	108.0±1.0	31.6±0.5	22.2±0.5	48.3min.	85.6±1.0	11.1±0.5	2.0max.	12.8	1096

*1 Measuring condition: T=23°C, f=16kHz, H_m=0.4A/m
*2 EE320×250×20-Z is a bonded product.

Part No.	Core factor C1(mm⁻¹)	C2×10⁻²(mm⁻³)	A_e(mm²)	ℓ_e(mm)	V_e(mm³)	Weight (g)
PE22 EE70×91×19 PC40 EE70×91×19	0.52779	0.13689	386	204	78690	394
PE22 EE80×76×20 PC40 EE80×76×20	0.44878	0.11058	406	182	73910	372
PE22 EE90×56×16 PC40 EE90×56×16	0.93583	0.08009	419	141	58050	306
PE22 EE320×260×20 PC40 EE320×250×20	0.28854	0.01443	2000	577	1154160	6150
PE22 EE70×108×31N PC40 EE70×108×31N	0.32992	0.04695	703	232	162900	815

EE CORE BOBBIN

Part No.	Dimensions (mm) A1	A2	B1	B2	C	Z	Cross-sectional winding area A_w(mm²)	Average winding length ℓ_w(mm)	Weight (g)	Material
BE-80-S	56.5±0.5	61.0±0.5	25.2±0.5	25.2±0.5	47.5±2.5	51.5±2.5	747	168	32	PBT
BE-80-W	56.5±0.5	81.5±0.7	25.2±0.5	45.6±0.5	47.5±2.5	51.5±2.5	747	209	41	PBT

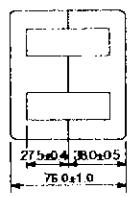
• All specifications are subject to change without notice.

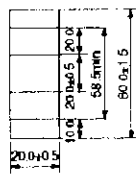
001-02 / 20060428 / e18_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TDK

EE80X76X20





Parameter

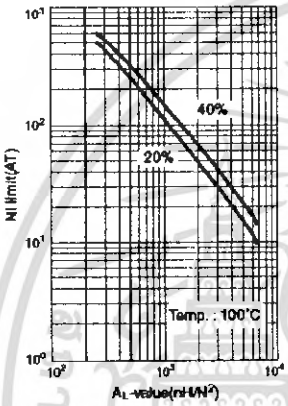
Core constant	C_1	mm^{-1}	0.44878
	$C_2 \times 10^{-2}$	mm^{-3}	0.1105
Effective magnetic path length	ℓ_e	mm	182
Effective cross-sectional area	A_e	mm^2	406
Effective core volume	V_e	mm^3	73910
Cross-sectional center leg area	A_c	mm^2	400
Minimum cross-sectional area	Amin.*	mm^2	400LC*
Winding cross-sectional area	A_w	mm^2	1100
Weight(approx.)		g	372

* The symbol followed Amin. value shows minimum cross-sectional area part. C is center pole part, L is outer pole part, B is the back part

Part No.	A_L-value*(nH/N²)	Calculated output power(kW) (forward converter mode)
PE22 EE80X76X20	4560±25%	1.4(100kHz)
PC40 EE80X76X20	5720±25%	1.5(100kHz)

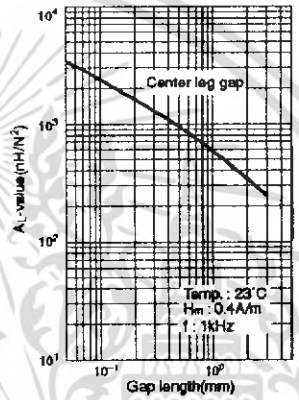
* A_L-value: T=23°C, f=1kHz, Hm=0.4A/m

NI limit vs. A_L-value for PE22 EE80X76X20

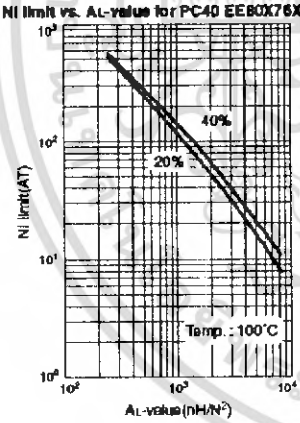


When applied magnetic field providing NI to a setting core for arbitrary A_L-value, show each NI value when decreased 20% and 40% from initial A_L-value.

A_L-value vs. Air gap length for PE22 EE80X76X20

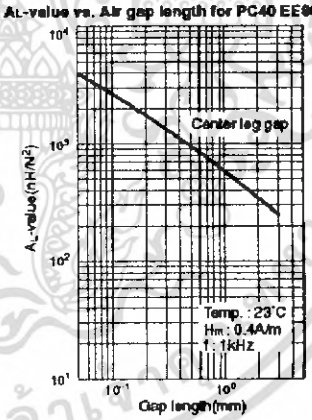


NI limit vs. A_L-value for PC40 EE80X76X20



When applied magnetic field providing NI to a setting core for arbitrary A_L-value, show each NI value when decreased 20% and 40% from initial A_L-value.

A_L-value vs. Air gap length for PC40 EE80X76X20



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wire Gauge Table

A.W.G. in the table stands for American Wire Gauge (or Brown & Sharpe Wire Gauge)
S.W.G. stands for British Standard Wire Gauge. B.W.G. stands for Birmingham Wire Gauge.

Gauge			Diameter	Area	Gauge			Diameter	Area	Gauge			Diameter	Area
A.W.G. (B&S)	S.W.G	B.W.G.	mm	mm^2	A.W.G. (B.S)	S.W.G	B.W.G.	mm	mm^2	A.W.G. (B.S)	S.W.G	B.W.G.	mm	mm^2
-	7/0	5/0	12.700	126.7	-	-	13	2.413	4.573	-	31	-	0.295	0.06819
-	6/0	-	11.786	109.1	-	11	-	2.337	4.289	29	-	-	0.286	0.06422
4/0	-	-	11.684	107.2	11	-	-	2.305	4.172	-	32	-	0.274	0.05900
-	-	4/0	11.532	104.4	-	-	14	2.108	3.491	30	-	-	0.255	0.05097
-	5/0	-	10.973	94.56	12	-	-	2.053	3.309	-	31	31	0.254	0.05067
-	-	3/0	10.795	91.52	-	14	-	2.032	3.243	-	34	-	0.234	0.04289
3/0	-	-	10.404	85.03	-	15	15	1.829	2.627	-	-	32	0.229	0.04104
-	4/0	-	10.160	81.07	13	-	-	1.826	2.624	31	-	-	0.227	0.04039
-	-	2/0	9.652	73.17	-	-	16	1.651	2.141	-	35	-	0.213	0.03575
-	3/0	-	9.449	70.12	14	-	-	1.628	2.081	-	-	33	0.203	0.03243
2/0	-	-	9.266	67.42	-	16	-	1.626	2.075	32	-	-	0.202	0.03203
-	2/0	-	8.839	61.36	-	-	17	1.473	1.705	-	36	-	0.199	0.02927
-	-	1/0	8.636	58.58	15	-	-	1.450	1.650	33	-	-	0.180	0.02540
1/0	-	-	8.252	53.49	-	17	-	1.422	1.589	-	-	34	0.178	0.02483
-	1/0	-	8.230	53.19	16	-	-	1.291	1.309	-	37	-	0.173	0.02343
-	1	1	7.620	45.60	-	-	18	1.245	1.217	34	-	-	0.160	0.02014
1	-	-	7.348	42.41	-	18	-	1.219	1.167	-	38	-	0.152	0.01824
-	-	2	7.214	40.87	17	-	-	1.150	1.037	35	-	-	0.143	0.01597
-	2	-	7.010	38.60	-	-	19	1.067	0.8938	-	39	-	0.132	0.01370
-	-	3	6.579	33.99	18	-	-	1.024	0.8226	36	-	35	0.127	0.01267
2	-	-	6.544	33.63	-	19	-	1.016	0.8107	-	40	-	0.122	0.01167
-	3	-	6.401	32.18	-	20	-	0.914	0.6567	37	-	-	0.113	0.01005
-	-	4	6.045	28.70	19	-	-	0.912	0.6529	-	41	-	0.112	0.009810
-	4	-	5.893	27.27	-	-	20	0.889	0.6207	-	42	36	0.102	0.008107
3	-	-	5.827	26.66	-	21	21	0.813	0.5189	38	-	-	0.101	0.007968
-	-	5	5.588	24.52	20	-	-	0.812	0.5174	-	43	-	0.0914	0.006567
-	5	-	5.385	22.77	21	-	-	0.723	0.4105	39	-	-	0.0897	0.006319
4	-	-	5.189	21.15	-	22	22	0.711	0.3973	-	44	-	0.0813	0.005189
-	-	6	5.156	20.88	22	-	-	0.644	0.3256	40	-	-	0.0799	0.005012
-	6	-	4.877	18.68	-	23	23	0.635	0.3167	41	45	-	0.0711	0.003973
5	-	-	4.621	16.77	-	-	-	0.610	0.2919	42	-	-	0.0633	0.003151
-	-	7	4.572	16.42	23	-	-	0.575	0.2581	-	46	-	0.0610	0.002919
-	7	-	4.470	15.70	-	24	24	0.559	0.2452	43	-	-	0.0544	0.002499
-	-	8	4.191	13.80	24	-	-	0.511	0.2047	-	47	-	0.0508	0.002027
6	-	-	4.115	13.30	-	25	25	0.508	0.2027	44	-	-	0.0502	0.001982
-	8	-	4.064	12.97	-	26	26	0.457	0.1642	45	-	-	0.0447	0.001572
-	-	9	3.759	11.10	25	-	-	0.455	0.1623	-	48	-	0.0406	0.001297
7	-	-	3.665	10.55	-	27	-	0.417	0.1363	46	-	-	0.0398	0.001246
-	9	-	3.658	10.51	-	-	27	0.406	0.1297	47	-	-	0.0355	0.0009884
-	-	10	3.404	9.098	26	-	-	0.405	0.1288	48	-	-	0.0316	0.0007838
8	-	-	3.264	8.368	-	28	-	0.376	0.1110	-	49	-	0.0305	0.0007297
-	10	-	3.251	8.302	27	-	-	0.361	0.1021	49	-	-	0.0281	0.0006216
-	-	11	3.048	7.297	-	-	28	0.356	0.09932	-	50	-	0.0254	0.0005067
-	11	-	2.946	6.818	-	29	-	0.345	0.09372	50	-	-	0.0251	0.0004929
9	-	-	2.906	6.632	-	-	29	0.330	0.08543					
-	-	12	2.769	6.020	28	-	-	0.321	0.08097					
-	12	-	2.642	5.481	-	30	-	0.315	0.07791					
10	-	-	2.588	5.262	-	-	30	0.305	0.07297					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้