

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**รถไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง
FUEL CELL ELECTRIC VEHICLE**



โดย
นาย เฉลิม แสงภูเขียว
นาย มาโนช เพชร آهن
นาย วินัย กล้าเกิดผล
นาย อิศรา วงษ์เทศ

รฟค.
ค ๒๑๑๖
๒๕๕๐

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 81807
วัน,เดือน,ปี..... ๒๔ ส.ย. ๒๕๕๑

b. 119 3635b
i.....

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๕๐**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

รถไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง
FUEL CELL ELECTRIC VEHICLE



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง รถไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง

ผู้จัดทำ



1. นาย เฉลิม แชนกษีเยว
2. นาย มาโนช เพชรแอน
3. นาย วินัย กล้าเกิดผล
4. นาย อิศรา วงษ์เทศ

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง

นาย เฉลิม แสงภูเขียว

นาย มาโนช เพชรแอน

นาย วินัย กล้าเกิดผล

นาย อิศรา วงษ์เทศ

รศ.ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอรถไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 24 V, 400 W ที่สามารถวิ่งด้วยความเร็ว 25 กม./ชม. รถไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงใช้พลังงานอยู่ 3 พลังงาน คือ แบตเตอรี่ ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาด 30V 29F และเซลล์เชื้อเพลิง ขนาด 24 V 500 W 40 เซลล์ระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยมีพลังงานหลัก คือ เซลล์เชื้อเพลิง ส่วนของแบตเตอรี่นั้นนำมาใช้ในส่วนของการเริ่มให้ระบบทำงานเท่านั้น และซูเปอร์คาปาซิเตอร์ช่วยในการรักษาเสถียรภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อรถไฟฟ้าเริ่มทำงาน การพัฒนาศักยภาพของรถไฟฟ้าในปัจจุบันได้ทำการออกแบบวงจรควบคุมแบ่งออกเป็น วงจรลดระดับแรงดันโดยนำไปใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ดูดออกซิเจนจากอากาศเพื่อให้ออกซิเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง อย่างเหมาะสม และวงจรควบคุมการสตาร์ทของระบบเพื่อจ่ายต่อผู้ขับขี่โดยสามารถควบคุมการทำงานของไฮโดรเจนทางด้านเข้าและทางด้านออกได้อัตโนมัติ ผลการทดลองแสดงให้เห็นสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจากโพลีเอทิลีนทรีนิกส์และจากการทดลองขับรถไฟฟ้าว่าขึ้นอยู่กับปริมาณของไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ไหลเข้าไปสู่เซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสม การระบายความร้อนด้วยพัดลมดูดอากาศและระบบการควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงอย่างเหมาะสม เช่นความถี่ในการปล่อยอากาศออกเพื่อให้ไฮโดรเจนไหลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FUEL CELL ELECTRIC VEHICLE

Mr. Chaloeem Sangpukiev

Mr. Manote Pethann

Mr. Winai Klakerdphon

Mr. Itsala Wongthas

Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern Advisor

2007

ABSTRACT

This thesis presents the development of electric car driving by proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) using permanent magnet DC motor rated 24 V, 400W run with the speed 25 km/h. Three energy sources are: PEMFC 24 V 500 W 40 cells air cooling, 29 F 30 V super capacitor and small relay coil battery. The battery is used only for start up the PEMFC. The car development is designed circuit controls to maintain the voltage level for suitable air suction control. The second circuit is controlled by one switch for starting the system and controlling the quantity of the hydrogen and its cycle. The experimental results show the PEMFC performance both in electronic load and driving test. The optimizing flow rates of hydrogen and oxygen are the key factors for improving the PEMFC performance including air cooling and perch rate.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำและปรึกษาของ รศ.ดร. วีระเชษฐ
 ชันเงิน ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท ทางคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาจากท่านและ
 ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือ
 ตลอดมา

ขอขอบพระคุณพี่ๆ ห้องปฏิบัติการทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Lab EMC) ที่คอยให้ความช่วยเหลือใน
 การวิจัยจนสำเร็จ และขอขอบคุณเพื่อนๆห้อง W ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือในการวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่เป็นทุกสิ่งทุกอย่างที่เป็นผู้ให้ที่ยิ่งใหญ่และเป็นกำลังใจ
 ที่สำคัญของคณะผู้จัดทำ

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	4
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	5
2.1.1 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง.....	6
2.1.2 โครงสร้าง Fuel Cell.....	9
2.1.3 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	10
2.1.4 สรุปข้อดีและข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิง.....	16
2.1.5 ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม.....	16
2.1.6 คุณสมบัติของก๊าซไฮโดรเจน.....	17
2.2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของกำลังไฟฟ้า.....	20
2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม(Series).....	21
2.4 การคำนวณหาพิกัดกำลังของมอเตอร์.....	22
2.5 การควบคุมความเร็วมอเตอร์.....	23
2.6 มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET).....	23
2.6.1 การทำงานของมอสเฟตกำลัง.....	23
2.6.2 วงจรสมมูลของมอสเฟต.....	24
2.6.3 แรงดันสไปต์.....	25
2.6.4 ข้อดีของการใช้มอสเฟต.....	26
2.7 วงจรบ๊ีกคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter).....	27
2.8 TL-494.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.9 พังก์ชันถ่ายโอนของ PWM	30
2.10 วงจรขยายความผิดพลาดที่มีการชดเชย.....	31
2.11 การประมวลผลสัญญาณ	33
2.11.1 คุณสมบัติเด่นโดยรวมของ dsPIC.....	33
2.11.2 แนะนำ dsPIC.....	35
2.11.3 สถาปัตยกรรมโดยสรุปของ dsPIC30F2010	38
2.11.4 โครงสร้างทางโปรแกรมที่ควรทราบ	40
2.11.5 JX-dsPIC3010	43
บทที่ 3 การออกแบบวงจรควบคุม	
3.1 การออกแบบวงจรควบคุม Buck Converter โดยใช้ TL494.....	45
3.1.1 สิ่งที่เป็นในการออกแบบวงจรควบคุมกระแสและแรงดัน.....	45
3.1.2 การทำงานของ RCD สนับเบอร์.....	46
3.1.3 การออกแบบวงจร Buck Converter เพื่อควบคุมกระแสและแรงดัน.....	48
3.1.4 ตัวเหนี่ยวนำ	51
3.1.5 ตัวเก็บประจุ.....	53
3.2 ออกแบบวงจร Start ระบบ PEMFC โดย Micron roller	55
3.2.1 โครงสร้างของ dsPIC3010	55
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 วัตถุประสงค์.....	59
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	59
4.3 ชุดทดสอบ Voltage Control Dc-Dc Buck Converter.....	59
4.4 การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในการจ่ายโหลดโดยใช้โหลดอิเล็กทรอนิกส์.....	62
4.5 การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบ	68
4.5.1 การสูญเสียของพัดลมระบายอากาศของ PEMFC.....	68
4.5.2 การสูญเสียของพัดลมระบายของ Buck Converter.....	68
4.5.3 พัดลมดูดอากาศ.....	68
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 บทสรุป.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
5.3 สิ่งที่ควรดำเนินงานต่อ	73

สารบัญรูปภาพ

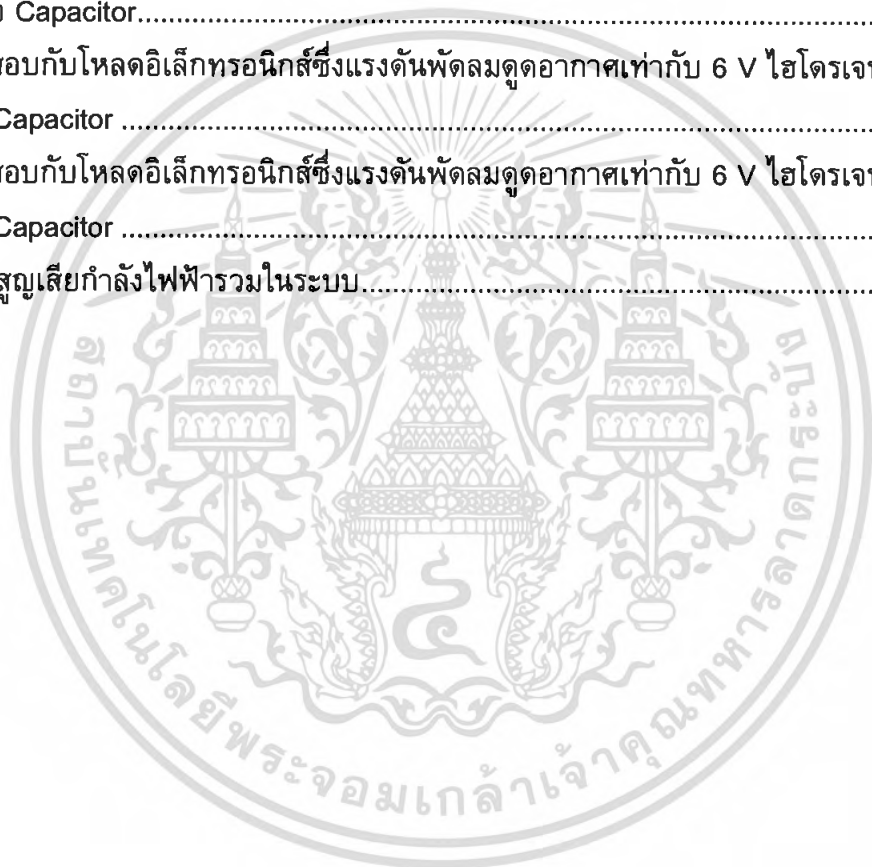
ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง.....	9
2.2 เมื่อส่งผ่านก๊าซไฮโดรเจน.....	11
2.3 ไฮโดรเจนปล่อยเข้าทางด้านแอโนด.....	11
2.4 เมื่อก๊าซไปสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาก็คงเกิดการแตกตัวออกเป็นโปรตอนและ อิเล็กตรอน	12
2.5 โดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยังวงจรภายนอกส่วนโปรตอนนั้นจะผ่านช่องเมมเบรน.....	12
2.6 อะตอมของออกซิเจนซึ่งแตกตัวโดยการเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นโมเลกุลของน้ำ.....	13
2.7 โมเลกุลของน้ำและจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ.....	13
2.8 กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน.....	14
2.9 ถึงความดันสูง.....	17
2.10 ถึงความดันสูง.....	18
2.11 การเก็บในลูกแก้ว.....	18
2.12 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	20
2.13 แสดงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม(Series).....	21
2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิด.....	22
2.16 แสดงการทำงานของมอสเฟต.....	24
2.17 วงจรสมมูลย์ของมอสเฟต.....	24
2.18 การป้องกันแรงดันสไปต์คร่อม เกต-ซอร์ต.....	25
2.19 ก. การป้องกันแรงดันสไปต์คร่อม เทรน-ซอร์ต.....	26
ข. ไม่ได้ต่อคาปาซิเตอร์	
ค. เมื่อต่อคาปาซิเตอร์	
2.20 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์.....	27
2.21 แสดงการทำงานของ TL494.....	29
2.22 กระบวนการ PWM จะมีค่าแรงดันด้านออก.....	30
2.23 ก. Type 2 วงจรขยายความผิดพลาด.....	32
ข. ผลตอบสนองเชิงความถี่	
2.24 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนควบคุม.....	33
2.25 ไตอะแกรมการทำงานและส่วนประกอบของ dsPIC30F2010.....	35
2.26 การจัดหาใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	36

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.27 โครงสร้างทางโปรแกรม.....	41
3.1 กราฟความถี่.....	46
3.2 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์.....	49
3.3 วงจรกำลังของ Voltage Control	49
3.4 ผลการ Simulation ที่ค่า Duty = 0.14 ,Vout=5V,Vin=36V,L=36uH,C=746uF.....	50
3.5 ผลการ Simulation ที่ค่า Duty = 0.14 ,Vout=5V,Vin=36V,L=50uH,C=100uF.....	50
3.6 ผลการ Simulation ที่ค่า Duty = 0.14 ,Vout=5V,Vin=36V,L=70uH,C=1000uF.....	50
3.7 แกนแม่เหล็กแบบทรอลอยด์.....	52
3.8 โครงสร้างของ Microcontroller	55
3.9 Flow Chart การทำงาน.....	56
3.10 วงจร Start ระบบ PEMFC โดยใช้ Microcontroller.....	57
4.1 วงจร Buck Converter.....	59
4.2 ชุดวงจร Buck Converter.....	60
4.3 รูปสัญญาณพัลส์ของมอเตอร์ดูดอากาศขณะไม่มีโหลด.....	60
4.4 รูปสัญญาณพัลส์ของมอเตอร์ดูดอากาศขณะมีโหลด.....	61
4.5 การต่อวงจรทดสอบการจ่ายพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยชุดโหลดอิเล็กทรอนิกส์.....	62
4.6 กราฟ Flow Meter.....	63
4.7 กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่ความดันไฮโดรเจน30mmไม่ต่อCapacitor ...	64
4.8 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์กระแสกลับกำลังไฟฟ้าไม่ต่อCapacitor.....	64
4.9 กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่ความดันไฮโดรเจน30mmต่อCapacitor	65
4.10 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์กระแสกลับกำลังไฟฟ้าต่อCapacitor.....	66
4.11 กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่ความดันไฮโดรเจน20mmต่อCapacitor	67
4.12 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์กระแสกลับกำลังไฟฟ้าต่อCapacitor	67
4.13 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์กระแสกลับกำลังไฟฟ้าขนาดความดัน 20กับ30mm	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบเซลล์เชื้อเพลิงกับแหล่งจ่ายอื่น.....	9
3.1 การเปรียบเทียบ Powder Core	52
3.2 พิกัดและชนิดของตัวเก็บประจุ	53
3.2 (ต่อ)พิกัดและชนิดของตัวเก็บประจุ	54
4.1 ผลการทดลองของวงจร Buck Converter	61
4.2 ทดสอบกับโพลดิอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งแรงดันพัลสมุดูดอากาศเท่ากับ 6 V ไฮโดรเจน 30 mm ไม่ต่อ Capacitor.....	64
4.3 ทดสอบกับโพลดิอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งแรงดันพัลสมุดูดอากาศเท่ากับ 6 V ไฮโดรเจน 30 mm ต่อ Capacitor	65
4.4 ทดสอบกับโพลดิอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งแรงดันพัลสมุดูดอากาศเท่ากับ 6 V ไฮโดรเจน 20 mm ต่อ Capacitor	67
4.5 การสูญเสียกำลังไฟฟารวมในระบบ.....	69



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีความต้องการใช้ยานพาหนะมีมากขึ้นทุกปี ส่วนใหญ่พลังงานที่ใช้จะเป็นพลังงานน้ำมันในการขับเคลื่อน และเป็นต้นกำลังในการทำงานของระบบต่างๆภายในยานพาหนะ น้ำมันจึงมีความสำคัญมากกับยานพาหนะทุกประเภทแต่ในปัจจุบันเมื่อมีการใช้ยานพาหนะเพิ่มมากขึ้นทุกวัน แต่น้ำมันไม่มีความสามารถในการเพิ่มจำนวนได้เพราะว่าน้ำมันต้องใช้ระยะเวลาที่จะเกิดเชื้อเพลิงที่ได้ดิน และอีกประเด็นคือน้ำมันค่อนข้างทำให้เกิดมลภาวะ ในปัจจุบันจึงมีการมองเห็นถึงปัญหาน้ำมันกำลังจะหมดไปภายในอีกไม่กี่ปีข้างหน้า ผู้ผลิตน้ำมันรายใหญ่ของโลกจึงได้ทำการลดกำลังการผลิตน้ำมันเพื่อเป็นการต่ออายุให้กับน้ำมันหลายๆ ประเทศโดยเฉพาะประเทศที่กำลังพัฒนาอย่างประเทศไทยจึงได้ประสบปัญหาเกี่ยวกับราคาน้ำมันที่มีความรุนแรงมากขึ้น หลายประเทศจึงได้มีการออกมาตรการมาหลายอย่างแต่อย่างไรก็ตามมาตรการที่ออกมาต่างๆเหล่านั้นเป็นการแก้ปัญหาได้ในระยะสั้นๆเท่านั้นไม่สามารถที่จะแก้ปัญหาในระยะยาวได้

เราจึงคิดที่จะนำพลังงานทดแทนมาใช้ให้มากขึ้น โดยใช้การผสมผสานพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ Supper Capacitor และแบตเตอรี่ซึ่งทำหน้าที่ Start ในช่วงแรกหลังจากนั้นพลังงานที่นำมาจ่ายให้กลับ Load ก็จะมาจากรถเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งถือได้ว่าเป็นรถยนต์แบบที่ไม่ใช้พลังงานจากน้ำมันและไร้มลภาวะต่างๆ พลังงานที่นำมาขับเคลื่อนรถไฟฟ้าจะได้จากก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานใหม่ที่สำคัญในอนาคต และจะเป็นแนวทางในการออกแบบรถยนต์รุ่นใหม่ ๆ อีกต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนารถยนต์ในอนาคตที่คาดว่าจะมีการปฏิวัติวงการเรื่องพลังงานน้ำมันอันเนื่องมาจากราคาน้ำมันที่มีแนวโน้มว่าจะมีราคาแพงมากขึ้นเรื่อยๆ
2. เพื่อเป็นการลดใช้พลังงานน้ำมันซึ่งประเทศไทยไม่สามารถผลิตได้เอง และได้นำเข้ามาเป็นจำนวนหลายล้านบาทแล้ว ต่อปีทำให้ประเทศไทยต้องเสียดุลการค้าทางด้านนี้มาเป็นเวลานานแล้ว
3. เพื่อเป็นยานพาหนะที่เป็นต้นแบบในการอนุรักษ์ธรรมชาติ ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม เพราะไม่มีการเผาไหม้ทำให้ก๊าซ (Carbon dioxide) ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศที่ทำสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน
4. เพื่อเป็นการรณรงค์ยานพาหนะที่ไม่มีเสียงรบกวน ที่ทำให้เกิดการรบกวนบุคคลรอบข้าง

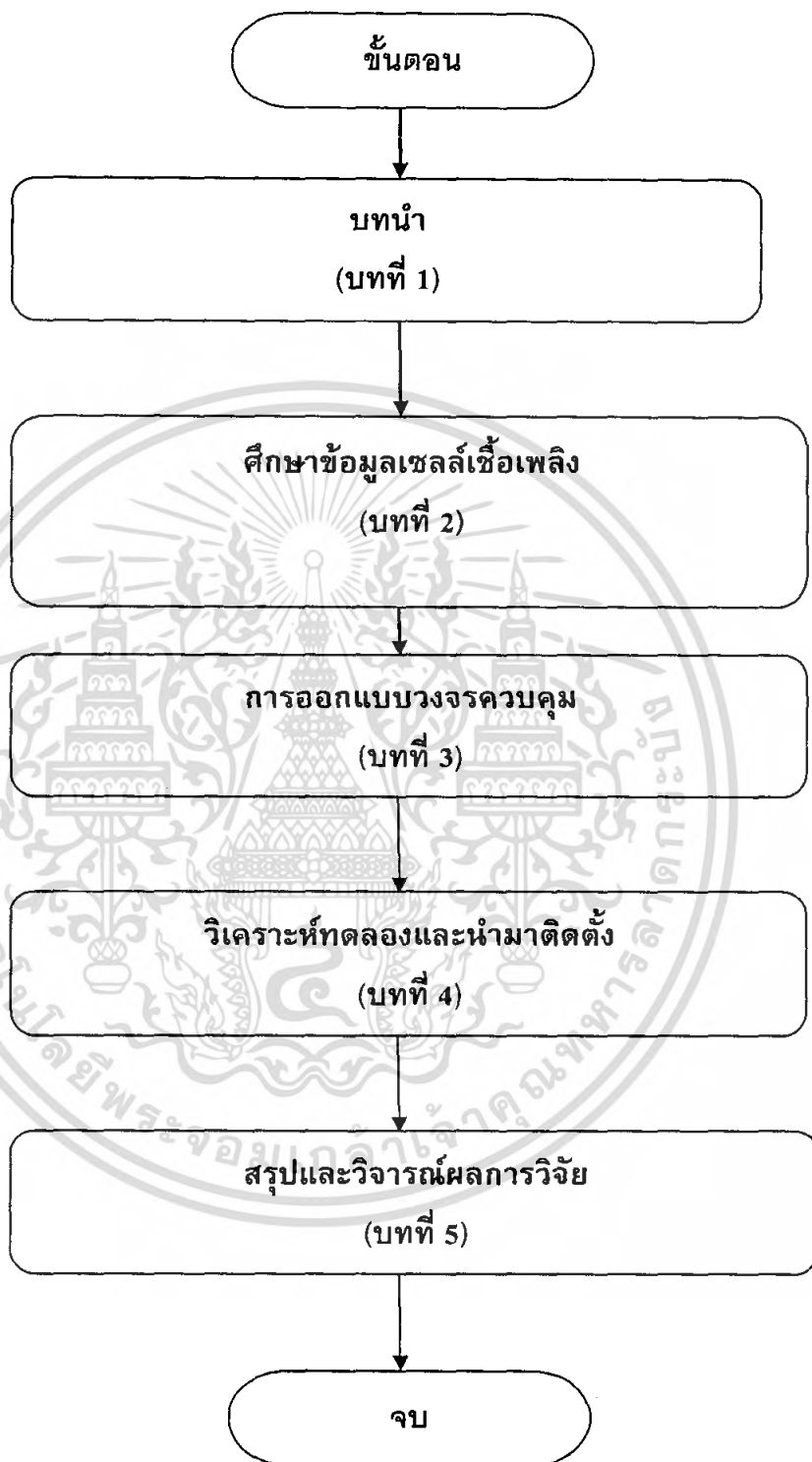
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. ศึกษาและวิจัยหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ
2. ศึกษาและวิจัยหลักการทำงานของ DC-DC Buck converter, และการสร้างสัญญาณ PWM จากจาก TL494 เพื่อใช้ในการ ควบคุมแรงดันแบบ Close Loop
3. ศึกษาและวิจัยความเร็วของมอเตอร์ดูดอากาศว่ามีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง มากน้อยเพียงใด
4. ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะเซลล์เชื้อเพลิง ทำงานว่ามีผลกระทบกับแรงดันและกระแส output ที่ออกมาจากระบบการแยกไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอย่างไร
5. ศึกษาอัตราการไหลของ Hydrogen ว่า เซลล์เชื้อเพลิง มีการใช้ปริมาณ Hydrogen มากน้อยเท่าใด

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลจากปริญาณิพนธ์เก่าที่มีมาและจาก Internet
2. ศึกษาการควบคุมสัญญาณ PWM โดยใช้ TL494 และ microcontroller เพื่อนำมาใช้ควบคุมกระแสและแรงดัน
3. ศึกษาโครงสร้างและการทำงานแบบสวิตซ์ซิ่งของมอเตอร์กำลังแบบต่างๆและการทำงานของมอเตอร์เฟสในสภาวะต่างๆ
4. ศึกษาการทำงานของ Voltage Control ที่มี output Voltage น้อยกว่า input Voltage โดยมีการควบคุมแรงดันและกระแสด้าน Output เพื่อให้ป้องกันตัวเซลล์เชื้อเพลิง
5. ศึกษาการทำงานของ Fuel Cell ชนิด PEM ว่ามีหลักการทำงานอย่างไรและสามารถสร้างพลังงานในรูปแบบไหนได้บ้าง
6. ออกแบบวงจร Start เซลล์เชื้อเพลิง อัตโนมัติโดยใช้ Microcontroller ควบคุม
7. ออกแบบวงจร Buck Converter เพื่อนำไปควบคุมแรงดันและกระแสที่จ่ายให้กลับมอเตอร์ Blower





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. มีความรู้ความเข้าใจในระบบของ Fuel Cell ชนิด PEM ว่าทำงานอย่างไรและมีการนำพลังงาน Hydrogen มาใช้ในการขับเคลื่อนพลังงานไฟฟ้าได้อย่างไร
2. มีความรู้ความเข้าใจในหลักการการทำงานของ Voltage and Current Control แล้วนำมาประยุกต์ใช้กับงานอื่นได้
3. มีความรู้ความเข้าใจหลักการการทำงานของ DC-DC Converter แบบ Buck Converter ทั้งแบบ OPEN LOOP และ CLOSE LOOP สามารถบอกถึงความแตกต่างของ OPEN LOOP และ CLOSE LOOP
5. มีความรู้ความเข้าใจในการใช้โปรแกรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรควบคุมแรงดันและกระแส
5. สามารถนำเซลล์เชื้อเพลิงมาประกอบและนำมาติดตั้งในรถเพื่อใช้งานจริงได้

1.6 แผนการดำเนินงาน

หัวข้อการดำเนินงาน	2550						2551			
	ส.ย.	ก.ค.	ต.ค.	ก.ย.	ธ.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.บทนำ										
2. ศึกษาข้อมูลเซลล์เชื้อเพลิง										
3. ออกแบบวงจรควบคุม										
4.วิเคราะห์ทดลองและนำมาติดตั้ง										
5.สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย										

 แผนการดำเนินงานที่กำหนดไว้
 แผนการดำเนินงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง คือ อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี-ไฟฟ้า ระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจนซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานของเชื้อเพลิง ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ไม่ต้องผ่านการเผาไหม้ ทำให้เครื่องยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงนี้ไม่ก่อมลภาวะทางอากาศ ทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงกว่า เครื่องยนต์เผาไหม้ 1-3 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงและชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายแบบขึ้นอยู่กับสารที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเช่นเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน-ออกซิเจน ไฮโดรเจน-ไฮโดรคาร์บอน โพรเพน-ออกซิเจน เป็นต้น และชนิดที่เป็นที่นิยมใช้คือ เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน-ออกซิเจน เพราะเมื่อปฏิกิริยาในเซลล์เกิดขึ้นแล้วนอกจากพลังงานจะได้น้ำบริสุทธิ์และความร้อนไว้ใช้ตามความเหมาะสมด้วยนอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ยังไม่ชั้นบรรยากาศโอโซนเพราะไม่ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เช่นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะคล้ายกับเซลล์สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่วหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า แบตเตอรี่ ในด้านที่สามารถอัดประจุใหม่ได้เรื่อยๆ เซลล์เชื้อเพลิงยังไม่เป็นที่นิยมใช้ทั่วไปอย่าง แบตเตอรี่ เพราะต้นทุนการผลิตอุปกรณ์ในครั้งแรกสูงและยังมีอันตรายที่ต้องใช้ความรู้เฉพาะ ความคุมหลายประการ แต่ในปัจจุบันได้นำมาใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิดเช่น โทรศัพท์มือถือ ปาล์ม notebook

ความเป็นมา

เซลล์เชื้อเพลิงถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1839 โดยเซอร์วิลเลียม โรเบิร์ต โกรฟ (Sir William Robert Grove) ผู้พิพากษาชาวเวลส์ที่มีความเป็นนักประดิษฐ์และนักฟิสิกส์ โดยเขามีความเชื่อว่าเมื่อเราสามารถแยกน้ำด้วยไฟฟ้าได้ก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซออกซิเจนในทางกลับกันหากผสมก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนด้วยวิธีที่เหมาะสมก็ควรจะได้พลังงานไฟฟ้าออกมาเช่นกันดังนั้นเขาจึงเริ่มสร้างเครื่องมือทดลองที่เรียกว่า "ก๊าซแบตเตอรี่" ออกมาเครื่องมือของโกรฟถือว่าเป็นต้นแบบของเซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบันหลังจากทดลองอยู่นานหลายปี ในที่สุดเขาได้ทดลองผสมไฮโดรเจน และออกซิเจนในสารละลายเล็กโทรไลต์คือ กรดซัลฟูริกและใช้ขั้วแพลทินัมทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและน้ำแต่ว่าในขณะนั้นสิ่งประดิษฐ์ของโกรฟยังไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมามากพอที่จะใช้งานได้

คำว่า "fuel cell" ถูกใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1889 โดยลุดวิก มอนด์ (Ludwig Mond) และชาร์ลส์ แลงเกอร์ (Charles Langer) ทั้งสองพยายามประดิษฐ์เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้งานได้จริงโดยใช้อากาศและก๊าซถ่านหิน (coal gas) นอกจากนักประดิษฐ์ทั้งสองคนแล้ว วิลเลียม ไวท์ จาคส์ (William White Jaques) ก็เป็นอีกผู้หนึ่งที่ถูกบันทึกว่าเป็นผู้เริ่มใช้คำนี้เช่นกัน โดยจาคส์เป็นนักวิจัยคนแรกที่ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารละลายเล็กโทรไลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

Fuel Cells มีหลายชนิด แต่ทุกชนิดจะให้กระแสไฟฟ้าออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่สามารถนำไปขับมอเตอร์ หลอดไฟ หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่น ๆ ได้ โดยชนิดของตัว Fuel Cells จะแบ่งโดยถูกจัดแบ่งตามประเภทยลึงโรวไลท์ที่ใช้ได้ดังนี้

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน(Proton exchange membrane fuel cell; PEMFC) หรือเซลล์เชื้อเพลิงแบบโพลีเมอร์ของแข็ง(Solid polymer fuel cell; SPFC) ระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ นี้ใช้ซัลโฟเนทโพลีเตตระฟลูออโรเอธิลีน (Sulphonated polytetrafluorene, Nafion) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์เนื่องจากเมมเบรนที่ใช้มีความหนาเพียง 50um เซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้จึงมีขนาดเล็กส่งผลให้มีการสูญเสียแบบโอห์มมีค่าลดลงและสามารถผลิตความหนาแน่นของกระแสสูงได้ ปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดลดเป็นธาตุคาร์บอนโดยมี Pt เป็นตัวคะตะลิสต์บรรจุอยู่ทั้งสองด้านของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน แก๊สที่เกิดจากกระบวนการปฏิรูปของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้แต่แก๊สที่ใช้ไม่ต้องเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพราะแก๊สดังกล่าวเป็นพิษต่อ Pt ความเป็นพิษดังกล่าวสามารถทำให้ลดลงได้โดยการเพิ่มปริมาณของอากาศเพียงเล็กน้อยเข้าไปที่ฝั่งแอโนดหรือโดยการใช้โลหะผสมของ Pt กับโลหะอื่นๆเพื่อความทนทานต่อความเป็นพิษแนวทางแก้ไขอื่นคือการใช้เมมเบรนที่ทำจากโลหะพาราดีมหรือโลหะผสมระหว่างพาราดีมกับเงินซึ่งเมมเบรนนี้ยอมให้ไฮโดรเจนผ่านแต่ไม่ยอมให้แก๊สผ่านเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ในรูปแผ่นโพลีเมอร์บาง ทำงานในสภาวะอุณหภูมิต่ำประมาณ 80 องศา มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 40-50 % สามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้ตั้งแต่ช่วง 50-250 KW ในทางทฤษฎีมันให้แรงดันประมาณ 1.23 โวลต์ต่อเซลล์เป็นที่นิยมใช้และถูกนำไปใช้ในรถยนต์

ข้อดี เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงนี้ทำงานที่อุณหภูมิต่ำและใช้สารอิเล็กโทรดไลต์เป็นของแข็งจึงไม่มีปัญหาการรั่วซึมเกิดการกัดกร่อนน้อยเซลล์แบบนี้จึงเหมาะสำหรับการใช้งานในอาคารบ้านเรือนและยานพาหนะ

ข้อด้อย ต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีความบริสุทธิ์สูงเท่านั้นและโลหะแพลทินัมที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยามีราคาแพงอีกทั้งแผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนก็มีราคาสูงอีกด้วย

2. Alkaline fuel cell (AFC) เป็นชนิดแรกที่มีการสร้างขึ้นมา เคยถูกใช้ในโครงการอวกาศของสหรัฐในช่วงปี 1960 แต่เนื่องระบบไวต่อการปนเปื้อนมากจึงต้องใช้ไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์เท่านั้นทำให้ระบบมีราคาสูงมากไม่สามารถนำมาขายในท้องตลาดได้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงถึง 70 เปอร์เซ็นต์ องค์การนาซาใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าและน้ำให้กับยานอวกาศในโครงการอพอลโลและโครงการเจมินีมาแล้ว เชื้อเพลิงที่ใช้กับเซลล์ชนิดนี้คือ ไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ และใช้สารอิเล็กโทรไลต์ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สภาวะอุณหภูมิที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 150 - 200 องศาเซลเซียส

ข้อดี มีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าสูง และใช้สารอิเล็กโทรไลต์(เช่น โปดัสเซียมไฮดรอกไซด์)ที่ราคาถูก

ข้อด้อย เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จำเป็นต้องใช้ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงมากซึ่งมีราคาแพงมาก และต้นทุนการผลิตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีราคาแพง ทำให้การใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จำกัดอยู่เฉพาะงานในด้านอวกาศเท่านั้น

3. Phosphoric-acid fuel cell (PAFC) เป็นระบบที่มีแนวโน้มที่จะถูกนำไปใช้ในสถานีไฟฟ้าขนาดเล็ก เนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าแบบ PEMFC ทำให้ต้องใช้เวลาในการอุ่นระบบที่นานกว่าทำให้มันไม่เสถียรในการนำมาใช้ในรถยนต์ ส่วนประกอบใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ โดยปัจจุบันมีการผลิตเซลล์แบบนี้ออกมาเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ เซลล์แบบกรดฟอสฟอริกทำงานในช่วงอุณหภูมิประมาณ 150 - 200 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้กรดฟอสฟอริกจะนำประจุไฟฟ้าได้น้อย เซลล์มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ แต่สามารถใช้ประโยชน์จากไอน้ำร้อนที่เกิดขึ้นโดยนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าร่วม (cogeneration) ต่อได้

ข้อดี เป็นเซลล์ที่สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายชนิดแม้แต่น้ำมันเชื้อเพลิง แต่ต้องกำจัดกำมะถันในน้ำมันออกให้เหลืออยู่น้อยที่สุดก่อน

ข้อด้อย ต้องใช้โลหะแพลทินัมที่มีราคาสูงเป็นสารเร่งปฏิกิริยา เซลล์มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก มีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์ชนิดอื่น ชิ้นส่วนภายในจำเป็นต้องใช้วัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดได้ดี

4. Solid oxide fuel cell (SOFC) เป็นระบบที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่เนื่องจากสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากแต่เซลล์ไฟฟ้าชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิที่สูงมาก (ประมาณ 1,832 F, 1,000 C) ทำให้มีปัญหาเรื่องเสถียรภาพ แต่ก็มีข้อดีตรงที่ว่า ไอน้ำอุณหภูมิสูงที่เป็นผลผลิตจากกระบวนการนี้ สามารถนำไปใช้ปั่นกังหันก๊าซต่อได้ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และหากนำมาใช้กับระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าแบบความร้อนรวมแล้วจะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์

ข้อดี เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูงมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้โลหะแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และไม่ต้องใช้ระบบรีฟอร์มเมอร์ (reformer) ในการเปลี่ยนสภาพเชื้อเพลิงจึงอาจจะช่วยลดต้นทุนในการสร้างระบบรีฟอร์มเมอร์ (reformer) นอกจากนี้ยังสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิดเพราะเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทนทานต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดี

ข้อด้อย เซลล์ที่ทำงานในสภาวะอุณหภูมิสูงต้องเสียเวลาในการอุ่นเครื่องนาน และจำเป็นต้องสร้างผนังหนาเพื่อป้องกันความร้อนที่แผ่ออกมา

5. Molten carbonate fuel cell (MCFC) เป็นอีกประเภทหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่ แต่ชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าคือที่ประมาณ 1,112°F หรือ 600°C และ

ยังสามารถให้อุณหภูมิความดันสูงเพื่อมาช่วยผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วย และเนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า SOFC ทำให้ไม่ต้องใช้วัสดุพิเศษ จึงทำให้ระบบนี้ใช้งบประมาณที่น้อยเซลล์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และหากใช้ร่วมกับระบบผลิตกระแสไฟฟ้าความร้อนแล้วจะมีประสิทธิภาพสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์

ข้อดี เนื่องจากเซลล์ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิต่ำจึงสามารถประยุกต์ใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าได้หลายชนิด เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซโพเพนน้ำมันดีเซล เป็นต้น

ข้อด้อย ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำจะมีการกัดกร่อนค่อนข้างมากจึงไม่เหมาะกับการใช้งานขนาดเล็กกว่าเมกะวัตต์

6. เซลล์เชื้อเพลิงแบบหมุนเวียนน้ำ (Regenerative)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานแบบหมุนเวียนน้ำในระบบ น้ำจะถูกแยกด้วยไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนที่ได้จะถูกใช้เพื่อผลิตพลังงานในระบบเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา ซึ่งนอกจากกระแสไฟฟ้าแล้วยังได้ความร้อนและน้ำเป็นผลผลิตผลรวมด้วย น้ำที่ได้จะถูกนำไปแยกด้วยกระแสไฟฟ้าอีกครั้ง ดังนั้นน้ำจึงถูกหมุนเวียนอยู่ในระบบปิดตลอด ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้ยังอยู่ในขั้นการวิจัยและพัฒนาโดยองค์การนาซาและสถาบันอื่น ๆ ทั่วโลก

7. เซลล์เชื้อเพลิงแบบสังกะสี-อากาศ (Zinc-Air) เซลล์เชื้อเพลิงสังกะสี-อากาศใช้

โลหะสังกะสีเป็นขั้วแอโนด เชื้อเพลิงที่ใช้คือ ก๊าซไฮโดรเจนหรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนก็ได้ ขั้วแคโทดเป็นอากาศและใช้แผ่นกรองสำหรับแยกก๊าซออกซิเจนออกมาจากอากาศเพื่อป้อนเข้าระบบ เซลล์ชนิดนี้ใช้สารโปดัสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิการทำงานในระบบอยู่ในช่วงประมาณ 700 องศาเซลเซียส

ข้อดี โลหะสังกะสีที่ใช้ทำขั้วแอโนดมีราคาถูก เซลล์ทำงานได้โดยไม่ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยา และสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลายรูปแบบตั้งแต่ก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์จนถึงน้ำมันเชื้อเพลิง

ข้อด้อย หลังจากทำปฏิกิริยาเคมีแล้วโลหะสังกะสีจะเปลี่ยนเป็นซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จึงต้องคอยเปลี่ยนแผ่นสังกะสีใหม่เป็นระยะ

8. เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol) เป็นเซลล์ที่

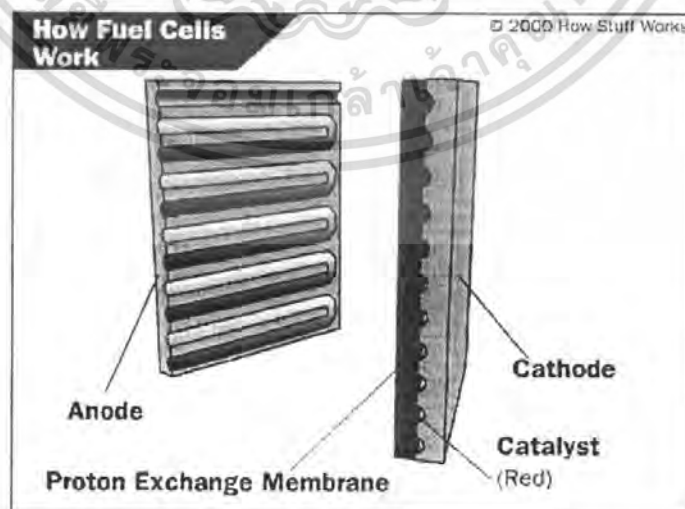
เพิ่งถูกพัฒนาขึ้นมาจากแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน แต่มีแนวโน้มที่สามารถจะพัฒนาให้ใช้กับอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กหรือในรถยนต์ได้ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากเมทานอลได้โดยไม่ต้องผ่านสารเข้าระบบรีฟอร์มเมอร์ ซึ่งแตกต่างจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นที่จะทำงานโดยการป้อนไฮโดรเจนเข้าระบบโดยตรง เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรงมีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิต่ำระหว่าง 50 - 100 องศาเซลเซียสเนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิต่ำจึงเหมาะสมที่จะพัฒนาให้เป็นแหล่งพลังงานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา

เช่น คอมพิวเตอร์ Laptop โทรศัพท์มือถือ นอกจากนี้ยังเหมาะที่จะนำมาใช้กับรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าแบบเต็มเมทานอลด้วย

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบพลังงานเซลล์เชื้อเพลิงกับพลังงานจากแหล่งอื่น

	Type	Size	Efficiency
Fuel Cells	PEMFC(80°C)	1-500 kW	40%
	PAFC(200°C)	5kW-1.2MW	40%
	MCFC(650°C)	1-20MW	55%
	SOFC(1000°C)	1kW-25MW	45-65%
Engines	Diesel	50kW-6MW	33-36%
	Internal combustion	5kW-2MW	33-35%
	Natural gas		
	Stirling cycle	1-25kW	20%
Combustion Turbines	Microturbines	25-500kW	26-30%
	"small "Turbines	1-100MW	33-45%
Renewables	Solar(PV)	1-100kW	10-20%
	Wind		
	Biomass		

2.1.2 โครงสร้างเซลล์เชื้อเพลิง



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fuel Cell มีอยู่ด้วยกันหลายประเภทโดยแบ่งตามประเภทของสารพาประจุ (Electrolyte) โดยจะกล่าวถึงการทำงานโดยละเอียดของเซลล์ประเภท proton exchange membrane เซลล์เชื้อเพลิงจะแบ่งโครงสร้างออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่

1. **ขั้วแอโนด (Anode)** เป็นขั้วลบ มีหน้าที่ส่งอิเล็กตรอนออกจากขั้ว โดยอิเล็กตรอนได้จากปฏิกิริยา $H_2 \Rightarrow 2H^+ + 2e^-$ โดยที่ขั้วจะมีช่องที่ติดกับตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งฉาบอยู่บนผิวหน้าของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยปฏิกิริยาจะเกิดเมื่อผ่านก๊าซไฮโดรเจนเข้าไป

2. **ขั้วแคโทด (Cathode)** เป็นขั้วบวก โดยมีช่องติดกับเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ทำหน้าที่รับโปรตอนและก๊าซออกซิเจนซึ่งถูกปล่อยออกมาที่ผิวหน้าของเยื่อซึ่งฉาบตัวเร่งปฏิกิริยาเอาไว้ และทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนกลับมาจากวงจรภายนอก เพื่อรวมกันเป็นน้ำ ดังปฏิกิริยา $O_2 + 4H^+ + 4e^- \Rightarrow 2H_2O$

3. **สารพาประจุ (Electrolyte)** เป็นส่วนที่มีความสำคัญ เพราะ เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนชนิดต่างๆ และเป็นส่วนที่เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภทแตกต่างกัน โดยประเภทที่เรากล่าวถึงอยู่นี้สารพาประจุจะเป็นเพียงเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane) เท่านั้น ซึ่งมีลักษณะเหมือนแผ่นพลาสติกในการทำครัวโดยจะให้โปรตอนผ่านได้ แต่จะไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน

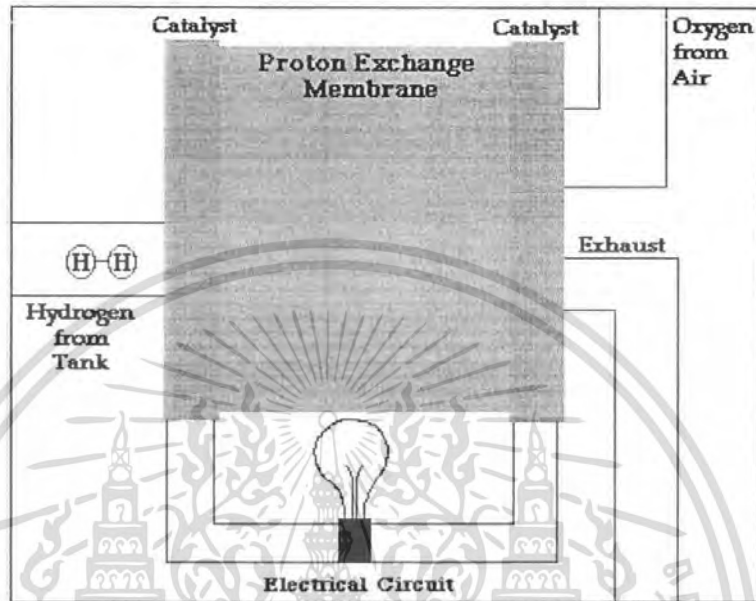
4. **ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)** เป็นวัสดุพิเศษที่ช่วยให้ปฏิกิริยาในขั้นตอนต่างๆ เกิดได้ดี โดยส่วนใหญ่จะเป็นผงแพลทินัมเคลือบอยู่บนเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งจะมีลักษณะขรุขระเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับก๊าซไฮโดรเจน และ ออกซิเจน

2.1.3 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

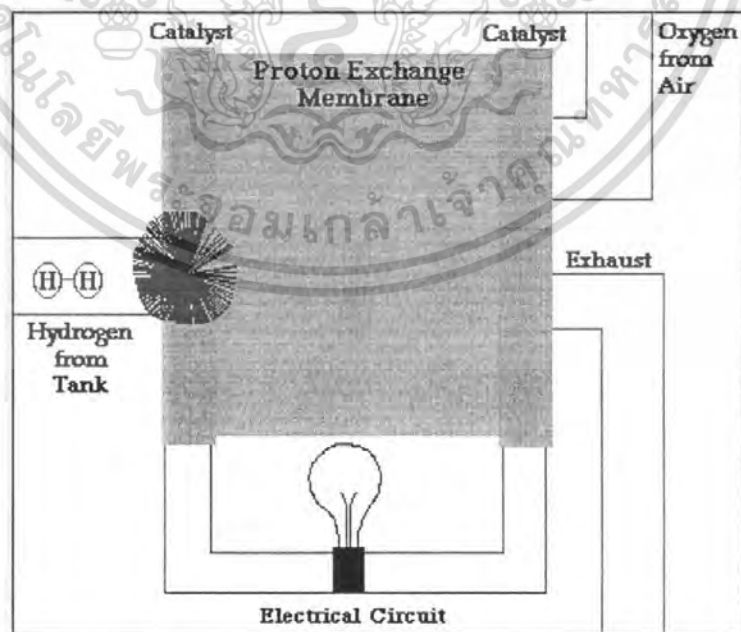
หลักการทำงาน คือ H_2 จะถูกปล่อยไปในด้านแอโนดโดยใช้ความดัน เมื่อก๊าซไปสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา ก็จะทำให้เกิดการแตกตัวออกเป็น โปรตอนและอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยังวงจรภายนอก ส่วนโปรตอนนั้น จะผ่านช่องของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนไปยังขั้วแคโทด ซึ่งจะไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่รับมาจากวงจรภายนอก รวมไปถึงอะตอมของออกซิเจนซึ่งแตกตัวโดยการเร่งของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นโมเลกุลของน้ำขึ้นมา ซึ่งการไหลของอิเล็กตรอนนี้ จะนำไปใช้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้เพื่อประโยชน์ในงานด้านต่างๆ แต่เนื่องจาก H_2 เป็นก๊าซที่อันตราย เนื่องจากติดไฟได้ จึงไม่เหมาะสมในการบรรจุ หรือ เคลื่อนย้ายไปมาและทำให้จึงมีการพัฒนา Fuel Processor ซึ่งมีหลักการคือ

1. ใช้เครื่อง Reformer เปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ, H_2O และ O_2 ให้กลายเป็น H_2 , CO , CO_2
2. ใช้เครื่อง Catalytic Converter เปลี่ยน CO ให้กลายเป็น CO_2
3. จากนั้น ก็นำ H_2 มาใช้ได้ตามต้องการ ส่วน CO_2 ก็ถูกปล่อยสู่อากาศต่อไป

วิธีนี้ นอกจากจะเพิ่มความปลอดภัยแล้ว ยังเป็นการประหยัดอีกด้วย เนื่องจากสามารถเปลี่ยนสารอื่นๆมาเป็น H_2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง Fuel cell อธิบายได้ดังรูปตามขั้นตอนต่างๆเพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานอย่างชัดเจนดังขั้นตอนต่อไปนี้

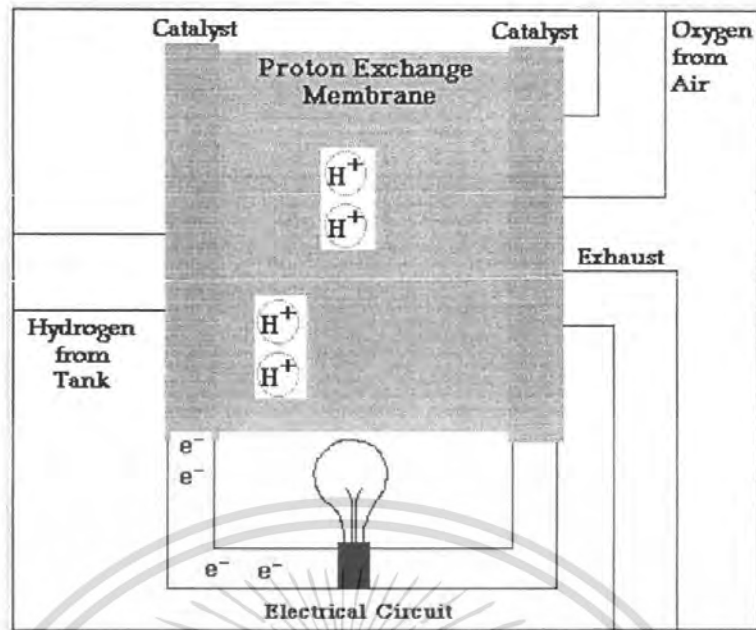


ภาพที่ 2.2 เมื่อส่งผ่านก๊าซไฮโดรเจน เข้ามา

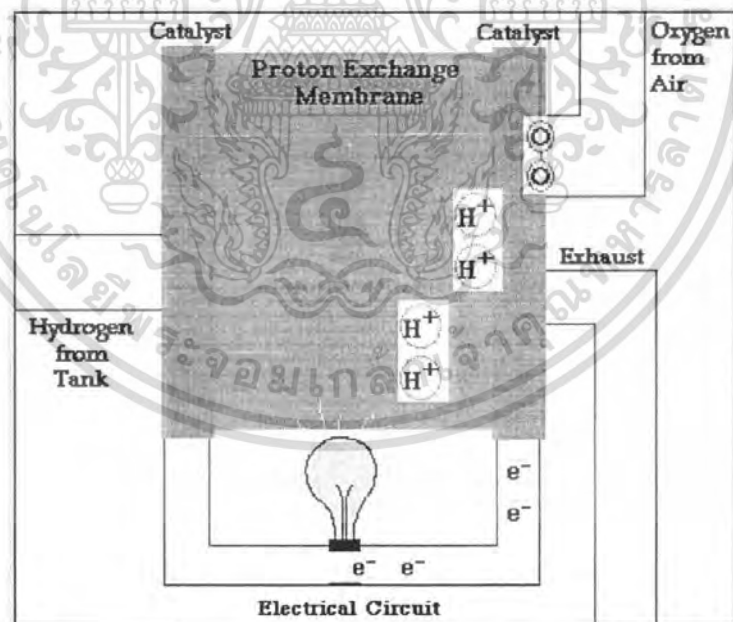


ภาพที่ 2.3 H_2 จะถูกปล่อยไปทางด้านแอโนดโดยใช้ความดันจาก Tank โดยชนแล้วเกิดการ

แตกตัว
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

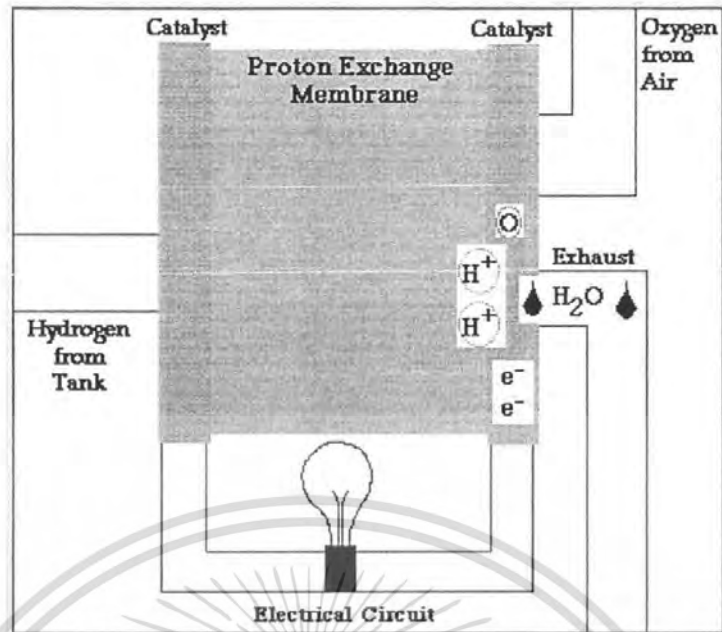


ภาพที่ 2.4 เมื่อก๊าซไปสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา ก็เกิดการแตกตัวออกเป็น โปรตอนและอิเล็กตรอน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้โปรตอนผ่านได้ แต่จะไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน

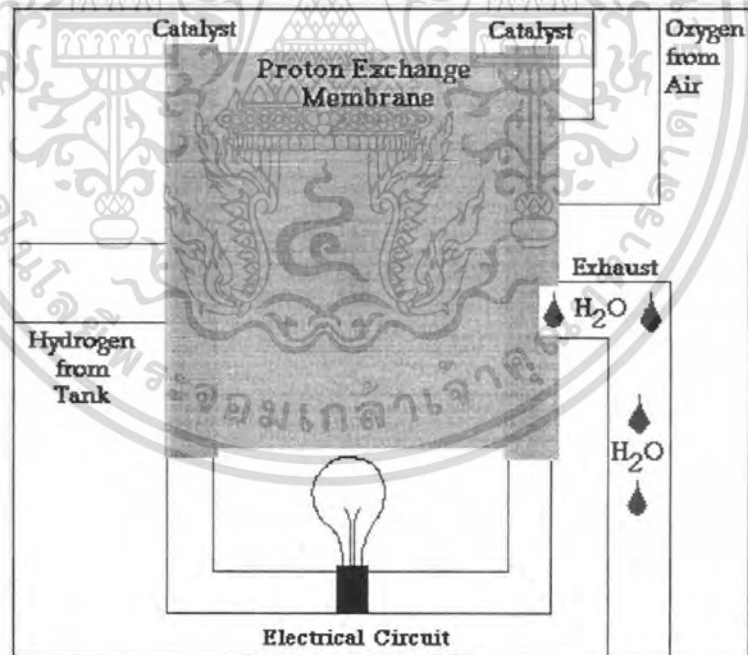


ภาพที่ 2.5 โดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยังวงจรภายนอก ส่วนโปรตอนนั้น จะผ่านช่องของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนไปยังขั้วแคโทดซึ่งจะไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่รับมาจากวงจรภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.6 อะตอมของออกซิเจนซึ่งแตกตัวโดยการเร่งของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นโมเลกุลของน้ำขึ้นมา



ภาพที่ 2.7 โมเลกุลของน้ำและจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ

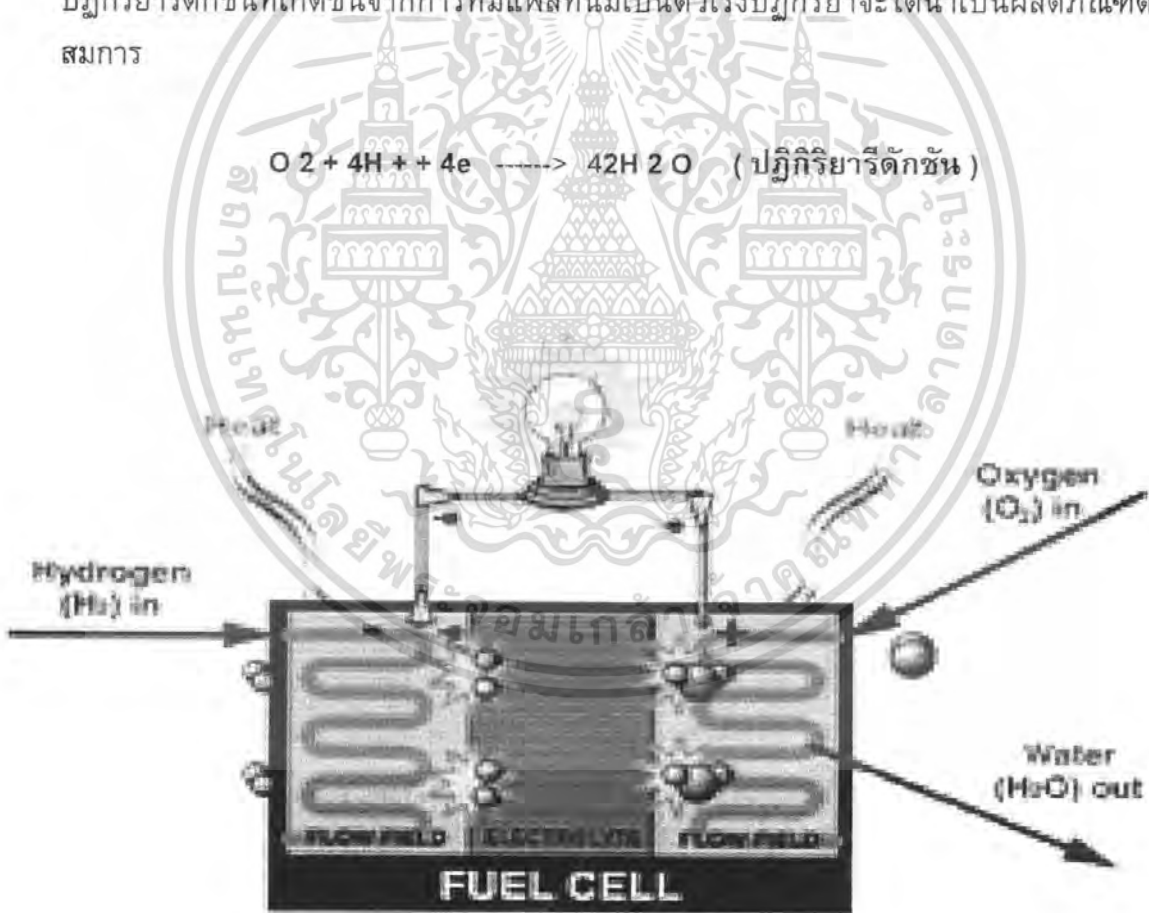
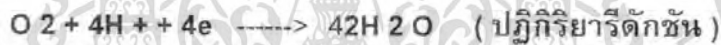
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน(PEMFC)

PEMFC ประกอบด้วยส่วนหลักๆ 3 ส่วน ได้แก่ อิเล็กโทรด 1 คู่ (แคโทด และ แอโนด) พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน และตัวเร่งปฏิกิริยา เชื้อเพลิงซึ่งถูกนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยแก๊สไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าไปที่ขั้วแอโนด ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นโดยมีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นโปรตอนอิเล็กตรอนและความร้อนจะถูกผลิตออกมาตามสมการ



โปรตอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์เมมเบรน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการนำโปรตอนสูง (High Proton Conductivity) แต่ไม่สามารถนำอิเล็กตรอนได้ (Electron Barrier) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกเพื่อใช้เป็นกระแสไฟฟ้า จากนั้นทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดเพื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้ามายังขั้วดังกล่าว ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นจากการที่มีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ตามสมการ



ภาพที่ 2.8 กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน (Polymer Electrolyte Membrane)

องค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรนในการขับเคลื่อนให้เซลล์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ ส่วนของโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรนที่ยึดติดกับขั้วแพลทินัม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารอิเล็กโทรไลต์คือสารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวให้ออออนบวกและไอออนลบ แต่สำหรับอิเล็กโทรไลต์เมมเบรนแล้วเมื่อมีการดูดซับน้ำขึ้นก็จะเกิดการแตกตัวเช่นกัน เพียงแต่ไอออนลบที่เกิดขึ้นจะอยู่บนเมทริกซ์ของเมมเบรน ดังนั้นถ้าเป็นโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรนก็มักจะหมายถึง เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange Membrane) นั่นเอง

โพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรนจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โมเลกุลไฮโดรเจนสัมผัสกับออกซิเจนเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาขึ้นโดยตรง โพลีเมอร์เมมเบรนจะยอมให้ประจุบวก (ไฮโดรเจนไอออนหรือโปรตอน) บนเมมเบรนเคลื่อนที่ผ่านจากแอโนดไปยังแคโทดเท่านั้น นอกจากนี้โพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรนจะแสดงสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าเนื่องจากเป็นโพลีเมอร์อินทรีย์ ดังนั้น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านเส้นลวดโลหะไปยังอีกด้านหนึ่งของเซลล์เพื่อให้ครบวงจรนั่นเอง สิ่งเจือปนโดยเฉพาะพวกไอออนของโลหะมักจะมีส่วนต่อการนำไฟฟ้าของเมมเบรน ถ้าไอออนของโลหะเคลื่อนที่ไปยังเมมเบรนมันจะทำหน้าที่เป็นประจุที่เคลื่อนที่แทนโปรตอนมีผลทำให้สภาพนำของเมมเบรนลดลง

ลักษณะทั่วไปของเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงต้องมีสภาพนำที่สูง มีสมบัติขวางกั้น (Barrier Property) ที่ดี มีความแข็งแรงทางกลที่ดี มีความทนทานต่อความร้อนและสารเคมี และเป็นฉนวนทางไฟฟ้า เมมเบรนจะต้องมีอันตรกิริยากับน้ำ และให้เกิดสภาพนำที่ดีในสภาวะไฮเดรชัน และต้องยอมให้มีการส่งผ่านน้ำที่เพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดโพลาริเซชันซึ่งเหล่านี้จะมีผลสำหรับในเซลล์เชื้อเพลิง การส่งผ่านของโปรตอนจะเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยโมเลกุลของน้ำที่ขับเคลื่อนไปในระหว่างสายโซ่ในเมมเบรน ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานโมเลกุลของไฮโดรเจนจะถูกทำให้แตกตัวออกที่ขั้วแพลทินัมและทำให้เกิดเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) เมื่อโปรตอนไหลผ่านเมมเบรน และอิเล็กตรอนไหลไปตามวงจรทำให้เกิดความต่างศักย์และนำไปสู่กระแสไฟฟ้าในที่สุด ดังนั้น ในเมมเบรนต้องมีน้ำเพื่อที่จะให้เกิดไฮโดรเจนไอออนในการพาประจุผ่านเมมเบรนไปได้ ข้อจำกัดนี้ทำให้เมมเบรนชนิดนี้ไม่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำได้ เนื่องจากน้ำจะระเหยออกไปทำให้สภาพนำของโปรตอนลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้ามีน้ำมากเกินไปจะทำให้น้ำท่วมเซลล์ ซึ่งเหล่านี้จะเป็นปัญหาต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้

2.1.4 สรุปข้อดีข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิง

1. ประสิทธิภาพ

เซลล์เชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงพลังงานที่สะสมอยู่ในเซลล์เชื้อเพลิงให้เป็นกระแสไฟฟ้าโดยตรง โดยไม่ผ่านกระบวนการเผาไหม้ ทำให้ไม่ถูกจำกัดอยู่กับประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ให้เป็นไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถนำความร้อนที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ผลิตไฟฟ้าเพิ่มเติมในลักษณะของ Cogeneration ได้

2. ให้กระแสไฟฟ้าในปริมาณมาก

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าในปริมาณมาก (ให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง) ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงส่วนใหญ่มักมีขนาดกะทัดรัดเมื่อเทียบกับเครื่องผลิตไฟฟ้าชนิดอื่น

3. ทำงานโดยไม่มีเสียงดัง

เซลล์เชื้อเพลิงนั้นไม่มีชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่จึงทำงานได้โดยไม่มีเสียง ดังนั้นภายในห้องโดยสารของรถยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจึงเงียบกว่ารถยนต์ทั่วไปมาก

4. ปราศจากมลพิษ

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นไม่ทำให้เกิดมลพิษ อย่างเช่นในเครื่องจักรเผาไหม้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิงจะเป็นเพียงแค่น้ำเท่านั้น

ข้อจำกัดของเซลล์เชื้อเพลิง

ข้อจำกัดหลักของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นอยู่ที่ราคาซึ่งค่อนข้างสูงของเซลล์เชื้อเพลิงและการจัดหาก๊าซไฮโดรเจนมาเป็นเชื้อเพลิง

2.1.5 ผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม

สิ่งที่มักเข้าใจผิดกันอยู่เสมอคือการใช้ธาตุไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ความจริงแล้วไฮโดรเจนไม่ใช่แหล่งพลังงานหลักมันเป็นเพียงตัวเก็บพลังงานและต้องผลิตขึ้นมาจากแหล่งพลังงานอื่นจากหลักการอนุรักษ์พลังงานทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงอาจถูกจำกัดโดยการผลิตงานในขั้นแรก ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมอาจต่ำกว่าเครื่องยนต์เบนซินที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งพบได้เมื่อก๊าซไฮโดรเจนต้องถูกอัดภายใต้แรงดันสูงหรือทำให้เป็นของเหลวสำหรับยานยนต์ (การสลายน้ำด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพเพียง 50%) อีกทางเลือกหนึ่งของการผลิตไฮโดรเจนโดยการใช้มีเทนซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงถึงราว 80% หรือใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ซึ่งมีประสิทธิภาพแตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามการใช้ไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกได้ อย่างไรก็ตามหากได้มีการจัดได้ดีภายในโรงงานเราก็สามารถกำจัด CO_2 ได้ง่ายกว่าและดีกว่าปล่อยให้รถยนต์ทุกคันปล่อยก๊าซเสียออกมาโครงการกำจัด CO_2 ปริมาณมากในขั้นตอนนี้ได้ดำเนินการจากบริษัทจากนอร์เวย์ statoil เซลล์เชื้อเพลิงประเภทอื่นๆไม่พบปัญหาเช่นเดียวกันนี้ เช่น เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

(biological fuel cells) ใช้กลูโคส และ เมทานอล จากเศษอาหารที่มักด้วยจุลินทรีย์อย่างไรก็ตามปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมอีกอย่างหนึ่งที่นักวิทยาศาสตร์จาก Caltech ได้ตั้งข้อสังเกตขึ้นคือ หากเราเปลี่ยนจากระบบเก่ามาเป็นเซลล์เชื้อเพลิงทั้งหมด ปริมาณไฮโดรเจนเพียงเล็กน้อยที่รั่วไหลจากการเก็บและขนส่งอาจเป็นอันตรายต่อชั้นโอโซนได้ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณไฮโดรเจนที่ทางกลุ่มตั้งข้อสังเกตได้ถูกปฏิเสธโดยกลุ่มอุตสาหกรรม ปัจจุบันนี้ 50% ของพลังงานในสหรัฐอเมริกาผลิตมาจากถ่านหิน ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่สะอาดถ้าไฮโดรเจนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงมาจากการสลายน้ำด้วยไฟฟ้า ซึ่งยังใช้พลังงานจากโรงไฟฟ้าเหล่านี้ เราก็ไม่อาจปฏิเสธได้เลยว่าปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมก็จะเกิดขึ้นที่โรงงานไฟฟ้านั้นเอง

2.1.6 คุณสมบัติของก๊าซไฮโดรเจน

เป็นธาตุที่เบาและเล็กที่สุด เบากว่าอากาศ 14 เท่า น้ำหนัก 1mole เท่ากับ 2.02 กรัม ความหนาแน่น $0.086 \text{ Kg} / \text{m}^3$

2. จุดเดือดต่ำ -253 องศาเซลเซียส

3. ติดไฟง่าย ใช้พลังงานจุดไฟน้อย 0.02 mJ มีช่วงการติดไฟกว้าง Avf Ratio=364 ถึง 5

4. ค่าความร้อนเชื้อเพลิง 120 MJ/kg สูงกว่าน้ำมันประมาณ 3เท่า

การจัดเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีหลายวิธี โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ Tunk'g8,u

1.การจัดเก็บด้วยวิธีทางกายภาพ

2.การจัดเก็บด้วยวิธีทางเคมี

การจัดเก็บด้วยวิธีทางกายภาพ

1. การเก็บในรูปก๊าซในถังความดันสูง

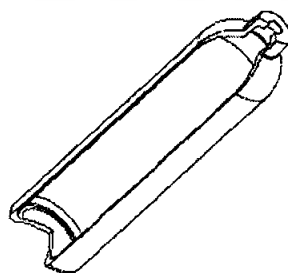
2 การเก็บในรูปของเหลวอุณหภูมิต่ำ

3 การเก็บในลูกแก้ว

4 Cryogenic Adsorption

การเก็บในถังความดันสูง

ถังเก็บขนาดใหญ่จะมีรูปทรงเป็นลูกทรงกลมส่วนถังเก็บขนาดเล็กจะเป็นทรงกระบอก



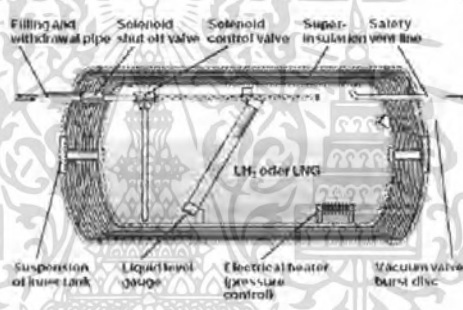
ภาพที่ 2.9 ถังความดันสูง



ภาพที่ 2.10 ถึงความดันสูง

การเก็บในรูปของเหลว

ไฮโดรเจนกลายเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ -253°C และต้องเก็บในถังที่มีอุณหภูมิต่ำมาก ความหนาแน่น 70 Kg/m^3 ซึ่งต้องมีปริมาณเชื้อเพลิง จำนวนเท่ากันแล้วถึงเก็บไฮโดรเจน เหลวจะมีขนาดใหญ่กว่าถังเก็บเชื้อเพลิงเบนซินถึง 4 เท่า



ภาพที่ 2.11 การเก็บในลูกแก้ว

การเก็บในลูกแก้ว

วิธีนี้ลูกแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-100 ไมคอน หนาประมาณ 1-10 ไมคอน อาศัยหลักการของการแพร่ของไฮโดรเจนที่อุณหภูมิต่ำสูงผ่านผนังของลูกแก้ว โดยลูกแก้วจะถูกทำให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง $300-400^{\circ}\text{C}$ ที่ความดัน 400-500 bar แล้วไฮโดรเจนแพร่ผ่านผนังของลูกแก้ว หลังจากทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิต่ำ 20°C ความเร็วในการแพร่ของไฮโดรเจนผ่านผนังลูกแก้วจะลดลงและความดันภายในลูกแก้วลดลงเหลือ 200 bar วิธีนี้สามารถเก็บไฮโดรเจนได้ 2.6% โดยปริมาตร แต่เนื่องจากความดันภายในลูกแก้วกับบรรยากาศภายนอกมีความแตกต่างกันมาก ไฮโดรเจนจะสามารถแพร่หรือรั่วออกมาได้ หลังบรรจุจึงควรรับนำมาใช้งาน

Cryogenic Adsorption

วิธีการจัดเก็บแบบนี้ ไฮโดรเจนเหลวที่อุณหภูมิต่ำมาก Cryogenic (คือไฮโดรเจนที่มีอุณหภูมิต่ำ 77K) จะไปเกาะ (adsorb) ที่ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งมีรูพรุนอยู่จำนวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก การจัดเก็บจะมีความดันและความเย็นโดยไม่มีกรร่วไหล การจัดเก็บด้วยวิธีนี้ เปรียบเทียบเหมือนการรวมวิธีการเก็บที่มีความดันสูงกับการเก็บที่อุณหภูมิต่ำเข้าด้วยกัน ซึ่งวิธีการนี้จะเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในอนาคต

การจัดเก็บด้วยวิธีทางเคมี

- 1.การจัดเก็บไฮโดรเจนในรูปแอมโมเนีย
- 2.การเก็บในรูปน้ำ
- 3.การเก็บในรูปเมทัลไฮไดรไรด์

การเก็บในรูปไฮโดรเจนในรูปแอมโมเนีย

เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนจึงให้ความร้อนเพื่อให้ได้ไฮโดรเจนออกมา โดยกระบวนการแตกตัวนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 600 °C ในอุปกรณ์แยกก๊าซ ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่านี้การแตกตัวจะไม่สมบูรณ์และจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้ไฮโดรเจนกับไนโตรเจนรวมตัวเป็นแอมโมเนีย (NH₃) ตามเดิม

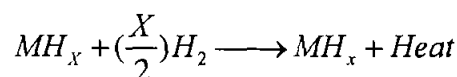
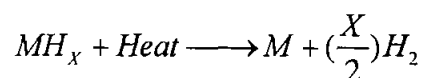


การเก็บในรูปน้ำ

การแยกน้ำออกเป็นไฮโดรเจนกับออกซิเจน จะต้องอาศัยกระบวนการแตกตัวที่อุณหภูมิ 2000°C ซึ่งถ้าต้องการให้ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำต้องใช้กระบวนการทางเคมีอื่นร่วมด้วยโดยใช้โลหะแอลคาไล เช่นลิเทียม(Li) หรือโซเดียม(Na)ทำปฏิกิริยากับน้ำ เพื่อแยกไฮโดรเจนออกจากน้ำ เป็นต้น น้ำ 18g จะมีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ 2g คิดเป็น 11% โดยน้ำหนักและน้ำจำนวน 160 ลิตรจะมีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบซึ่งนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เทียบเท่าเบนซิน 65 ลิตร (50 kg)

การเก็บในรูปเมทัลไฮไดรไรด์

การเก็บในรูปสารประกอบเคมี โดยใช้เมทัลไฮไดรไรด์ ต้องคำนึงถึงน้ำหนักถังและอุณหภูมิที่เหมาะสม เมทัลไฮไดรไรด์ สามารถเก็บไฮโดรเจนได้ประมาณ 2-3% ของน้ำหนักถัง



ข้อได้เปรียบการเก็บในรูปเมทัลไฮไดรไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเก็บไฮโดรเจนด้วยวิธีการนี้ คือ ไม่จำเป็นต้องใช้ความดันสูงมากหรืออุณหภูมิที่เป็นจัด เนื่องจากเป็นการเก็บไฮโดรเจนในรูปของสารประกอบทางเคมีและสามารถคายไฮโดรเจนได้ที่ความดันภายในต่ำ โดยอาศัยอาการควบคุมความร้อนที่ให้กับโลหะไฮดรไรด์เพียงอย่างเดียวอีกทั้งโลหะไฮดรไรด์ไม่สามารถติดไฟได้ ดังนั้นวิธีการเก็บแบบนี้จึงเป็นวิธีทางธรรมชาติที่มีความปลอดภัยที่สุดในขณะนี้

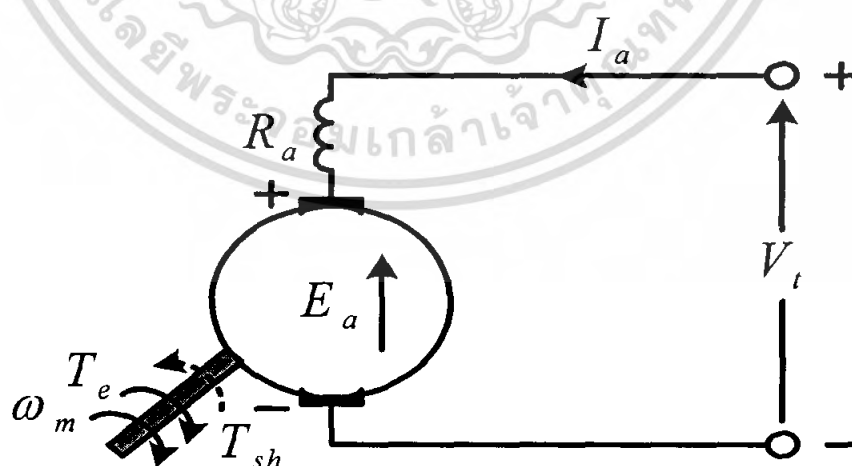
ข้อเสียเปรียบการเก็บในรูปเมทัลไฮดรไรด์

1. มีน้ำหนักมาก

2. ก๊าซไฮโดรเจนต้องมีความบริสุทธิ์สูงโดยเฉพาะการปนเปื้อนของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาบอนมอนนอกไซด์และน้ำ

2.2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของกำลังไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ สเตเตอร์ (Stator) ประกอบด้วยขั้วแม่เหล็กและแปรงถ่าน โดยสเตเตอร์จะเป็นตัวกำหนดแนวทางของสนามแม่เหล็กให้อยู่ภายในเครื่องจักร จากขั้วแม่เหล็กหนึ่งไปยังขั้วแม่เหล็กหนึ่ง ขั้วแม่เหล็ก (field Poles) เป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กที่ได้มาจากการกระตุ้นขดลวดสนาม โรเตอร์ (Rotor) หรืออาร์เมเจอร์จะประกอบด้วยวงแหวนแยก (Split-ring) โดยขดลวดอาร์เมเจอร์จะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้า-กล ส่วนวงแหวนแยกและแปรงถ่านจะทำหน้าที่กำหนดทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านตัวนำเพื่อให้เกิดแรงกระทำกับขดลวดตัวนำในทิศทางที่เกิดการหมุนอย่างต่อเนื่อง ส่วนวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

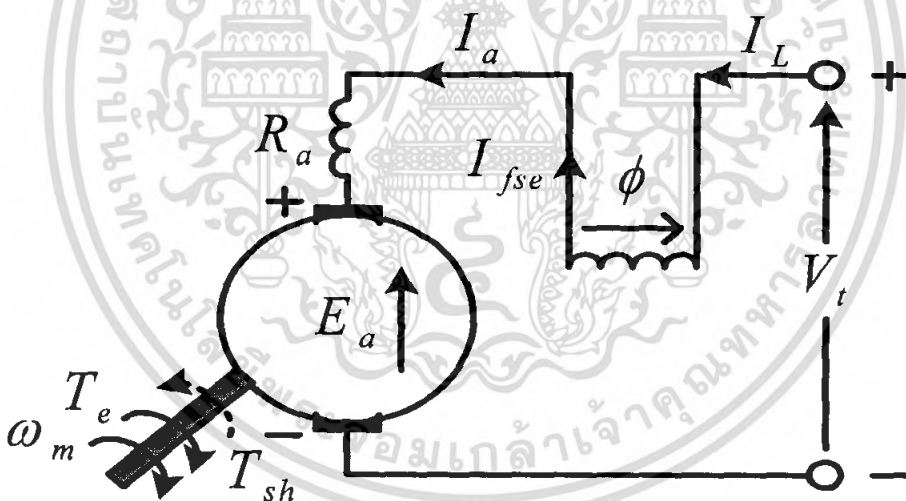
1. มีแรงบิดขนาดสตาาร์สูงมากจึงเหมาะกับการงานยกของหรืองานประเภทขับเคลื่อน
2. ควบคุมง่ายกว่าและนุ่มนวลกว่ามอเตอร์กระแสสลับที่ทำงานในแบบเดียวกัน
3. ช่วงความเร็วควบคุมได้กว้าง สามารถเพิ่มความเร็วให้สูงหรือต่ำกว่าปกติได้

ข้อเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1. มีวิธีการสตาร์ทที่ยุ่ยากกว่ามอเตอร์กระแสสลับในมอเตอร์ขนาดใหญ่
2. ต้องจัดหาแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงไว้ใช้งาน
3. ค่าบำรุงการรักษามากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเนื่องจากการสึกหรอของคอมมิวเตเตอร์ที่เกิดจากอาร์ค การขัดสีของแปรงถ่าน
4. มีราคาแพงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน

2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (Series)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมเหมาะสำหรับงานที่ต้องค่าแรงบิดสูงๆที่ความเร็วรอบต่ำ ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 แสดงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (Series)

สมการที่ใช้สำหรับอธิบายมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_t = E_a + I_a (R_a + R_{fse}) \quad (2.1)$$

$$I_L = I_{fse} = I_a \quad (2.2)$$

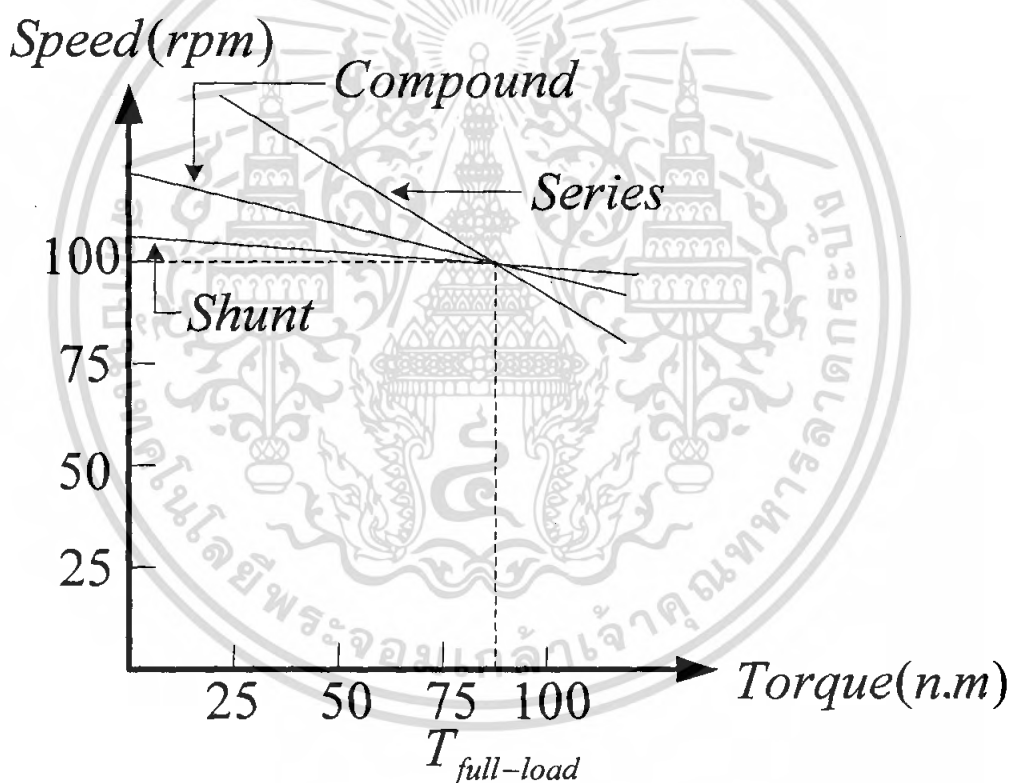
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi = K_f I_a \quad (2.3)$$

$$T_e = K_a (K_f I_a) I_a = K I_a^2 \quad (2.4)$$

$$\text{เมื่อไม่คิดค่า } R_a \quad T_e = V_t^2 / (K \omega_m^2) \quad (2.5)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่า ϕ จะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่จ่ายให้กับกระแสไฟฟ้า $I_L = I_a$ เมื่อมอเตอร์จ่ายภาระทางกลเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสอาร์เมเจอร์ต้องเพิ่มขึ้นซึ่งผลทำให้สนามแม่เหล็กจากขดลวดสนามแบบอนุกรมมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (สมการที่ 2.1) ทำให้ได้แรงบิดที่สูงขึ้นจากทั้ง I_a และ ϕ (สมการที่ 2.4) เมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตามภาระทางกล ความเร็วมอเตอร์จะต้องลดลงค่อนข้างมากเพื่อที่จะรักษาสมดุลระหว่างค่า V_t และ E_a จะเห็นว่าความเร็วมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อภาระทางกลเปลี่ยนแปลง ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วมอเตอร์และแรงบิดที่จ่ายให้กับภาระทางกล

2.4 การคำนวณหาพิกัดกำลังของมอเตอร์

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณหาขนาดพิกัดกำลังของมอเตอร์ เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W = น้ำหนักของรถ (kg)

V = อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็ว (m/s)

μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างยางกับถนน (ton/Kg)

η_m = ประสิทธิภาพของมอเตอร์

η = ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง

P_m = ค่าขนาดกำลังของมอเตอร์ (KW)

เมื่อทราบค่าตัวแปรทั้งหมดแล้วสามารถหาได้จากสมการ

$$P_m = [(\mu W V)/102] \times (100/\eta) \quad (2.6)$$

2.5 การควบคุมความเร็วมอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมมีวิธีการควบคุมความเร็วได้ 3 วิธีดังนี้

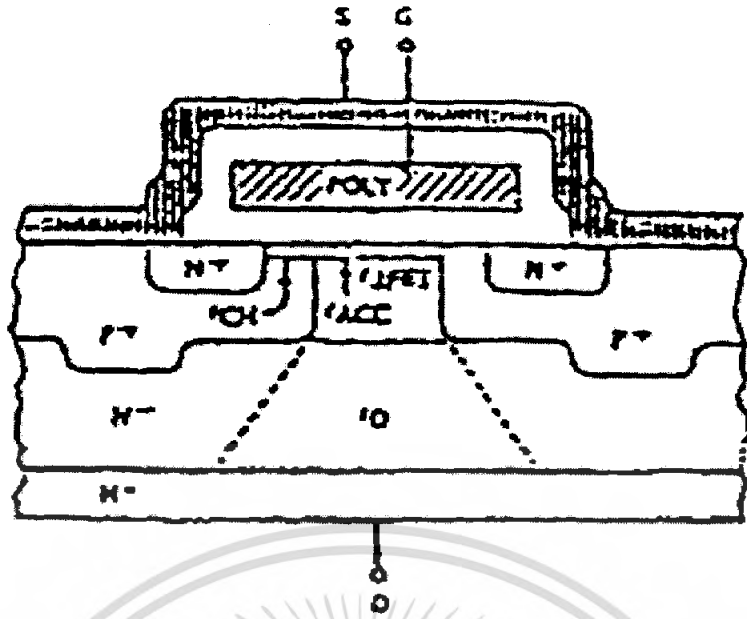
1. การควบคุมความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Armature Resistance Control)
2. การควบคุมฟลักซ์สนาม (Field Flux Control)
3. การควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ (Armature Voltage Control)

โดยวิธีที่ใช้ในโครงงานนี้จะเป็นการควบคุมความเร็วโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า V , โดยการใช้วงจรมอเตอร์

2.6 มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) ส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ ก็คือสวิตช์ในโครงงานนี้จะใช้มอสเฟตทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ดังนั้นจะต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษในการที่จะนำมอสเฟตมาใช้งานในลักษณะนี้

2.6.1 การทำงานของมอสเฟตกำลัง

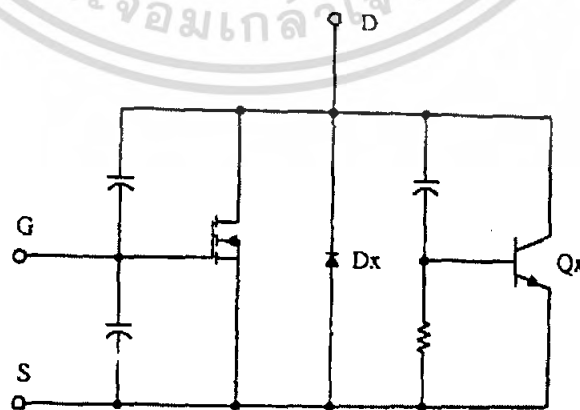
เมื่อป้อนแรงดันให้มีขนาดและแรงดันที่เหมาะสม Pol silicon Gate จะเหนี่ยวนำชั้นตรงกันข้ามของ Diffuse channel region ซึ่งแสดงโดย r_{ch} ในภาพที่ 2.16 จะทำให้กระแสไหลจากเดรนไปยังซอร์สสำหรับแรงดันค่าน้อยๆที่ป้อนให้เดรนและซอร์ส กระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น เมื่อแรงดันเดรนเพิ่มขึ้น กระแสเดรนจะอิ่มตัวเป็นสัดส่วนกำลังสองของแรงดันเกตกับซอร์ส



ภาพที่ 2.16 แสดงการทำงานของมอสเฟต

2.6.2 วงจรสมมูลของมอสเฟต

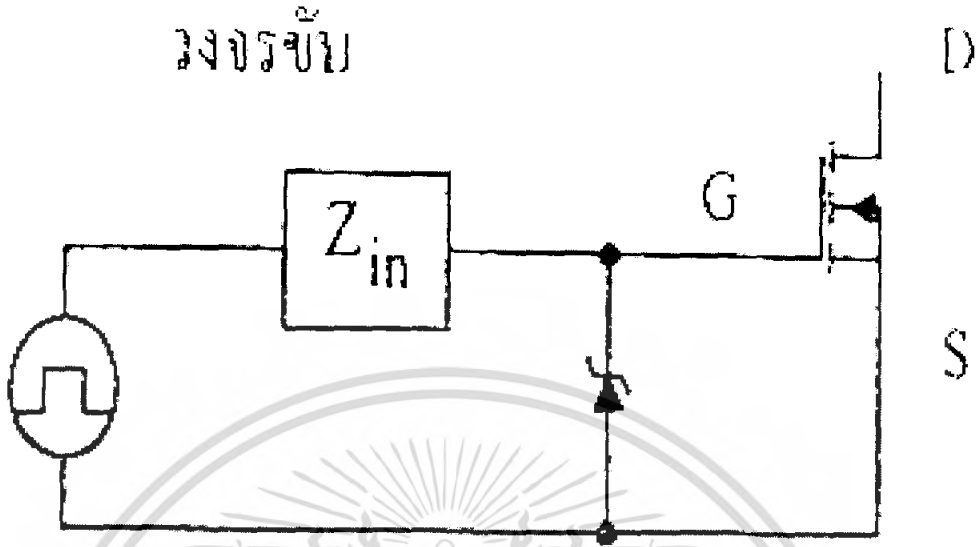
จากโครงสร้างของมอสเฟตสามารถสร้างเป็นวงจรสมมูลซึ่งประกอบไปด้วย ไดโอด (D_x) ,ค่าความจุ, ค่าความต้านทาน (ซึ่งมีค่าน้อยมาก) และทรานซิสเตอร์ชนิด NPN (Q_x) ดังภาพที่ 2.17 การพิจารณาวงจรสมมูลนี้มีความสำคัญมากในการใช้งานมอสเฟตควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบ PWM เพราะในขณะที่มอสเฟตกำลังหยุดนำกระแสไฟฟ้าค่าแรงดันระหว่างเดรนกับซอร์สจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (dv/dt มีค่าสูง) กระแสส่วนหนึ่งจะไหลผ่านค่าความจุที่ต่ออยู่ระหว่างคอลเล็กเตอร์และเบสของทรานซิสเตอร์ Q_x ค่ากระแสนี้ ($i_c = cdv/dt$ จะทำให้เกิดแรงดันที่ความต้านทานของเบสและอิมิตเตอร์ของ Q_x ซึ่งแรงดันนี้อาจทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นได้จุดนี้ต้องได้รับการป้องกันไม่ให้แรงดันระหว่างเดรนและซอร์สเพิ่มขึ้นสูงเกินกว่าพิกัดแรงดันของมอสเฟต



ภาพที่ 2.17 วงจรสมมูลของมอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 แรงดันสไปต์

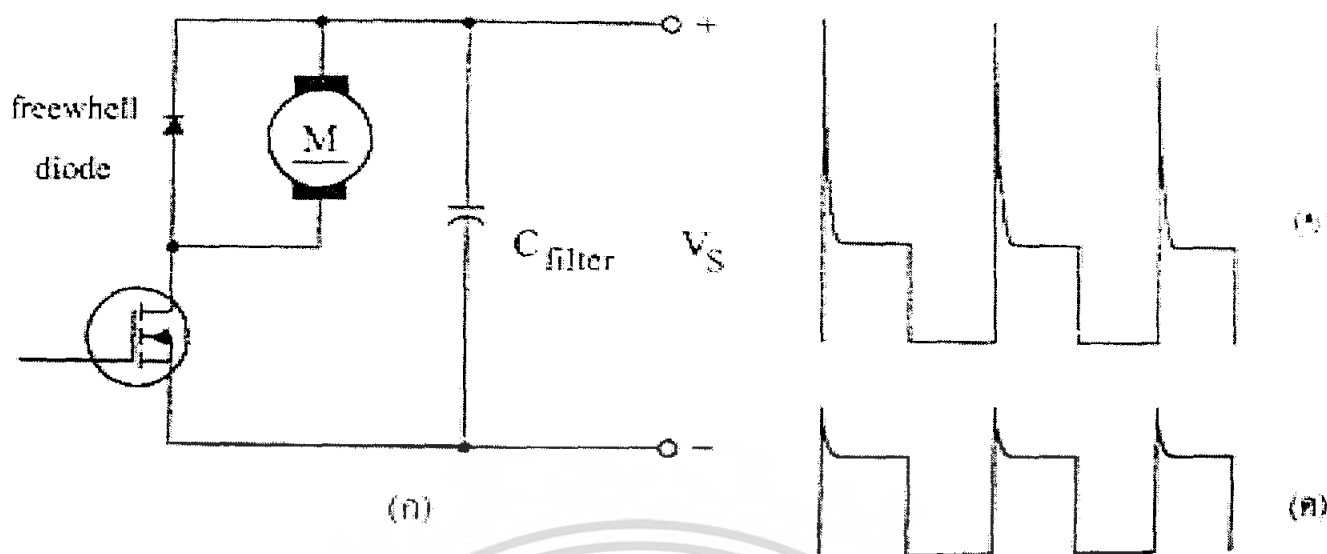


ภาพที่ 2.18 การป้องกันแรงดันสไปต์คร่อม เกต-ซอร์ส

แรงดันสไปต์ (Spike Voltage) ที่เกิดขึ้นส่วนมากจะเกิดมาจากการควายพลังงานของค่าความเหนี่ยวนำที่แฝงอยู่ในระบบแรงดันสไปต์ที่ทำให้มอสเฟตเสียหายอย่างถาวร คือ แรงดันสไปต์คร่อม เกต-ซอร์ส และแรงดันสไปต์คร่อมเดรน-ซอร์ส

แรงดันสไปต์ เกต-ซอร์ส สามารถป้องกันได้โดยใช้ซีเนอร์ไดโอดมาต่อคร่อมเกตซอร์ส ดังภาพที่ 2.18

แรงดันสไปต์คร่อม เกต-ซอร์ส เป็นส่วนที่รุนแรงที่สุด เพราะโพลเป็นมอดเตอร์ นั่นคือเป็นพวกค่าความเหนี่ยวนำในเวลาที่มอสเฟตตัดต่อทำงานจากต่อมาเป็นตัด ทำให้แรงดันตกคร่อมขั้วของมอสเฟตเพิ่มจากศูนย์ (หรือเกือบศูนย์) ไปเป็นแรงดันระดับไฟเลี้ยงในทันที (จากภาพ 2.19 ก) แม้ว่าแรงดันไฟเลี้ยงจะมีค่าต่ำกว่าอัตราทนแรงดันมอสเฟตก็ตาม แต่ด้วยแรงดันที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดทำให้แรงดันตกคร่อมมอสเฟตสูงขึ้นอย่างมากเป็นแรงดันสไปต์ ถ้ามอสเฟตทำงานตัดต่อเร็วเท่าใด แรงดันนี้ก็ยิ่งสูงขึ้นเท่านั้นวิธีแก้ปัญหานี้โดยทั่วไปจะใช้ฟรียูวี่ลไดโอด (Freewheel diode) ต่อคร่อมโพล และไดโอดนี้จะต้องมีคุณสมบัติของการรีคัพเวอรี่ (Recovery) ที่ดีพอ นั่นคือเป็นไดโอดประเภทฟาสต์รีคัพเวอรี่ (Fast recovery) แต่การใช้ไดโอดอาจแก้แรงดันส่วนนี้ได้ไม่เพียงพอ จึงต้องมีคาปาซิเตอร์ (Capacitor) ต่อคร่อม แหล่งจ่ายไฟอีกส่วนหนึ่ง



ภาพที่ 2.19 ก. การป้องกันแรงดันสไปต์คร่อม เดรน-ซอร์ส
 ข. ไม่ได้ต่อคาปาซิเตอร์
 ค. เมื่อต่อคาปาซิเตอร์และไดโอด

2.6.4 ข้อดีของการใช้มอสเฟต

1. ความเร็ว

มอสเฟตมีความสามารถในการสวิตช์ด้วยความเร็วโดยปราศจากการสะสมประจุอย่างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ดังนั้นจึงไม่คิดช่วงเวลาสะสมจึงทำให้มอสเฟตมีความเร็วกว่าทรานซิสเตอร์ในการสวิตช์ซึ่งความเร็วของมอสเฟตขึ้นอยู่กับอัตราและคายประจุของตัวเก็บประจุภายใน

2. อินพุต

ขาเกตของมอสเฟตนั้นถูกแยก (Isolate) จากแหล่งจ่ายด้วยชั้นออกไซด์ที่ทำให้เกิดความต้านทานกระแสตรงสูงมากมอสเฟตสามารถถูกไบอัสด้วยแรงดัน ประมาณ 10 Volt ด้วยค่าแรงดันขนาดนี้จึงสามารถทำการขับมอสเฟตได้ด้วย IC, TTL, CMOS ได้โดยตรงทำให้ลดความยุ่งยากของวงจร

4. ย่านความปลอดภัย

ของเขตย่านปลอดภัยของมอสเฟตได้ถูกกำหนดด้วยพิกัดกระแสสูงสุดแรงดันเบรกดาวน์ขอบเขตของย่านความปลอดภัยจะกว้างเนื่องจากไม่เกิดการเบรกดาวน์ทางด้าน (Breakdown Secondary) ซึ่งบางทีอาจจะไม่จำเป็นต้องใช้วงจรสนับเบอร์ก็ได้

5. อุณหภูมิ

สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของมอสเฟตมีค่าตรงข้ามกับทรานซิสเตอร์ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิ ในตัวมอสเฟตสูงขึ้นกระแสเดรนจะมีค่าน้อยลง ดังนั้นการทำงานของมอสเฟตจึงไม่มีเหตุเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มหนีของอุณหภูมิ

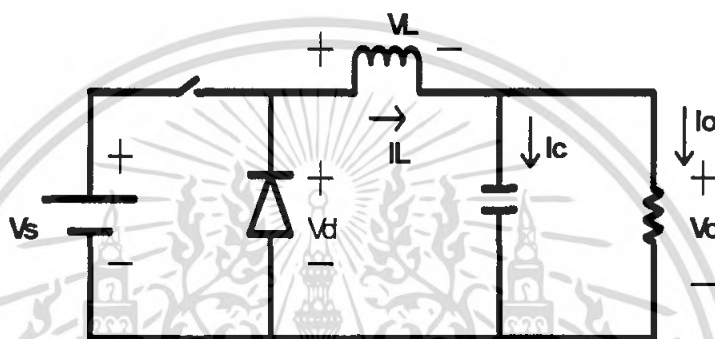
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. แรงดัน

แรงดันต่ำสุดของมอสเฟตกำลังหาได้จากความต้านทานของอุปกรณ์ R_{DS} สำหรับอุปกรณ์แรงดันต่ำค่าของ R_{DS} จะต้องมิต่ำสุดสำหรับแรงดันสูงค่า R_{DS} ต้องมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของ R_{DS} เป็นบวกเพิ่มกำลังได้

2.7 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter)

วงจรทอนระดับหรือวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ คือวงจรที่ทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกให้ต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า ที่เรียกววงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) ก็เพราะด้านออกต่ำกว่าแรงดันด้านเข้านั่นเอง



ภาพที่ 2.20 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

การทำงานของวงจรจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน โดยแบ่งตามการทำงานของมอสเฟตโดยแบ่งได้ดังนี้

กรณีสวิตช์ปิด (มอสเฟตนำกระแส)

เมื่อมอสเฟตนำกระแสทำให้ไดโอดได้รับการรีเวอร์สไบอัส จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$V_L = V_i - V_o \quad (2.7)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad (2.8)$$

$$(\Delta i_L)_{closed} = \frac{(V_i - V_o)DT}{L} \quad (2.9)$$

กรณีสวิตช์เปิด (มอสเฟตหยุดนำกระแส)

เมื่อมอสเฟตหยุดนำกระแส กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) ไม่สามารถเปลี่ยนทิศการไหลอย่างทันทีทันใดได้ ดังนั้นไดโอดจึงได้รับ Forward Bias จึงทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_L = -V_i \quad (2.10)$$

$$V_L = -V_o = \frac{L di_L}{dt} \quad (2.11)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta_{L,open}}{\Delta T} = \frac{V_o}{L} \quad (2.12)$$

$$\Delta i_{L(open)} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (2.13)$$

ในการทำงานที่สภาวะคงตัว กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น จากสมการ (2.9) กับ (2.13)

$$(\Delta i_L)_{closed} + \Delta i_{L(open)} = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{(V_i - V_o)DT}{L} - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T = 0 \quad (2.15)$$

$$(V_i - V_o)D - V_o(1-D) = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = D \quad (2.17)$$

การหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรบิกคอนเวอร์เตอร์

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.18)$$

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_o}{R} + \frac{(1-D)V_o}{2Lf} \quad (2.19)$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_o}{R} - \frac{(1-D)V_o}{2Lf} \quad (2.20)$$

ค่าตัวเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุดและความถี่ของการสวิตช์สำหรับโหมดกระแสต่อเนื่องของวงจรบิกคอนเวอร์เตอร์

$$(LF)_{min} = \frac{(1-D)R}{2} \quad (2.21)$$

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.22)$$

หาค่ากระแสลอคคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรบิกคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|\Delta Q| = \frac{T\Delta i_L}{8} \quad (2.23)$$

$$\Delta V_o = \frac{T\Delta i_L}{8C} \quad (2.24)$$

$$\Delta i_{L(open)} = \left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (2.25)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (2.26)$$

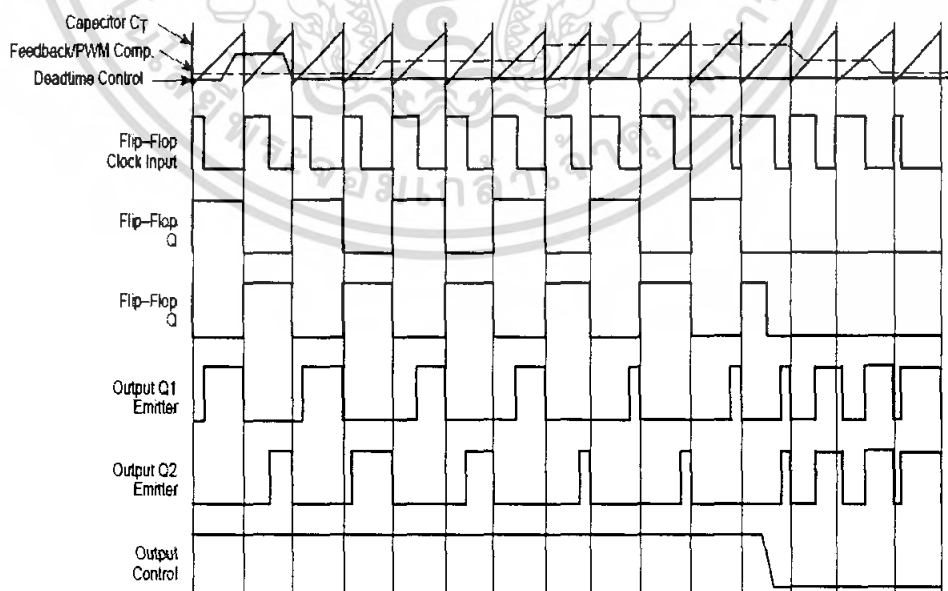
2.8 TL-494

เป็นอุปกรณ์ Switch mode Pulse Width Modulation Control Circuits ใช้ในการออกแบบขับ Switching Mode Power ด้านขาออก สามารถกำหนดความถี่ของ สัญญาณ Pulse ได้ โดยการปรับค่าของ R_T และ C_T จากสมการ

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T \cdot C_T} \quad (2.27)$$

และสามารถปรับค่าการ On Duty มากน้อยโดยขึ้นอยู่กับ แรงดันไฟฟ้าที่นำไปตัดผ่าน Saw tooth โดยใช้หลักการของ PWM ภายในของ TL 494 นั้นมี Flip Flop อยู่ 1 ตัว และมี $V_{Re ferrent}$ จำนวน 1 ตัว คือ ขา 14 สามารถนำแรงดันออกไปเปรียบเทียบกับได้ 5 V DC โดยการทำงานของ TL 494 ดังภาพที่ 2.21

โดย Saw tooth ลูกคลื่นจะอยู่ในทิศทางบวก และนอกจากนั้นยังมีอุปกรณ์ NOR Gates ซึ่งเอาไว้ขับ Output ของ Transistor Q1 และ Q2 ซึ่งจะมีทิศทางเป็นบวกเสมอ



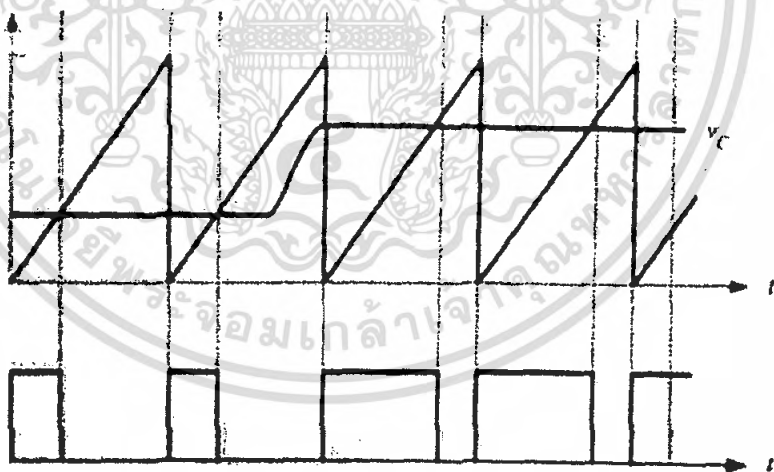
ภาพที่ 2.21 แสดงแบบการทำงานของ TL-494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ฟังก์ชันถ่ายโอนของ PWM

หน้าที่ของวงจร Pulse width modulation (PWM) ก็คือทำการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรขยายความคลาดเคลื่อนที่ถูกชดเชย (วงจรขยายความผิดพลาดที่ได้ชดเชยแล้ว) ให้กลายเป็นค่าดิวตี้ไซเคิลเพื่อไปขับขาเกตของสวิตช์ แรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจร (V_c) จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย (Saw tooth waveform) ที่มีขนาดเท่ากับ V_p ดังแสดงในภาพที่ 2.22 แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีวงจร PWM เมื่อแรงดันไฟฟ้า V_c มีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย และจะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อแรงดันไฟฟ้า V_c มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย

ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์ มีค่าลดต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง แรงดันไฟฟ้าคลาดเคลื่อนที่ไฟจากการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าทั้งสองค่าจะมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้แรงดันไฟฟ้า V_c มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ได้ค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่าเพิ่มขึ้น และด้วยค่า Duty cycle ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งได้ค่าแรงดันคลาดเคลื่อนเท่ากับที่ออกแบบและในทำนองกลับกัน กรณีที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น จะเป็นผลทำให้ค่าดิวตี้ไซเคิลจะมีค่าลดลง สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร PWM จะหาได้จากความสัมพันธ์เชิงเส้น (linear relation) ดังนี้



ภาพที่ 2.18 กระบวนการ PWM จะมีค่าแรงดันด้านออกก็ต่อเมื่อ แรงดัน V_c ที่ออกจากวงจร ความคลาดเคลื่อนที่ถูกชดเชยมีค่าสูงกว่าค่าของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

$$d = \frac{V_c}{V_p} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันโอนของวงจร PWM จะเท่ากับ

$$\frac{d(s)}{V_s(s)} = \frac{1}{V_p} \quad (2.30)$$

2.10 วงจรขยายความผิดพลาดที่มีการชดเชย (Error Amplifier with Compensation)

วงจรขยายความผิดพลาดที่มีการชดเชย หรือ (Error amplifier with compensation) ที่ต้องการความจะมีคุณลักษณะดังนี้

1. ควรจะมีวงจรรวมอินทิเกรต (Integrator) เพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำมีค่าสูง
2. ควรจะมีซีโรสองตัวที่ความถี่ต่ำกว่าจุดตัดเปลี่ยนความถี่ f เพื่อชดเชยเฟสที่มีค่าล้าหลังมากเกินไปเนื่องจากผลของวงจรรวมอินทิเกรตและคู่โพลเชิงซ้อน (Complex pole pair) ของวงจรรวมอินทิเกรต
3. ควรจะมีโพลสองตัวที่ความถี่สูง เพื่อที่จะให้ขนาดของวงรอบอัตราขยาย (Loop Gain) มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความถี่มีค่าสูงกว่า f และลดผลของสัญญาณรบกวนความถี่สวิตชิ่ง (Switching frequency noise)

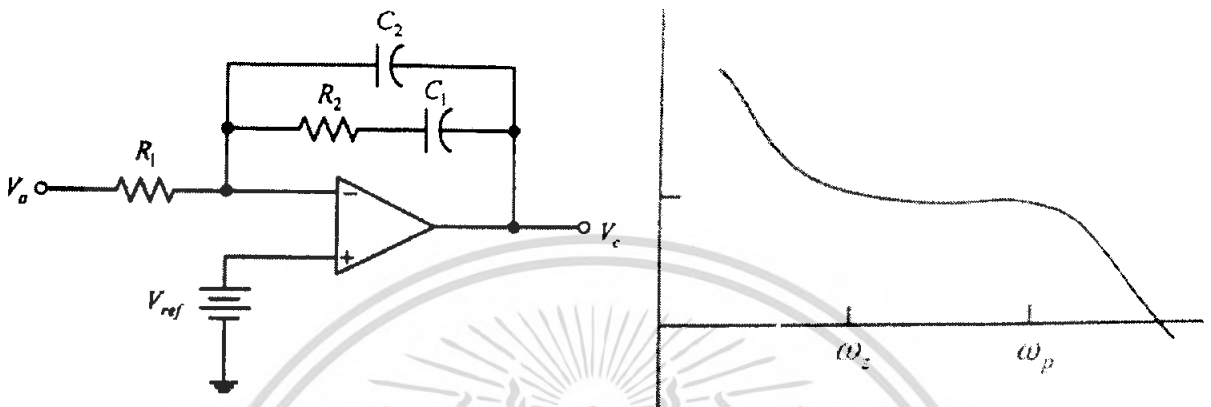
โดยวงจร Error amplifier จะทำการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าด้านนอกของคอนเวอร์เตอร์กับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงผลลัพธ์ที่ได้คือผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าทั้งสองค่า ซึ่งนิยามว่าหมายถึง ค่าแรงดันไฟฟ้าคลาดเคลื่อน ซึ่งจะนำไปใช้ในการปรับเปลี่ยนตัวดีไอซีเคิลในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ นอกจากนี้ การรวมวงจร Compensated ร่วมกับวงจร Error Amplifier จะมีผลทำให้ระบบมีเสถียรภาพ สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนสัญญาณขนาดเล็ก (กำหนดให้องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสเท่ากับศูนย์) ของวงจร Amplifier จะหาได้จากอิมพีแดนซ์ด้านเข้า Z_i และอิมพีแดนซ์ป้อนกลับ (Feedback impedance) Z_f อย่างไรก็ตามสำหรับวงจรขยายความผิดพลาดที่ได้ชดเชยแล้วที่นิยมใช้สำหรับวงจรมักจะได้แก่ วงจร Type 2 วงจรขยายความผิดพลาดที่ได้ชดเชยแล้ว ซึ่งสามารถค่า

$$Z_i = R_1 \quad (2.31)$$

$$Z_f = \left(R_1 + \frac{1}{sC_1} \right) // \frac{1}{sC_2} \quad (2.32)$$

จะได้ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนเท่ากับ

$$\frac{\bar{v}_c(s)}{v_0(s)} = -\frac{Z_f}{Z_i} = -\frac{\left(R_2 + \frac{1}{sC_1}\right) \frac{1}{sC_2}}{R_1 \left(R_2 + \frac{1}{sC_1} + \frac{1}{sC_2}\right)} \quad (2.33)$$



(ก) Type2 วงจรขยายความผิดพลาดที่ได้ชดเชยแล้ว (ข) ผลตอบสนองเชิงความถี่

ภาพที่ 2.23 (ก) Type 2 วงจรขยายความผิดพลาดที่ได้ชดเชยแล้ว (ข) ผลตอบสนองเชิงความถี่จุดเพิ่มเติมโดยกำหนดให้ $C_2 \ll C_1$

$$\frac{\bar{V}_c(s)}{V_c(s)} = -\frac{s + \frac{1}{R_2 C_2}}{s R_1 C_2 \left(s + \frac{C_1 + C_2}{R_2 C_1 C_2}\right)} \approx -\frac{s + \frac{1}{R_2 C_1}}{s R_1 C_2 \left(s + \frac{1}{R_2 C_2}\right)} \quad (2.33)$$

ค่าโพล(Pole) และซีโร (Zero) ของฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ (2.41) จะมีค่าเท่ากับ

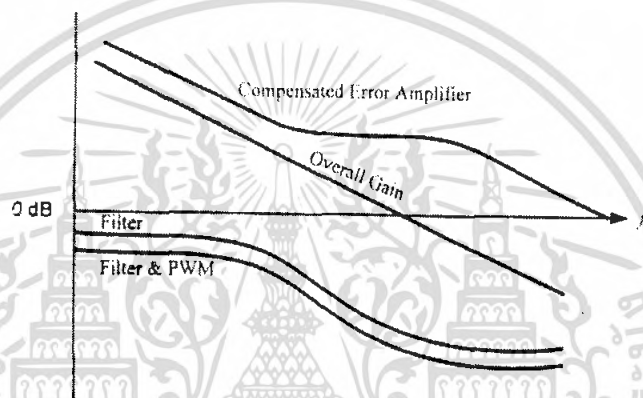
$$\omega_s = \frac{1}{R_2 C_1} \quad (2.34)$$

$$\omega_p = \frac{C_1 + C_2}{R_2 C_1 C_2} \approx \frac{1}{R_2 C_2} \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.23 (ข)แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency response) ของวงจรวางจรขยายความผิดพลาดที่ได้ชดเชยแล้ว ผลตอบสนองความถี่รวมของระบบที่ต้องการ (Overall control system) จะสามารถกำหนดได้ด้วยการเลือกค่าพารามิเตอร์ R_1 R_2 C_1 และ C_2 ให้เหมาะสม

ภาพที่ 2.24 ตัวอย่างผลรวมผลตอบสนองความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรวางจร PWM สวิตช์และวงจรวงจรกรองสำหรับวงจรวอร์เรียดคอนเวอร์เตอร์ โดยผลกระทบที่เกิดจากตัวต้านทานแฝงในตัวเก็บประจุ (ESR) จะทำให้เกิดจุดซีโรที่ความถี่ ($\omega = 1/r_c C$) นอกจากนี้ในการหาผลตอบสนองเชิงความถี่จะสามารถหาได้ด้วยการใช้โปรแกรม Pspice หรืออาจจะหาได้จากการคำนวณด้วยการแทนค่า $s = j\omega$ ในฟังก์ชันถ่ายโอนที่ต้องการทราบผลตอบสนองเชิงความถี่



ภาพที่ 2.24 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรวางจรควบคุม

2.11 การประมวลผลสัญญาณ

การประมวลผลสัญญาณจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ประมวลผลโดยสัญญาณดิจิทัล ซึ่งมีให้เลือกหลายชนิด เช่น DSP(TI) dsPIC(MICROSHIP)

dsPIC คือชื่อของไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิตจาก Microchip Technology inc. ผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ซึ่งรู้จักกันเป็นอย่างดีในแวดวงนักพัฒนาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ โดย Microchip Technology ได้กำหนดชื่ออย่างเป็นทางการสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์อนุกรมใหม่นี้ว่า **Digital Signal Controller** หรือ **DSC** นั้นหมายความว่า **dsPIC** เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่องานประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีความสามารถสูง

2.11.1 คุณสมบัติเด่นโดยรวมของ dsPIC

1. คุณสมบัติของซีพียู

-เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ซีพียูแบบ RISC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที

-มี 84 คำสั่งภาษาแอสเซมบลีมาตรฐาน รองรับรูปแบบการอ้างแอดเดรสได้อย่างอิสระ

-ชุดคำสั่งมีขนาด 24 บิต สามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต

-มีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบแฟลช สามารถลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 100,000 ครั้ง สามารถป้องกันการอ่านได้ และสามารถโปรแกรมตัวเอง โดยใช้กระบวนการทางซอฟต์แวร์

-มีหน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอมที่สามารถลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 1,000,000 ครั้ง

-มีอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์จำนวนมาก จึงรองรับการตอบสนองสัญญาณอินเตอร์รัปต์ได้ดี

-มีวงจรตรวจจับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้

-มีเพาเวอร์-อนรีเซต, เพาเวอร์-อัปเดตเมมรี่ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ต-อัปเดตเมมรี่

-มีวอตช์ด็อกไทเมมรี่แบบโปรแกรมได้

-มีวงจรตรวจสอบการทำงานของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

-รองรับการโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรม (ICSP : In-Circuit Serial Programming)

-สามารถเลือกโหมดการใช้พลังงานได้

2. คุณสมบัติด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

-มีแอกคิวมูเลเตอร์ขนาด 40 บิต 2 ตัว รองรับการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ได้เป็นอย่างดี

-มีหน่วยประมวลผลด้านการคูณและหารเลข 17 บิตในรูปของฮาร์ดแวร์จึงทำให้สามารถคูณและหารเลขได้อย่างรวดเร็ว

-ทำการคูณเลข 16 บิตได้ภายในสัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ไชเกิล

- มีตัวเลื่อนข้อมูลบาร์เรล 40 สเตจ ช่วยให้การประมวลผลข้อมูลที่จำนวนบิตมากๆ สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว

- มีวงจรเพดซ์ข้อมูลคู่ จึงทำให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว

3. คุณสมบัติของโมดูลฟังก์ชันพิเศษ

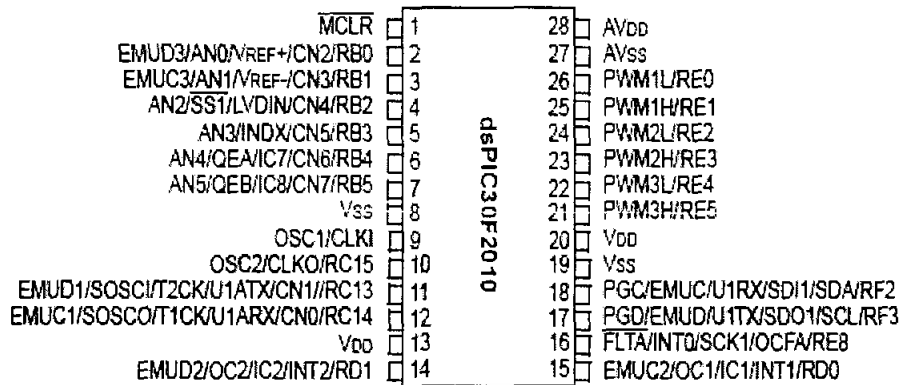
- สามารถจ่ายกระแสออกทางขาพอร์ตได้ 25 mA ทั้งแบบกระแสซิงก์และซอร์ส

- ไทเมมรี่/เคาน์เตอร์มีขนาด 16 บิต ไม่น้อยกว่า 3 ตัว ต่อใช้งานร่วมกันเป็นไทเมมรี่ 32 บิตได้

- มีโมดูลตรวจจับและเปรียบเทียบสัญญาณดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28-Pin SDIP and SOIC



ภาพที่ 2.26 การจัดขาใช้งานของไมโครคอนโทรเลอร์ dsPIC30F2010 [2]

1. คุณสมบัติของซีพียู

- มี 84 คำสั่งมาตรฐาน สามารถรองรับรูปแบบการอ้างแอดเดรสได้อย่างอิสระ
- ชุดคำสั่งมีขนาด 24 บิต สามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต
- มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ความจุ 12 กิโลไบต์ ลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 100,000 ครั้ง สามารถป้องกันการอ่านได้
- สามารถโปรแกรมหน่วยความจำโปรแกรมได้ด้วยตัวเอง โดยใช้กระบวนการทางซอฟต์แวร์
- มีหน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอม 1 กิโลไบต์ ลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 1,000,000 ครั้ง
- มีหน่วยความจำข้อมูลแรม 512 ไบต์
- รีจิสเตอร์ W จัดในรูปของอะเรย์ มีขนาด 16 บิต จำนวน 16 ตัว
- ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- ความถี่สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก ตั้งแต่ย่านไฟตรงจนถึง 40 MHz
- ความถี่สัญญาณนาฬิกาในกรณีใช้งานร่วมกับวงจรเฟสล็อกกลูภายใน ตั้งแต่ 4 MHz ถึง 10 MHz เลือกได้ 3 ระดับ คือ 4, 8 หรือ 16 เท่า
- รองรับแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์ได้สูงสุด 62 แหล่ง รวมทั้งการอินเตอร์รัปต์จากภายนอก 3 แหล่ง
- สามารถกำหนดระดับความสำคัญในการตอบสนองอินเตอร์รัปต์ได้ 8 ระดับ
- มีอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์ 48 ตำแหน่ง
- มีวงจรตรวจจับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้
- มีเพาเวอร์-อนรีเซต, เพาเวอร์-อัปไทเมอร์ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ท-อัปไทเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีวอตซ์ต็อกไทเมอร์แบบโปรแกรมได้
 - มีวงจรตรวจสอบการทำงานของวงจรถ้าเกิดสัญญาณนาฬิกา หากผิดพลาดจะเข้าสู่โหมดสัญญาณนาฬิกา RC พลังงานต่ำทันที
 - รองรับการโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรม (ICSP : In-Circuit Serial Programming)
 - สามารถเลือกโหมดการใช้พลังงานได้
 - ย่านไฟเลี้ยง 2.5 ถึง 5.5V กระแสไฟฟ้า 2.6 ถึง 44mA ที่ไฟเลี้ยง +5V ขึ้นอยู่กับ การกำหนดความเร็วในการทำงาน
2. คุณสมบัติด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
- มีแอสคิวิมูเลเตอร์ขนาด 40 บิต 2 ตัว รองรับการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ได้เป็นอย่างดี
 - มีหน่วยประมวลผลด้านการคูณและการหารเลข 17 บิตในรูปของฮาร์ดแวร์ จึงทำให้สามารถทำการคูณและหารเลขได้อย่างรวดเร็ว
 - ทำการคูณเลข 16 บิตได้ภายในสัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ไชเกิล
 - มีตัวเลื่อนข้อมูลบาร์เรล 40 สเตจ ช่วยให้ประมวลผลข้อมูลที่จำนวนบิตมากๆ ทำได้รวดเร็ว
 - มีวงจรเพดซ์ข้อมูลคู่ จึงทำให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว
3. คุณสมบัติของโมดูลฟังก์ชันพิเศษ
- สามารถจ่ายกระแสออกทางขาพอร์ตได้ 25 mA ทั้งแบบกระแสซิงก์และซอร์ส
 - ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 16 บิต 3 ตัว สามารถต่อใช้งานร่วมกันเป็นไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 32 บิตได้
 - มีโมดูลตรวจจับสัญญาณดิจิทัลขนาด 16 บิต 4 ชุด
 - มีโมดูลเปรียบเทียบข้อมูลและกำเนิดสัญญาณ PWM ความละเอียด 16 บิต 2 ชุด
 - ในการเปรียบเทียบข้อมูลสามารถเลือกการทำงานได้ 2 โหมด
 - มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมแบบSPI
 - มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์ผ่านระบบบัส I2C ทั้งแบบ 7 และ 10 บิต กำหนดเป็น มาสเตอร์หรือสลาฟได้
 - มีโมดูลสื่อสารข้อมูลอนุกรม UART พร้อมบัฟเฟอร์แบบ FIFO
 - มีโมดูลสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมมอเตอร์ 6 ช่อง
 - เลือกรูปแบบเอาต์พุตได้ทั้งแบบคอมพลีเมนต์และแบบฮิสเทร
 - มีโหมดปรับตำแหน่งการหมุนทั้งแบบปรับขอบสัญญาณและแบบกึ่งกลาง
 - มีส่วนกำเนิดตัวตีไชเกิล 4 ชุด
 - กำหนดฐานเวลาได้ 4 โหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถเลือกขั้วของสัญญาณทางเอาต์พุตได้
- มีสัญญาณกระตุ้นเพื่อให้ทำงานสัมพันธ์กับวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์
- สามารถควบคุมสัญญาณเอาต์พุตได้
- มีโมดูลเชื่อมต่อตัวเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์
 - มีอินพุต Phase A, Phase B และรับสัญญาณพัลส์เพื่อกำหนดตำแหน่ง
 - มีตัวนับตำแหน่งขนาด 16 บิต นับได้ทั้งขึ้นและลง
 - แสดงสถานะของทิศทางการนับได้
 - กำหนดโหมดของการวัดตำแหน่งได้ 2 โหมดคือ x2 และ x4
 - มีวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบดิจิตอลจากอินพุตแบบโปรแกรมได้
 - สำหรับกำหนดให้ทำงานเป็นไทเมอร์/เคาท์เตอร์ขนาด 16 บิตได้
 - กำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากตำแหน่งที่นับเกิน (rollover) หรือนับขาด (underflow)
- มีวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ความละเอียด 10 บิต 6 ช่อง
 - อัตราการสุ่มและแปลงสัญญาณ 500 กิโลแซมเปิลต่อวินาที
 - สามารถแปลงสัญญาณเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานในโหมดสลีปและโอเดิล ได้

2.11.3 สถาปัตยกรรมโดยสรุปของ dsPIC30F2010

1. หน่วยประมวลผลกลาง

หน่วยประมวลผลของ dsPIC30F2010 ใช้คำสั่งที่ความยาว 1 เวิร์ด ขนาด 24 บิต โดยมีโปรแกรมเคาน์เตอร์ขนาด 23 บิต (จริงๆ แล้วโดยโครงสร้างมี 24 บิต แต่ไม่สนใจบิต MSB ซึ่งก็คือบิต 23 และบิต LSB หรือบิต 0 กำหนดเป็น "0" จึงทำให้สามารถติดต่อหน่วยความจำโปรแกรมได้สูงสุด 4 เมกะเวิร์ด) เพื่อแจ้งแอดเดรสของหน่วยความจำโปรแกรมที่เข้าไปประมวลผล dsPIC30F2010 มีความจุของหน่วยความจำโปรแกรม 12 กิโลไบต์ เมื่อคำสั่งมีความยาว 24 บิต จึงบรรจุคำสั่งได้จริง 4 กิโลเวิร์ด

รีจิสเตอร์หลักที่ใช้ในการทำงานคือ รีจิสเตอร์ W (Working register) สำหรับใน dsPIC จะแตกต่างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC อย่างมากโดยรีจิสเตอร์ W ได้รับการจัดโครงสร้างเป็นอาร์เรย์ขนาด 16 บิต จึงทำให้สามารถรองรับทั้งข้อมูล, ค่าแอดเดรส หรือค่าของรีจิสเตอร์ใดๆ ที่ต้องนำมาประมวลผลโดยใน dsPIC มีรีจิสเตอร์ W ให้ใช้งานถึง 16 ตัว ส่วนใหญ่ใช้ในการประมวลผลหลัก ส่วนอีกตัวหนึ่งก็คือ รีจิสเตอร์ W15 จะใช้ทำงานร่วมกับตัวชี้สแต็กในการทำงานของโปรแกรมย่อยและบริการอินเตอร์รัปต์

ด้านการตอบสนองอินเตอร์รัปต์นั้น dsPIC30F2010 มีการจัดสรรพื้นที่เก็บค่าอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์ไว้มากถึง 54 ตำแหน่ง และยังสามารถกำหนดระดับความสำคัญได้อีก 8 ระดับ อีกด้วย

2. หน่วยความจำ

dsPIC30F2010 มีหน่วยความจำโปรแกรม 4 กิโลเวิร์ด แอดเดรสอยู่ในช่วง 0x000100 ถึง 0x001FFE สามารถโปรแกรมหรือเขียนข้อมูลลงไปได้ 2 วิธี คือ

1. โดยใช้การโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรมหรือ ICSP ผ่านทางขา PGD และ PGC (ขาที่ 17 และ 18) แล้วบิอนสัญญาณพัลส์แรงดันสูงสำหรับโปรแกรมผ่านเข้ามาทาง ขา MCLR
2. โปรแกรมตัวเองในขณะที่ทำงานหรือ RTSP (Run Time Self-Programming)

ส่วนหน่วยความจำข้อมูลแรมนั้น dsPIC30F2010 ได้จัดสรรเป็น 2 ส่วนคือ หน่วยความจำข้อมูลแรม X และ Y แต่ละส่วนมีขนาด 16 บิต ความจุ 256 ไบต์ รวมเป็น 512 ไบต์ โดยในแต่ละส่วนจะมีตัวกำหนดแอดเดรสแยกออกจากกัน เรียกว่า AGU (Address Generation Unit)

ในขณะที่หน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอม dsPIC30F2010 จัดสรรไว้ที่แอดเดรส 0x7FFC00 ถึง 0x7FFFE มีความจุ 1 กิโลไบต์

3. ส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP Engine)

นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งของ dsPIC เนื่องจาก dsPIC ได้รับการออกแบบมาให้ทำงานในด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นหลัก ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มความสามารถในหน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิกอย่างมาก โดยในส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมีหน่วยจัดการคูณเลขขนาด 17x17 บิตความเร็วสูง, หน่วยประมวลผลทางคณิตศาสตร์และลอจิกหรือ ALU ขนาด 40 บิต อีก 2 ตัว และตัวเลื่อนข้อมูล 2 ทิศทางแบบบารเรล (barrel shifter) ขนาด 40 บิต จึงทำให้สามารถจัดการข้อมูลขนาด 16 บิต ได้เสร็จสิ้นภายในสัญญาณนาฬิกาเพียงไซเคิลเดียว

4. โมดูลฟังก์ชันพิเศษ

dsPIC30F2010 ได้รวมเอาโมดูลสำหรับทำงานเฉพาะทางไว้อย่างมากมาย ไม่ว่าจะเป็นโมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล ความละเอียด 10 บิต, โมดูลเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมหรือ SPI, โมดูลสื่อสารข้อมูลบนระบบบัส I2C, โมดูลสื่อสารข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรมหรือ UART, ไทมเมอร์ขนาด 16 บิตถึง 3 ตัว และที่เป็นพิเศษอีก 2 โมดูลคือ โมดูลสร้างสัญญาณ PWM เพื่อการควบคุมมอเตอร์และโมดูลเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์ โดยสามารถใช้งานร่วมกันเพื่อสร้างระบบควบคุมมอเตอร์แบบปิดประสิทธิภาพสูง

5. พอร์ตอินพุตเอาต์พุต

dsPIC30F2010 มีพอร์ตให้ใช้งานมากถึง 5 พอร์ต รวม 40 ขา ดังนี้

พอร์ต B มี 9 ขา คือ RB0-RB8

พอร์ต C มี 2 ขา คือ RC13-RC14

พอร์ต D มี 3 ขา คือ RD0-RD3

พอร์ต E มี 7 ขา คือ RE0-RE5, RE8

พอร์ต F มี 7 ขา คือ RF0-RF6

2.11.4 โครงสร้างทางโปรแกรมที่ควรทราบ

ในภาพที่ 2.30 แสดงโครงสร้างทางโปรแกรมหรือ Programmer's model ของ dsPIC ที่นักพัฒนาต้องทราบ ซึ่งประกอบไปด้วย

- (ก) รีจิสเตอร์ W ขนาด 16 บิตมากถึง 16 ตัว โดยตัวที่ใช้งานเป็นหลักคือ W0 ส่วนตัวที่ถูกนำไปใช้ในส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมี 10 ตัว คือ W4-W13 ส่วน W14 ถูกนำไปใช้ร่วมเป็นตัวซีเฟรม และ W15 ถูกนำไปใช้ร่วมเป็นตัวซีสแต็ก
- (ข) แอควิวมูลเตอร์ 40 บิต จำนวน 2 ตัว ใช้ในงานประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นหลัก
- (ค) โปรแกรมเคาน์เตอร์ ขนาด 24 บิต นำมาใช้ในการแจ้งแอดเดรส 24 บิต โดยไม่สนใจบิต MSB และบิต LSB ต้องเป็น "0"
- (ง) รีจิสเตอร์หลัก อันประกอบไปด้วย

STATUS ซึ่งใช้แสดงสถานการณ์ทำงาน มีขนาด 16 บิต

CORCON ใช้ควบคุมการทำงานของหน่วยประมวลผลกลาง มีขนาด 16 บิต

TBLPAG เป็นรีจิสเตอร์กำหนดเพจของตารางข้อมูลในหน่วยความจำโปรแกรม มีขนาด 8 บิต

PAVPAG เป็นรีจิสเตอร์แสดงแอดเดรสของพื้นที่โปรแกรม มีขนาด 8 บิต

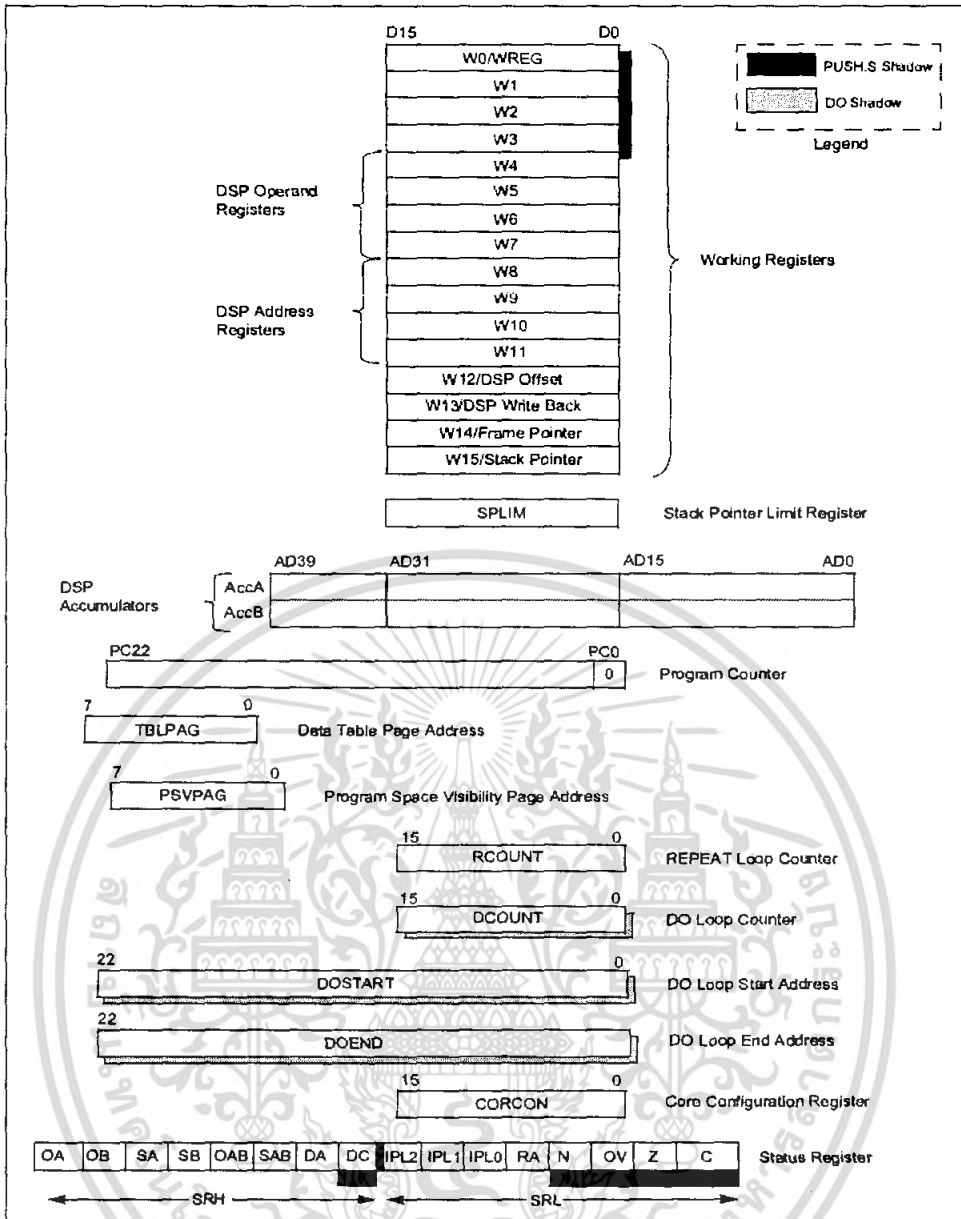
RCOUNT เป็นรีจิสเตอร์เก็บค่าตัวนับจำนวนรอบของลูปที่ทำซ้ำ

DCOUNT เป็นรีจิสเตอร์เก็บค่าตัวนับจำนวนรอบของลูปที่ทำงาน

DOSTART เป็นรีจิสเตอร์กำหนดแอดเดรสเริ่มต้นทำงานของโปรแกรมลูป

DOEND เป็นรีจิสเตอร์กำหนดแอดเดรสปลายทางที่ต้องการทำโปรแกรมลูป

สำหรับรีจิสเตอร์ DCOUNT, DOSTART และ DOEND เป็นรีจิสเตอร์เงา (shadow register) หมายความว่า เป็นรีจิสเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้นชั่วคราวเพื่อเก็บค่าก่อนที่จะมีการถ่ายเทออกไปทำงาน จึงไม่สามารถเข้าถึงรีจิสเตอร์เหล่านี้ได้โดยตรง



ภาพที่ 2.27 โครงสร้างทางโปรแกรม (Program's model)ของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC [2]

1. สแต็กพอยน์เตอร์และเฟรมพอยน์เตอร์ทางซอฟต์แวร์

ใน dsPIC ได้บรรจุสแต็กทางซอฟต์แวร์ขึ้นมา โดยใช้รีจิสเตอร์ W15 เป็นตัวชี้ตำแหน่งของสแต็กหรือสแต็กพอยน์เตอร์ (software stack pointer) ซึ่งค่าของ W15 จะเปลี่ยนแปลงอัตโนมัติตามการกระโดดไปทำงานหรือออกจากโปรแกรมย่อย อย่างไรก็ตาม ก็ยังสามารถใช้งาน W15 เหมือนกับรีจิสเตอร์ W ตัวหนึ่งได้ด้วย แต่ถ้าไม่จำเป็นจริงๆ แนะนำให้สงวนรีจิสเตอร์ W15 นี้ไว้เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวชี้สแต็กหรือสแต็กพอยน์เตอร์จะเหมาะสมกว่า

W15 จะมีค่าเท่ากับ 0x0800 หลังจากการรีเซต ผู้พัฒนาสามารถกำหนดค่าใหม่ได้ตามต้องการภายในขอบเขตของหน่วยความจำข้อมูล

นอกจากนั้นใน dsPIC ยังมีตัวชี้กรอบหรือขอบเขตของสแต็กหรือเรียกว่า เฟรมพอยน์เตอร์ (software frame pointer) ด้วย โดยใช้รีจิสเตอร์ W14 ทำหน้าที่นี้ โดยการกำหนดค่าของ W14 สามารถกระทำผ่านคำสั่ง LNK และ ULNK (คำสั่งภาษาแอสเซมบลี) เช่นเดียวกันก็ยังสามารถใช้งาน W14 นี้ไว้เพื่อทำหน้าที่เป็นเฟรมพอยน์เตอร์จะเหมาะสมกว่า

2 รีจิสเตอร์ STATUS

ใน dsPIC รีจิสเตอร์ตัวนี้มีความสำคัญมาก เพราะใช้ในการแสดงสถานะการทำงานของซีพียู โดยรีจิสเตอร์ STATUS (SR) มีขนาด 16 บิต แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ SRH (บิต 8 ถึง 15) และ SRL (บิต 0 ถึง 7)

โดยใน SRH บรรจุนสถานะการนับวงและลบค่าของข้อมูลในส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นหลักที่ 6 บิตบน ส่วนบิต DA ใช้แสดงสถานะการทำงานของกระบวนการวนทำงานหรือทำลูป (DO loop active) สุดท้ายเป็นบิตเฟล็กแสดงการทดข้ามหลักหรือ Digit Carry (DC)

ส่วน SRL บรรจุนสถานะการทำงานของหน่วยประมวลผลทางคณิตศาสตร์และลอจิกหรือ ALU โดยแสดงในรูปของแฟล็ก (flag) ที่บิต C (เกิดการทด), Z (ค่าเป็นศูนย์), OV (ค่าเกิน), N (เกิดค่าลบ) นอกจากนี้ยังเก็บค่าของการจัดลำดับความสำคัญของการตอบสนองอินเตอร์รัปต์ไว้ที่บิต IPL0-IPL2 สุดท้ายมีบิตแสดงสถานะการทำงานของกระบวนการ REPEAT ซึ่งแสดงที่บิต RA

3. CORCON รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของหน่วยประมวลผลกลาง เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิตที่บรรจุบิตที่ควบคุมการทำงานของหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัลและส่วนทำงานโปรแกรมลูปทางฮาร์ดแวร์ นอกจากนี้ยังบรรจุบิตข้อมูลที่ทำงานร่วมกับการอินเตอร์รัปต์

4. รีจิสเตอร์ควบคุมเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของหน่วยประมวลผลกลางของ dsPIC

ประกอบด้วย

(1) MODCON (Modulo Control Register) : เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้เอ็นเอเบิลและกำหนดการเข้าถึงหน่วยความจำข้อมูลแบบโมดูล (modulo)

(2) XMODSRT และ XMODEND (X Modulo Start Address Register และ X Modulo End Address Register) : เป็นรีจิสเตอร์ใช้เก็บค่าแอดเดรสตั้งต้น (XMODSRT) และปลายทาง (XMODEND) ของหน่วยความจำข้อมูล Y ที่ใช้การเข้าถึงแบบโมดูล

(3) YMODSRT และ YMODEND (Y Modulo Start Address Register และ Y Modulo End Address Register) : เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้เก็บค่าแอดเดรสตั้งต้น (YMODSRT) และปลายทาง (YMODEND) ของหน่วยความจำข้อมูล Y ที่ใช้การเข้าถึงแบบโมดูล

(4) XBREV (X Modulo Bit-Reverse Register) : เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้กำหนดขนาดของบัพเฟอร์หรือหน่วยความจำข้อมูลชั่วคราวเพื่อใช้ในการเข้าถึงหน่วยความจำข้อมูลแบบกลับบิต

(5) DISICNT (Disable Interrupts Count Register) : เป็นรีจิสเตอร์ที่ถูกใช้ในการทำงานของคำสั่ง DISI เพื่อติสเอเบิลการอินเตอร์รัปต์ที่มีระดับความสำคัญในระดับ 1 ถึง 6

2.11.5 JX-dsPIC40

40-pin dsPIC microcontroller Project board

บอร์ดพัฒนาโครงการสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC รุ่น 40 ขา

1. คุณสมบัติทางเทคนิค

- ใช้ได้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC ตัวถึง DIP 40 ขา บนบอร์ดใช้เบอร์ dsPIC30F2010 สัญญาณาฬิกา
- ทำการใช้โปรแกรมและดีบั๊กได้ด้วย ICDX-30 หรือ ICD2 ของ Microchip (จัดซื้อแยก)
- เลือกโหมดการโปรแกรมและรันด้วยสวิทช์กดเพียงตัวเดียว พร้อมไฟแสดงสถานะ
- มีจุดต่อขาพอร์ตสำหรับทดลองและใช้งาน 5 พอร์ตคือ

RB0-RB8 9 ขา	RC13-RC14 2 ขา	RD0-RD3 4 ขา
RE0-RE5, RE8 7 ขา	RF0-RF6 7 ขา	
- มีภาคจ่ายไฟ +5V 800 mA บนบอร์ด - มีสวิทช์ RESET สำหรับรีเซ็ตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์
- จุดต่อโมดูล LCD โดยต่อขา D4-D7 กับพอร์ต RD0-RD3, ขา RS ต่อกับพอร์ต RF และขา E ต่อกับพอร์ต RF1
- วงจรเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรม RS-232 จำนวน 2 ชุด
 UART1 ต่อกับพอร์ต RC13และRC14 เลือกด้วยจัมป์เปอร์
 UART2 ต่อกับพอร์ต RF4และRF5 เลือกด้วยจัมป์เปอร์
- LED แสดงผลพร้อมตัวต้านทานจำกัดกระแส ทำงานที่ลอจิก "1" 4 ช่อง - ลำโพงเปียโซ
- สวิทช์กดติดปล่อยดับ 4 ช่อง พร้อมตัวต้านทานพูลอัป
- เทอร์มินอลบล็อก 4 ช่องสำหรับต่อกับโมดูล QEI (Quadrature Encoder Input)
- วงจรจ่ายแรงดัน 0-5V สำหรับทดลอง A/D ผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้
- พื้นที่สำหรับสร้างวงจรหรือ Proto area 3X2.5 นิ้ว จุดบัดกรี 170 จุด สามารถติดตั้งแผงต่อวงจรขนาดกลางได้
- ใช้ไฟเลี้ยงจากภายนอกผ่านแจ๊คอะแดปเตอร์หรือเทอร์มินอลบล็อก +9V ถึง +16V

2.ICDX-30 บอร์ดดีบั๊กเกอร์และโปรแกรมในวงจรสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC และ dsPIC มีคุณสมบัติทางเทคนิคมีดังนี้

- เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตอนุกรม RS-232

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ดีบั๊กเพื่อตรวจสอบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC แบบเฟลช และ dsPIC ได้
- ใช้เป็นเครื่องโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC แบบเฟลช และ dsPIC ได้
- ใช้งานร่วมกับ MPLAB IDE V6.2 ขึ้นไป
- มีฟังก์ชันทั้งหมดที่ต้องใช้ในการดีบั๊ก ไม่ว่าจะเป็นการกำหนดจุดหยุดการตรวจสอบหรือ break point, การรันโปรแกรมแบบ Single step หรือแบบเต็ม พร้อมทั้งแสดงผลการทำงานด้วย
- สามารถอัปเดตเฟิร์มแวร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ด้วยตนเองผ่านทางคอมพิวเตอร์
- มี LED แสดงผลการทำงาน POWER (แสดงการจ่ายไฟเลี้ยง) BUSY (แจ้งความพร้อมในการทำงาน) และ ERROR (แจ้งสถานะความผิดพลาด)
- สามารถอ่านและเขียนข้อมูลในหน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้
- สามารถโปรแกรมบิตกำหนดการทำงานทางฮาร์ดแวร์หรือ configuration bit ได้
- ใช้ไฟเลี้ยงจากภายนอก +9 ถึง +16V
- ใช้แจ็คแบบโมดูลาร์ 6 ขา (modular jack) สำหรับต่อสายสัญญาณเพื่อติดต่อกับบอร์ดเป้าหมาย (target board) โดยมีการจัดขาตรงกับแจ็ค ICD ของ ICD2 ของ Microchip
- ใช้งานได้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC แบบเฟลช (อนุกรม PIC12F/16F/18F) และ dsPIC ทุกเบอร์ที่รองรับการดีบั๊กในวงจรและการโปรแกรมแบบ ICSP และสามารถเพิ่มเติมได้ในอนาคต

สรุป

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบนั้นต้องใช้ความรู้หลายด้านนำมาประกอบกันเพื่อทำให้เกิดความเข้าใจที่ถูกต้องที่จะนำมาประกอบในการวิจัยซึ่งองค์ความรู้ต่างๆเหล่านี้ เราจะสามารถที่จะสืบค้นข้อมูลได้จากหนังสือและปริยญาณิพนธ์ต่างๆ และอีกส่วนหนึ่งก็คือการสืบค้นข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต ข้อมูลเหล่านี้จะเป็นพื้นฐานในการดำเนินการเพื่อใช้ในการปฏิบัติงานนั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นโดยจะส่งผลต่อความเข้าใจในเรื่องที่ทำอยู่

ในบทนี้ได้กล่าวถึง ทฤษฎีต่างๆด้วยกันหลายส่วนได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิง มอเตอร์ กระแสตรงแบบอนุกรม มอสเฟตกำลัง ฟังก์ชันถ่ายโอน PWM ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญในการออกแบบโปรแกรม

บทที่ 3

การออกแบบวงจรควบคุม

การออกแบบวงจรควบคุมมี 2 ส่วนด้วยกัน

1.1 ออกแบบวงจร Buck converter เพื่อนำมาควบคุมมอเตอร์ Blower

1.2 ออกแบบวงจร Start ระบบ PEMFC โดยใช้ Microcontroller

3.1 การออกแบบวงจรควบคุม Buck converter โดยใช้ TL494

3.1.1 สิ่งที่เป็นในการออกแบบวงจรควบคุมกระแส และ แรงดัน

คือ อุปกรณ์ในการขับ Switching หรือ อุปกรณ์ Switch โดยทั่วไปแล้ว การเลือกใช้อุปกรณ์ ทุกชนิดที่จะนำมาใช้ในวงจรมีความสำคัญมาก เนื่องจากอุปกรณ์ทุกชนิดมีผลต่อการควบคุม กระแสและแรงดันแทบทั้งสิ้น

การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเกดมีให้เราเลือกใช้อย่างหลากหลายแบบ เช่น การใช้ Microcontroller การใช้ IC ที่มีคุณสมบัติในการขับขาเกดต่างๆ ในการออกแบบวงจร Voltage Current Control นี้ใช้ IC เบอร์ TL 494 เนื่องจาก IC TL 494 มีคุณสมบัติสามารถที่จะเปรียบเทียบค่าสัญญาณของแรงดันได้ 2 ชุด โดยมีแรงดันในการเปรียบเทียบหรือ V_{REF} ที่ขา 14 มีแรงดัน +5 V แล้วเมื่อมีการนำแรงดันต่างๆ มาเปรียบเทียบก็จำเป็นที่จะต้องใช้ Voltage Divider ในการลดระดับแรงดันที่จะนำมาใช้ในการเปรียบเทียบ

การกำหนดความถี่ของ TL 494 ก็สามารถที่จะหาค่าได้ 2 ลักษณะ คือ จากการคำนวณ และจากกราฟ

1. การหาค่าความถี่ของ TL 494 จากการคำนวณโดยใช้สมการ

$$f_{osc} = \frac{1.1}{RT \cdot CT}$$

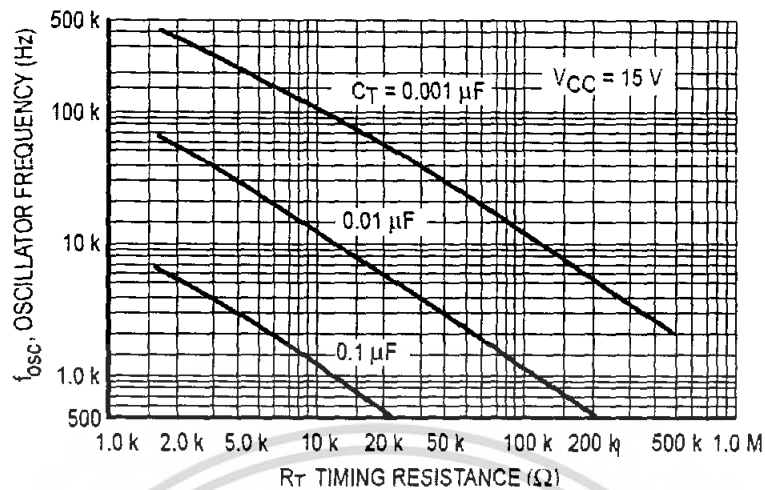
RT = ค่าความต้านทานที่อยู่ขา RT ของ TL 494 เพื่อสร้างความถี่ Oscillator

CT = ค่าของ Capacitor แบบ ไม่มีขั้วใช้เพื่อการสร้างความถี่ Oscillator

F_{osc} = ความถี่ Oscillator ที่จะนำไปใช้สร้างสัญญาณต่างๆ

2. การหาค่าความถี่ของ TL 494 โดยใช้กราฟในการหาสามารถหาได้สะดวกและรวดเร็ว
ยิ่งขึ้น

Figure 3. Oscillator Frequency versus Timing Resistance



ภาพที่ 3.1 กราฟหาความถี่

3.1.2 การทำงานของ RCD สนับเบอร์ด์

เมื่อเพาเวอร์มอสเฟตเริ่มหยุดนำกระแส แรงดันที่ขาเดรนจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มีกระแสบางส่วนไหลผ่านตัวเก็บประจุ C และไดโอด D₁ ของวงจรสับเบอร์ด์ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม C ด้วย แรงดันที่ตกคร่อม C จะทำให้แรงดันของเพาเวอร์มอสเฟตเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

ดังนั้นถ้าให้ C มีค่ามากพอการเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ขาเดรน จะถูกหน่วงออกไปเพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านเพาเวอร์มอสเฟตลดลงจนมีค่าน้อยๆ ได้ทันกัน และลดการเกิดกำลังงานสูญเสียได้ขณะที่เพาเวอร์มอสเฟตเริ่มนำกระแสอีกครั้ง ตัวเก็บประจุ C จะคายประจุผ่านตัวต้านทาน R ทิ้งไป แรงดันตกคร่อม ตัวเก็บประจุ C จึงลดต่ำลงไปอีกครั้งและสามารถทำงานได้ในช่วงต่อไป

ค่า C และ R ที่เหมาะสมอาจหาได้จากสมการที่ 3.1

$$C = \left(\frac{I_{p(pk)} * t_{off}}{2V_{in}} \right) \quad (3.1)$$

$$R = \frac{t_{on(min)}}{2.3C} \quad (3.2)$$

เมื่อ $I_{p(pk)}$	คือ ค่าแรงดันสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
V_{in}	คือ ค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์
t_{on}	คือ ช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
t_{off}	คือ ช่วงเวลาหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

จะได้

$$C = \frac{(I_p + t_{off})}{2V_{in}} \quad (3.3)$$

$$= \frac{(3 \times 40 \times 10^{-9})}{2 \times 36}$$

$$= 1.667 \text{ nF}$$

เลือกใช้ 3300 PF ซึ่งสามารถซื้อได้ในท้องตลาด

$$R = \frac{t_{on(min)}}{5C}$$

$$= \frac{(7 \times 10^{-6})}{5 \times 1.667 \text{ nF}}$$

$$= 3.47 \Omega$$

$$\approx 840 \Omega$$

กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นบน R

$$P_o = \frac{(C \times (2V_{in})^2)}{2T}$$

$$= \frac{(0.00167 \mu\text{F} \times (2 \times 36)^2)}{2 \times 5 \times 10^{-5}}$$

$$= 0.086$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การออกแบบวงจร Buck Converter เพื่อควบคุมความเร็วมอเตอร์ Blower

หลักการการทำงานของ Buck Converter เพื่อที่จะออกแบบให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามที่ต้องการ เงื่อนไขที่สำคัญสำหรับการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องคือกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะต้องเป็นบวกเสมอ สามารถนำมาใช้ในการหาค่าความเหนี่ยวนำและความถี่สวิตชิ่งในขั้นต้นได้ สิ่งที่น่าสนใจอย่างหนึ่งคือวงจร Buck Converter สามารถทำหน้าที่เหมือนหม้อแปลง

ทำการออกแบบวงจร Buck Converter เพื่อไปใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ดูดอากาศ เพราะว่าปกติจะใช้แรงดันอินพุทที่ 13.6 V เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ดูดอากาศแต่จากการวิเคราะห์เบื้องต้นทราบว่าเมื่อปรับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ดูดอากาศลงมาเรื่อย ๆ ปรากฏว่าแรงดัน Output ที่ออกมาจาก PEMFC มีแรงดัน Output เพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าเราต้องทำการลดระดับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ดูดอากาศที่แรงดันที่ 6-10 จึงได้ทำการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ดังนี้ กำหนดให้ $V_i = 36 \text{ V}$, $V_o = 5$, $R = 1.7$, $f = 20 \text{ kHz}$

หา Duty ratio

$$\frac{V_o}{V_s} = D$$

$$\frac{5V}{36V} = D$$

$$D = 0.14$$

หาตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดเล็กที่สุดของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ที่โหมดการทำงานกระแส

$$L_{\min} = \frac{(1-D) R}{2f}$$

$$L_{\min} = \frac{(1-0.14) \times 1.7}{(2 \times 20 \times 10^3)}$$

$$L = 36 \mu\text{H}$$

หาตัวเก็บประจุที่ทำให้อัตราระลอกคลื่นเท่ากับ 1 %

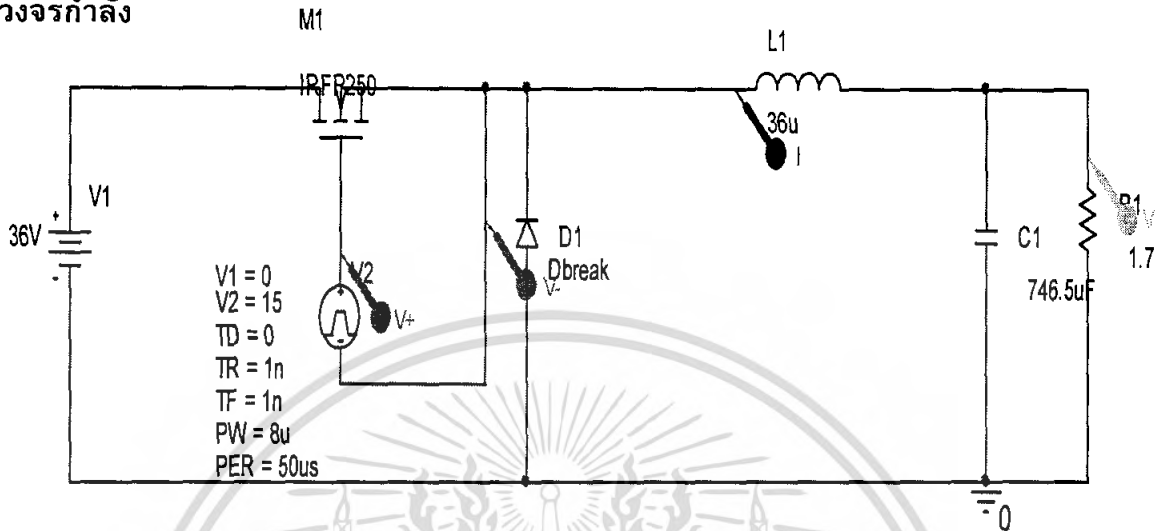
$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

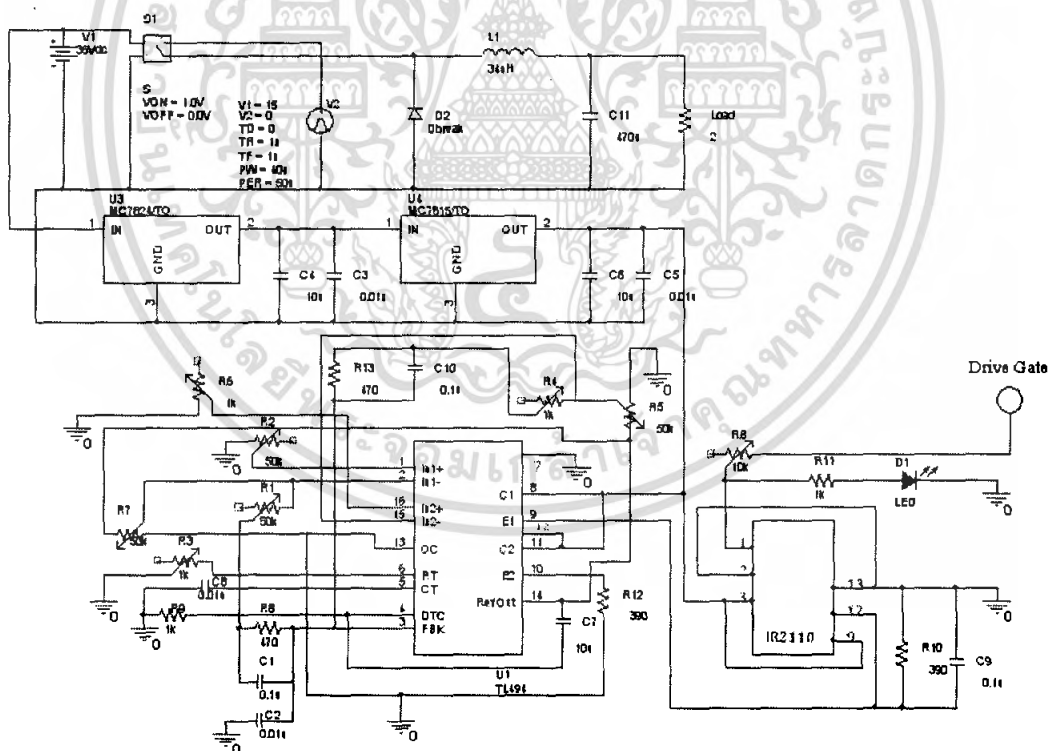
$$C = \frac{1 - 0.14}{(8 \times 36 \times 10^{-6} \times 20000^2 \times 0.01)}$$

C = 746.5 μF

วงจรกำลัง

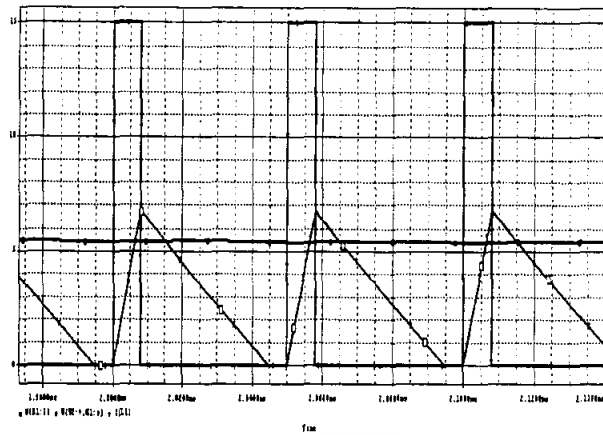


ภาพที่ 3.2 วงจร Buck Converter

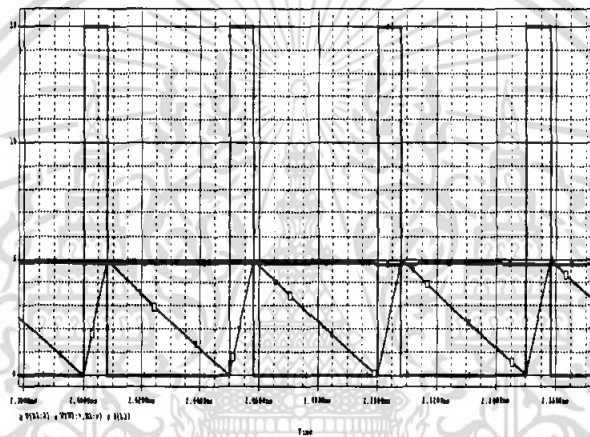


ภาพที่ 3.3 วงจรกำลัง Voltage Control โดยใช้ ไอซี TL 494 เป็นตัวควบคุม

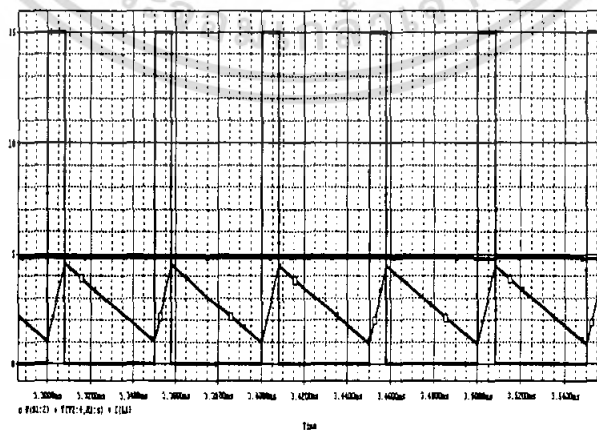
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 ผลการSimulation ที่ค่า Duty=0.14 , Vout=5, Vin=36V , L=36 μ H , C=746.5 μ F



ภาพที่ 3.5 ผลการ Simulation ที่ค่า Duty=0.14 , Vout=5, Vin=36 L= 50 μ H , C 1000 μ F



ภาพที่ 3.6 ผลการ Simulation ที่ค่า Duty=0.14 , Vout=5, Vin=36 , L=70 uH , c=1000 μ F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปการออกแบบวงจร Buck Converter

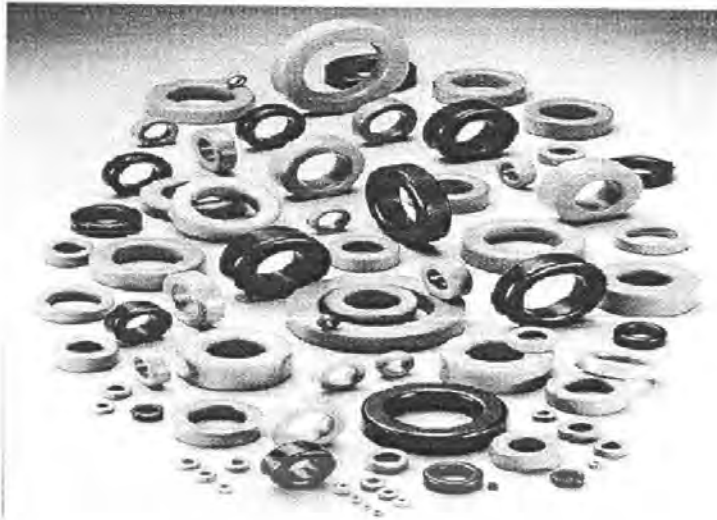
จากการ Simulation ด้วยโปรแกรม Orcad พบว่าค่า ตัวเก็บประจุที่ได้ออกจะเป็น 1000uF และ L ควรจะมีค่า 50 uH เนื่องมาจากว่าค่าตัวเก็บประจุตามที่ขอยืมไม่มีเบอร์ 746.5uF และค่า L ที่ได้จากการ Simulation เมื่อใช้ค่า $L_{min} = 36\mu H$ Duty = 0.14 พบว่ากระแส I_{Lmin} ไม่ต่อเนื่องและยังปรับ Duty ลดลง ก็จะทำให้กระแสไม่ต่อเนื่องเช่นกัน แต่เมื่อใช้ค่า $L_{min} = 50\mu H$ จะเห็นว่าที่ Duty = 0.14-0.74 กระแสยังอยู่ในโหมดต่อเนื่องและมีขนาดเล็กกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับที่ค่า $L = 70\mu H$ จะมีขนาดใหญ่กว่า และตรงไปตามแรงดัน Output ที่เราต้องการซึ่งเราต้องการ แรงดัน Output อยู่ในช่วง 5-10V Duty ที่สามารถปรับได้ของวงจรนี้จะอยู่ในช่วง 0.14-0.74 ซึ่งกระแสยังจะอยู่ในโหมดต่อเนื่อง

3.1.4 ตัวเหนี่ยวนำ (L) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับโหลด ช่วยและป้องกันการกระชากของกระแส ในช่วงที่ MOSFET off ในที่นี้จึงเลือกใช้ L ขนาด $36\mu H$ แกนแม่เหล็กชนิดผงโลหะอัด

กรรมวิธีการผลิตผงโลหะอัด จะเกิดจากสารอัลลอยด์ (alloy material) เป็นหลักในการทำเป็นผงแป้งละเอียด (fine powder) จากนั้นนำผงแป้งดังกล่าวผสมกับสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนซึ่งทำหน้าที่ในการแยกอนุภาค (particle) ต่างๆ ออกจากกัน ซึ่งจะเปรียบเสมือนกับเป็นการเพิ่มความต้านทานไฟฟ้าในตัวเอง จากนั้นจะนำมาขึ้นรูปแกนแม่เหล็ก ซึ่งโดยมากรูปทรงของแกนแม่เหล็กชนิดผงโลหะอัด มักจะอยู่ในรูปทรงทอลอยด์ (toroidal shape) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนั้นแกนแม่เหล็กแบบผงโลหะอัด จะมีคุณสมบัติในการสะสมพลังงานได้ดีจึงนิยมใช้ทำเป็นตัวเหนี่ยวนำและหม้อแปลงไฟฟ้าของวงจรพลาซมแบ็ก อย่างไรก็ตาม พลังงานไม่ได้สะสมอยู่ในส่วนที่มีค่าความขั้วซึมได้สูงๆ แต่จะสะสมอยู่ในย่านที่ไม่เป็นแม่เหล็ก (non-magnetic) หรือในย่านที่มีค่าความขั้วซึมได้ต่ำๆ ซึ่งกระจายอยู่ทั่วไปภายในแกนแม่เหล็กชนิดผงโลหะอัด โดยที่การแบ่งประเภทของแกนแม่เหล็กชนิดผงโลหะอัดจะแบ่งออกตามค่าความขั้วซึมได้ซึ่งจะอยู่ในย่าน $\mu_r = 15 \sim 200$ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคหรือส่วนผสมต่างๆ นอกจากนั้น แกนแม่เหล็กชนิดผงโลหะอัด ยังไม่นิยมใช้ทำเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (หม้อแปลงไฟฟ้าของวงจรพลาซมแบ็กจริงๆ แล้วจัดได้ว่าเป็นตัวเหนี่ยวนำ) เพราะมีค่าความขั้วซึมได้สัมพัทธ์ต่ำ เป็นผลทำให้ค่ากระแสทำแม่เหล็กจะมีค่าสูงและมีคุณสมบัติในการสะสมพลังงาน (energy storage) ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าไม่ต้องการคุณสมบัติดังกล่าว เพราะเมื่อค่ากระแสทำแม่เหล็กสูงหมายถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียจะมีค่าสูง และหน้าที่หลักของหม้อแปลงไฟฟ้าคือถ่ายเทพลังงาน (energy transfer) ไม่ใช่สะสมพลังงาน

แกนแม่เหล็กชนิดผงโลหะอัดจะแบ่งออกเป็นสามชนิด ได้แก่ Molypermalloy, High Flux และ Kool Mu[®] ซึ่งจะสามารถเปรียบเทียบในตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.7 แกนแม่เหล็กแบบทอลอยด์

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบ powder core แบบต่างๆ

	MPP	High Flux	Kool Mu
ค่าความสูญเสียในแกน	ต่ำที่สุด	ปานกลาง	ต่ำ
ความซาบซึมได้และไบอัสกระแสตรง	สูงมาก	สูงที่สุด	สูง
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (เกาส์)	7,500	15,000	10,500
ส่วนประกอบบนิเกิล	80%	50%	0%
ราคา	สูง	ปานกลาง	ต่ำ

ทางแม่เหล็กไฟฟ้านี้ จะเลือกใช้แบบวงแหวนเพื่อสร้างตัวเหนี่ยวนำสองตัวรวมแกนเดียวกันสามารถจะคำนวณเพื่อเลือกใช้แกนดังสมการ

$L = A_p N^2$ เมื่อพิจารณาจากสูตรเมื่อทราบค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการใช้ใ้ในวงจรกรองสามารถแทนค่าและได้ A_l และนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลแกนจากผู้ผลิตและเลือกใช้แกนที่เหมาะสม การเลือกใช้ลวดที่จะมาทำการพันตัวเหนี่ยวนำสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษ คือ ขนาดของกระแสที่วงจรกรองรองรับและขนาดหน้าตัดของแกนสำหรับพันลวดได้สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 ตัวเก็บประจุ (C) เป็นตัวกรองแรงดันขาออกของวงจรกำลังวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์เพื่อช่วยให้ค่า ripple voltage มีค่าน้อย นอกจากนี้ยังทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับโหลดอีกด้วย ในที่นี้ใช้ C ขนาด $1000\mu\text{F}$ 100V

ตารางที่ 3.2 พิกัดและชนิดของตัวเก็บประจุที่ใช้โดยทั่วไป

ชนิด	ความจุไฟฟ้า	พิกัดแรงดัน	การประยุกต์ใช้งาน	ย่านความถี่
เซรามิก (Ceramic)	$10\text{pF} - 1\mu\text{F}$	$50\text{V} - 30\text{kV}$	ราคาไม่แพงและใช้กับงานทั่วไป	$500\text{Hz} - 500\text{ MHz}$
สองชั้น (Dubble layer)	$0.1 - 1\text{F}$	$1.5 - 6\text{ V}$	สำรองสำหรับหน่วยเก็บความจำ(memory backup)	ต่ำกว่า 1 kHz
อิเล็กโทรไลติก (Electrolytic)	$0.1\mu\text{F} - 1.6\mu\text{F}$	$3 - 600\text{ V}$	วงจรกรองแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง	ต่ำกว่า 1 kHz
แก้ว (glass)	$10-1000\text{ pF}$	$100-600\text{ V}$	วงจรความถี่สูง	$1\text{ kHz} - 5\text{ GHz}$
ไมก้า(Mica)	$1\text{ pF} - 0.01\mu\text{F}$	$100-600\text{V}$	วงจรความถี่สูง	$1\text{ kHz} - 5\text{ GHz}$
ไมลาร์ (Milar)	$1\text{nF} - 50\mu\text{F}$	$50-600\text{ V}$	ราคาไม่แพงและใช้กับงานทั่วไป	$500\text{ Hz}- 500\text{ MHz}$
น้ำมัน(Oil)	$0.1 - 20\ \mu\text{F}$	$200\text{v} - 10\text{ kV}$	วงจรกรองแรงดันสูง	ต่ำกว่า 1 kHz
โพลีเอทิลีน	$10\text{pF} - 2.7$	$100 - 600\text{ V}$	วงจรกรองสัญญาณขนาดเล็กมีคุณภาพสูง และขนาดใหญ่	$\text{Dc} - 1000\text{MHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2(ต่อ) พิกัดและชนิดของตัวเก็บประจุที่ใช้โดยทั่วไป

โพลีเอทิลีน	10pF – 2.7	100 – 600 V	วงจรกรองสัญญาณขนาดเล็กมีคุณภาพสูง และขนาดใหญ่	Dc – 1000MHz
เปอร์ซีเลน (Porcelain)	100pF – 0.1 μ F	50 – 400V	ใช้งานได้นาน	500Hz – 500 MHz
แทนทาลัม (Tantalim)	0.1- 500 μ F	6 - 100 V	ความจุไฟฟ้าสูง	ต่ำกว่า 1 kHz
เทฟลอน (Teflon)	1nF – 2 μ F	50 - 200V	คุณภาพและ Dielectric	Dc – 1000MHz
สุญญากาศ (Vacuum)	1-5000 μ F	2- 36 kV	เครื่องส่งสัญญาณ	500Hz- 500MHz

3. มอสเฟต (MOSFET) ทำหน้าที่ในการสวิตชิงไฟเข้าสู่โหลดโดยได้รับสัญญาณควบคุมจากส่วนขยายสัญญาณ โดยในที่นี้จะเลือกใช้ Power MOSFET เบอร์ IRFP 4710

4. ไดโอด (Diode) ทำหน้าที่เป็น Free Wheeling Diode ในช่วงที่ MOSFET หยุดนำกระแส ทำให้กระแสไหลผ่านได้อย่างต่อเนื่อง โดยในที่นี้จะเลือกใช้ Ultra fast diode เบอร์ MUR 3060 PT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 ออกแบบวงจร Start ระบบ PEMFC โดยใช้ Microcontroller

3.2.1 โครงสร้างของ dsPIC30F2010

28-Pin SDIP and SOIC

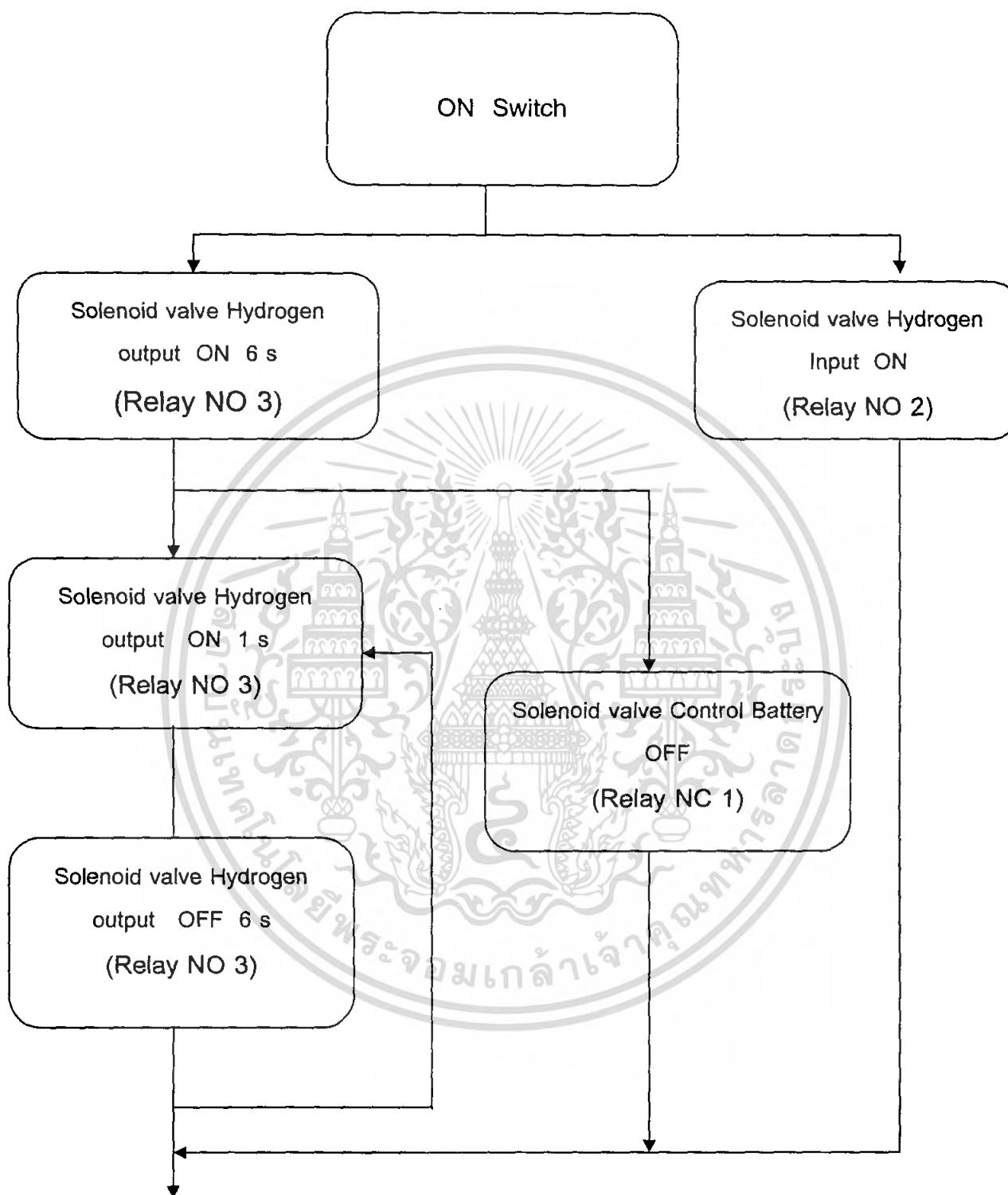
MCLR	1	28	AVDD
EMUD3/AN0/VREF+/CN2/RB0	2	27	AVSS
EMUC3/AN1/VREF-/CN3/RB1	3	26	PWM1L/RE0
AN2/SST/LVDIN/CN4/RB2	4	25	PWM1H/RE1
AN3/INDX/CN5/RB3	5	24	PWM2L/RE2
AN4/QEA/IC7/CN6/RB4	6	23	PWM2H/RE3
AN5/QEB/IC8/CN7/RB5	7	22	PWM3L/RE4
Ves	8	21	PWM3H/RE5
OSC1/CLKI	9	20	VDD
OSC2/CLKO/RC15	10	19	VSS
EMUD1/SOSCI/T2CK/U1ATX/CN1/RC13	11	18	PGC/EMUC/U1RX/SDI1/SDA/RF2
EMUC1/SOSCO/T1CK/U1ARX/CN0/RC14	12	17	PGD/EMUD/U1TX/SDO1/SCL/RF3
VDD	13	16	FLTA/INT0/SCK1/OCFA/RE8
EMUD2/OC2/IC2/INT2/RD1	14	15	EMUC2/OC1/IC1/INT1/RD0

ภาพที่ 3.8 โครงสร้างของ Microcontroller

เหตุที่เลือกใช้ Microcontroller เบอร์นี้มีการประมวลผลค่อนข้างเร็วและมีคุณสมบัติตรงตามที่เราต้องการคุณสมบัติเพิ่มเติมสามารถดูได้จาก datasheet ภาคผนวก

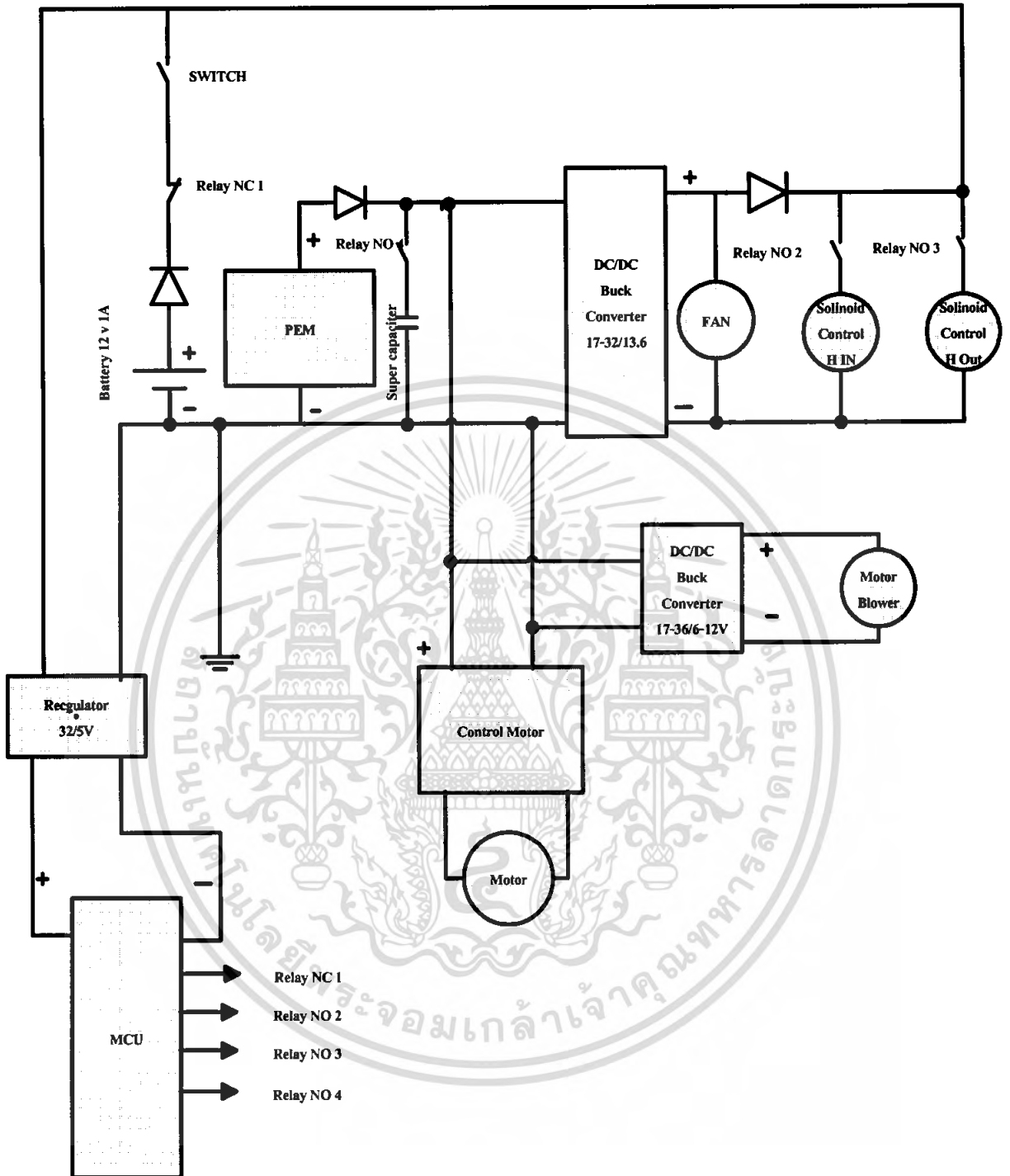
3.2.2 ขั้นตอนการทำงานของวงจร Microcontroller ที่ทำการออกแบบ

เมื่อทำการ ON main switch จะทำให้ Microcontroller เริ่มทำงานโดย Microcontroller จะไปสั่งให้ Solenoid valve Hydrogen Input ON (Relay NO 2) ทำงานทำให้ Hydrogen ไหลเข้าไปยังตัว เซลล์เชื้อเพลิงโดยจะทำงานอยู่ตลอดเวลาจะทำการ OFF ก็ต่อเมื่อ OFF main switch ในขณะเดียวกัน Solenoid valve Hydrogen output ON 6 s(Relay NO 3) เหตุที่ต้องทำงานที่ 6 Sก็เพื่อเป็นการเริ่ม start โดยให้ Hydrogen Flow ออกทางด้าน output และจะเกิดอิเล็กตรอนเกิดขึ้นที่ขั้ว คาโทด และ อาโนด หลังจากนั้นก็จะทำงานอีก 1 S และ Microcontroller จะสั่งให้ Solenoid valve Control Battery OFF(Relay NC 1) เพื่อที่จะตัดการจ่ายไฟของ Battery ออกจากระบบ โดย Battery จะทำหน้าที่ start เท่านั้น หลังจากนั้นระบบก็จะทำการปล่อย Flow ออก 1 s เพื่อเป็นการ Flow hydrogen นั้นเอง โดยมีรูป Flow Chart ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 Flow Chart การทำงานของการ Start

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.10 วงจร Start ระบบ PEMFC โดยใช้ Microcontroller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป

จากการออกแบบในบทนี้ได้มีการออกแบบในหลายส่วนของวงจร โดยแบ่งได้เป็น 3 ส่วนใหญ่ๆได้ดังนี้ คือ

1. ออกแบบวงจรควบคุมเป็นการออกแบบการควบคุม Duty มีหลักการทำงานคือสามารถปรับลดหรือเพิ่ม Duty ได้โดยอัตโนมัติโดยขึ้นอยู่กับ แรงดันที่แปรเปลี่ยนไปด้วยในกรณีต่างๆ เช่นแรงดันตกก็จะทำให้ Duty มีช่วง on ที่มากขึ้นทำให้คงที่แรงดันไว้ได้ตามที่

2. ออกแบบวงจรกำลัง หรือเรียกอีกอย่างว่า Buck converter ออกแบบให้สามารถทนกระแสไฟฟ้าได้ที่ 3 A และสามารถทนแรงดันให้ได้อยู่ที่ 100 V

จากการออกแบบเราต้องใช้ความรู้พื้นฐานในวิชา Power Electronic เข้ามาช่วยในการออกแบบซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องมีความรู้ความเข้าใจเรื่องนี้ โดยเฉพาะวงจร Buck Converter และ PWM

ในการออกแบบนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมากเพื่อเป็นพื้นฐานในการสร้างวงจร Voltage control หากไม่มีการคำนวณและการออกแบบที่ถูกต้อง หรือออกแบบผิดการดำเนินงานนั้น ก็จะเกิดอุปสรรคหรือปัญหาตามมาภายหลังหรืออาจแก้ไขได้ยุ่งยาก

3. การออกแบบวงจร Start for PEMFC ก็เพื่อเป็นการทำให้ระบบตอนเริ่ม Start ง่ายต่อผู้ใช้งานเพราะเนื่องจากได้พัฒนามาจาก Project ของปริญญาโทที่มีมาโดย ได้พัฒนาในส่วนของการควบคุมระบบของ PEMFC แต่การพัฒนาจะต้องมีส่วนที่ปรับปรุงคือเมื่อมีการดึงโหลดที่สูงขึ้นไม่สามารถที่จะควบคุมอัตราการไหลของปริมาณ ออกซิเจน และ ไฮโดรเจนได้ เพราะว่าเมื่อดึงโหลดเพิ่มขึ้นก็ต้องจ่ายปริมาณ ออกซิเจน และ ไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันเปรียบเสมือนเมื่อมนุษย์ได้มีการออกกำลังกายก็ต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อมาทดแทนร่างกาย อีกอย่างหนึ่งคือการที่จะกำหนดเวลาในการ Flow hydrogen นั้นยังเป็นเวลาที่ยังไม่ดีที่สุด ต้องมีการปรับปรุงต่อไป

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 วัตถุประสงค์

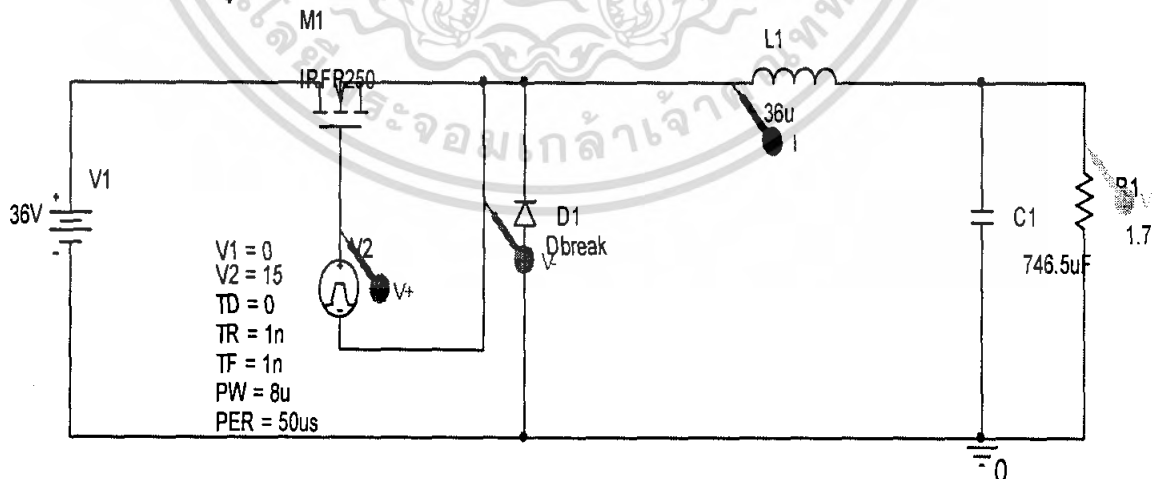
1. ทดลองการทำงานของวงจร ของ DC-DC Buck converter
2. ศึกษาอัตราการไหลของ Hydrogen ว่า PEMFC มีการใช้ปริมาณ Hydrogen มากน้อยเท่าใด
3. ทดลองวัดค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าภายในระบบเมื่อไม่ได้ต่อโหลด

4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดทดลองเพื่อการศึกษาวงจร DC-DC Buck converter
2. ชุดโหนดอิเล็กทรอนิกส์ขนาด 500V 600W 30A
3. มิเตอร์สำหรับวัดทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า
4. scope และ current probe
5. Supper Capacitor
6. เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500W

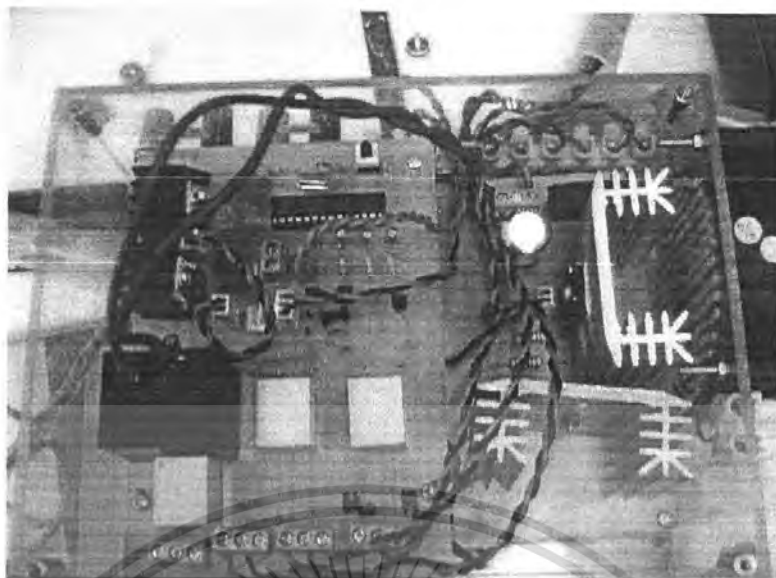
การทดสอบในบทนี้เป็นการนำเอาชุดควบคุมแรงดัน มาทำการทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรง โดยแหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดสอบได้ใช้เซลล์เชื้อเพลิง Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) การทดสอบกับโหลดแบ่งออกเป็น 2 ครั้งคือ ทดสอบเบื้องต้นกับโหลดที่เป็นโหนดอิเล็กทรอนิกส์แล้วจึงนำไปทดสอบกับโหลดที่เป็นรถไฟฟ้าจริงขณะขับเคลื่อนในการทดสอบจะเน้นการจ่ายกำลังไฟฟ้าว่าสามารถจ่ายโหลดได้สูงสุดเท่าใดและคำนึงถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับเซลล์เชื้อเพลิง โดยแบ่งการทดลองดังนี้

4.3 ทดสอบชุด Voltage Control DC-DC Buck converter



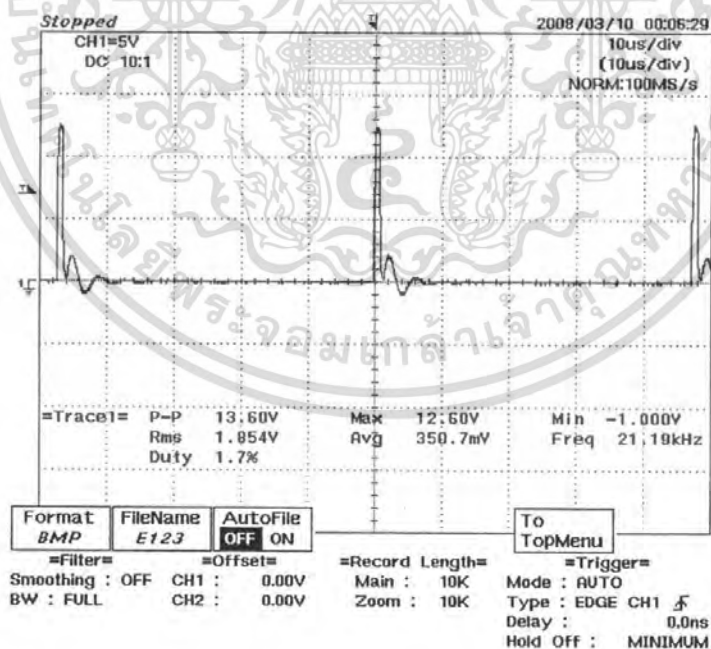
ภาพที่ 4.1 รูปวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



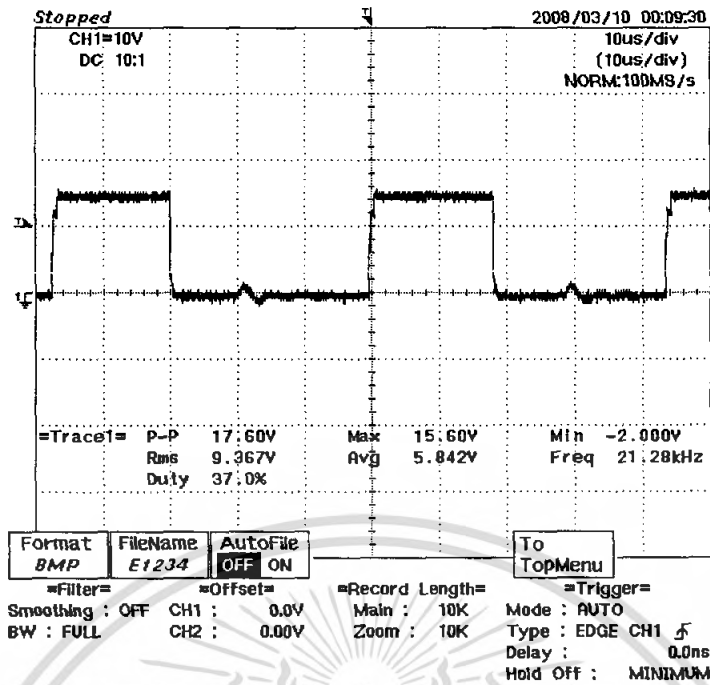
ภาพที่ 4.2 วงจรการทำงานจริง

ทดสอบวงจร Voltage Control DC-DC Buck converter ที่ใช้ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ Flow ออกซิเจนโดยใช้แรงดันอินพุตเท่ากับ 33 V และแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 6 V จะได้สัญญาณพัลส์ดังนี้



ภาพที่ 4.3 รูปสัญญาณพัลส์ขณะไม่มีโหลดของมอเตอร์ Flow ออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 รูปสัญญาณพัลส์ซึ่งมีโหนดของมอเตอร์ Flow ออกซิเจน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง Buck converter

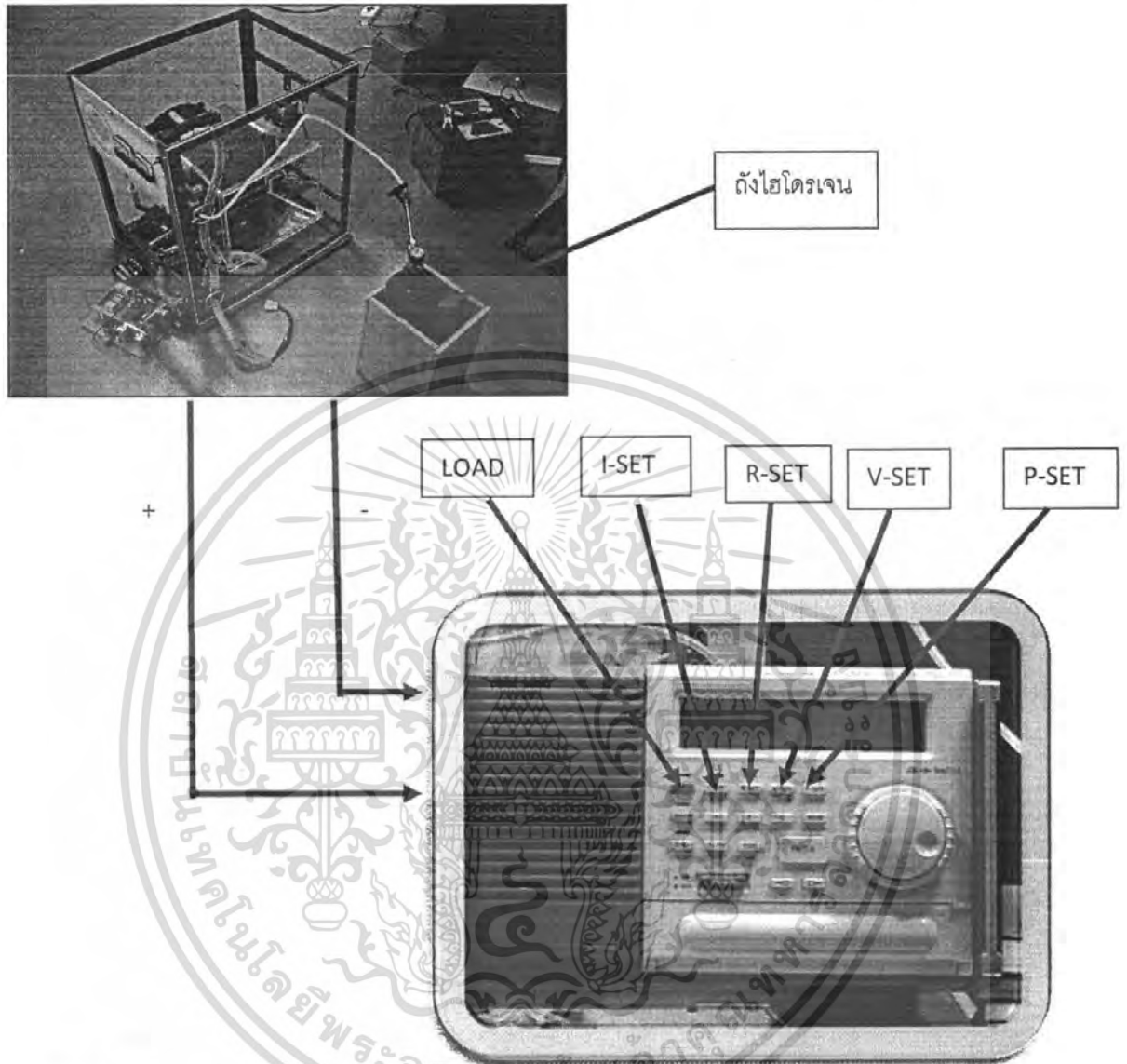
แรงดัน Input (V)	แรงดัน Output (V)
33	6
30	6
27	6
24	6
21	6
18	6
17	5
16	4.5

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเป็นการควบคุมแบบ Close loop ซึ่งรับพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง 33 V และผ่านวงจร Buck Converter ลดระดับแรงดันลงมาเหลือ 6 V เพื่อปรับความเร็วของมอเตอร์ Flow ออกซิเจนให้คงที่และควบคุมปริมาณออกซิเจนไม่ให้ไหลเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงมากเกินไป จากการทดสอบเมื่อแรงดัน Input ตกวงจร Buck converter สามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ได้ที่ 6 V จากสัญญาณพัลส์จะเห็นว่าเมื่อแรงดัน Input ตกพัลส์จะกว้างขึ้น เป็นข้อดีในการรักษาระดับแรงดันของ Buck converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

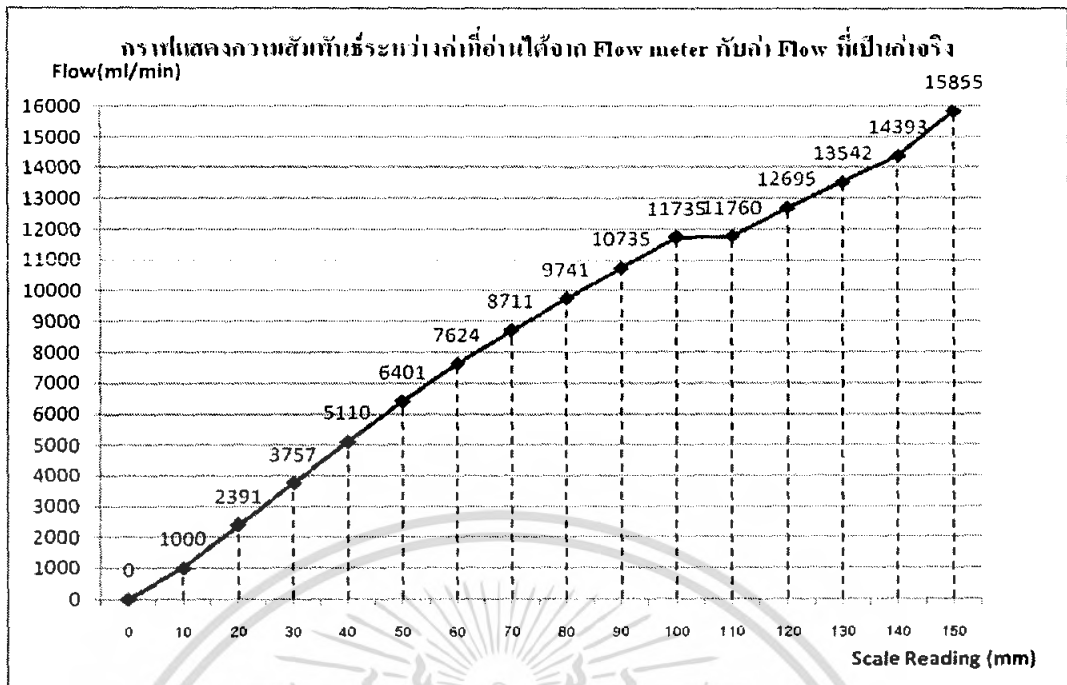
4.4 ทำการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในการจ่ายโหลดโดยใช้โหลดอิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ 4.5 การต่อวงจรเพื่อทำการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงโดยมีการต่อวงจร DC-DC Buck Converter ขณะจ่ายโหลดอิเล็กทรอนิกส์

ในการทดลองโหลดอิเล็กทรอนิกส์เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ PEMFC สามารถจ่ายได้ วัตต์ได้สูงสุด จากภาพที่ 4.5 เป็นการนำ PEMFC มาต่อกับโหลดอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งโหลด อิเล็กทรอนิกส์เป็นโหลดสามารถปรับวัตต์ได้สูงสุด 600W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



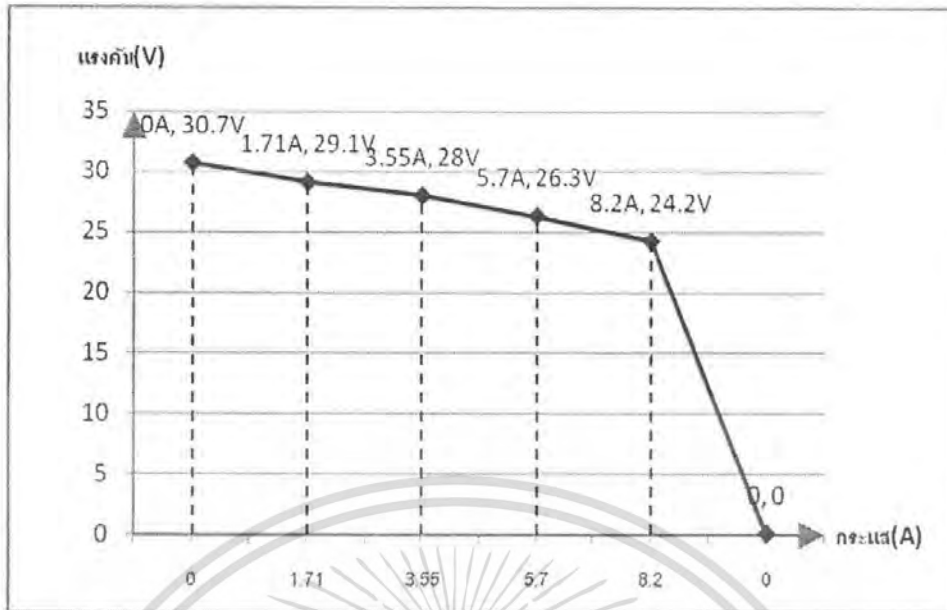
ภาพที่ 4.6 กราฟ Flow meter

เป็นกราฟที่อ่านค่าจาก Flow meter แล้วนำมาเทียบเป็นค่าจริง ซึ่งค่าที่อ่านได้จากสเกลของ Flow meter เป็นแกน Scale Reading(mm) แล้วนำไปเทียบกับแกน Flow(ml/min) จะเป็นค่าจริง เช่น ค่าที่อ่านจาก Flow meter เท่ากับ 10 mm แล้วนำมาเปรียบเทียบกับกราฟค่าที่ได้คือ 1000 ml/min (เป็นอัตราการไหลของไฮโดรเจนในหน่วยของ ml/min)

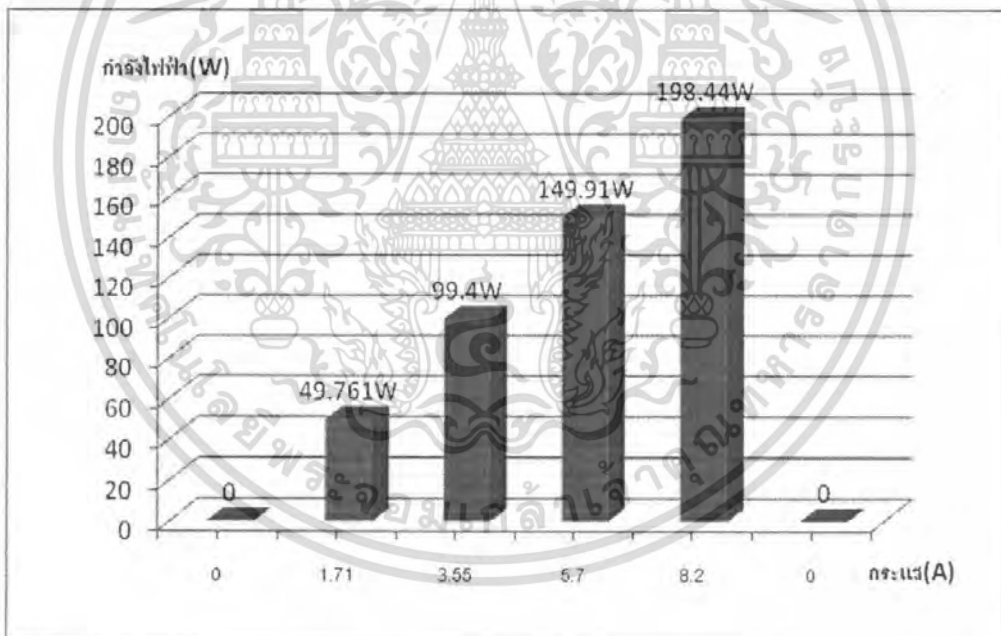
การทดสอบกับโหลดอิเล็กทรอนิกส์และจ่ายแรงดันคงที่ให้กับมอเตอร์ Flow ออกซิเจนที่ 6V ได้ค่าผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.2 ทดสอบกับโหลดอิเล็กทรอนิกส์กับแรงดันของมอเตอร์ Flow ออกซิเจนคงที่ 6V และ Flow meter 30mm ขณะไม่มี Supper capacitor

P set (W)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Pout (W)
0	30.7	0	0
50	29.1	1.71	49.761
100	28	3.55	99.4
150	26.3	5.7	149.91
200	24.2	8.2	198.44
250	0	0	0



ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส



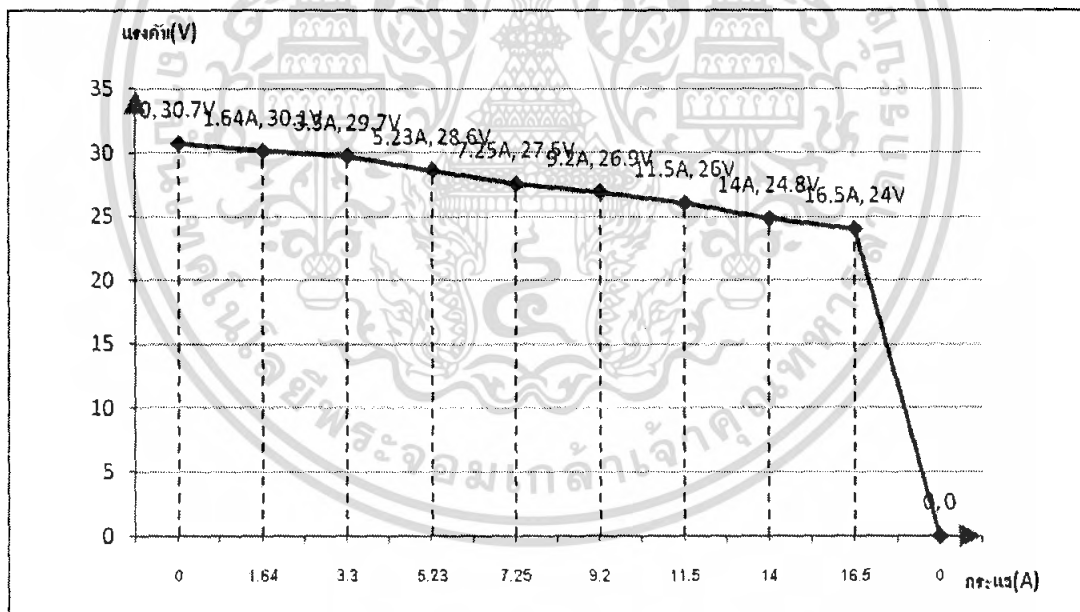
ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและกำลังไฟฟ้า

จากภาพที่ 4.7 เมื่อไม่มี Supper Capacitor ในขณะที่ No load กระแสจะมีค่าเป็นศูนย์ ทำการจ่ายโหลดที่ 200W มีค่าแรงดัน 24.2 V และกระแส 8.28A หลังจากนั้นสังเกตได้ว่าเมื่อทำการจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 250W แล้วแรงดันตกกลงทันทีที่ดั่งนั้นจึงจ่ายโหลดได้ไม่เกิน 200W และภาพที่ 4.8 จะเป็นกราฟของกำลังไฟฟ้าเทียบกับกระแสซึ่งมีค่าสูงสุดได้ 198.44W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

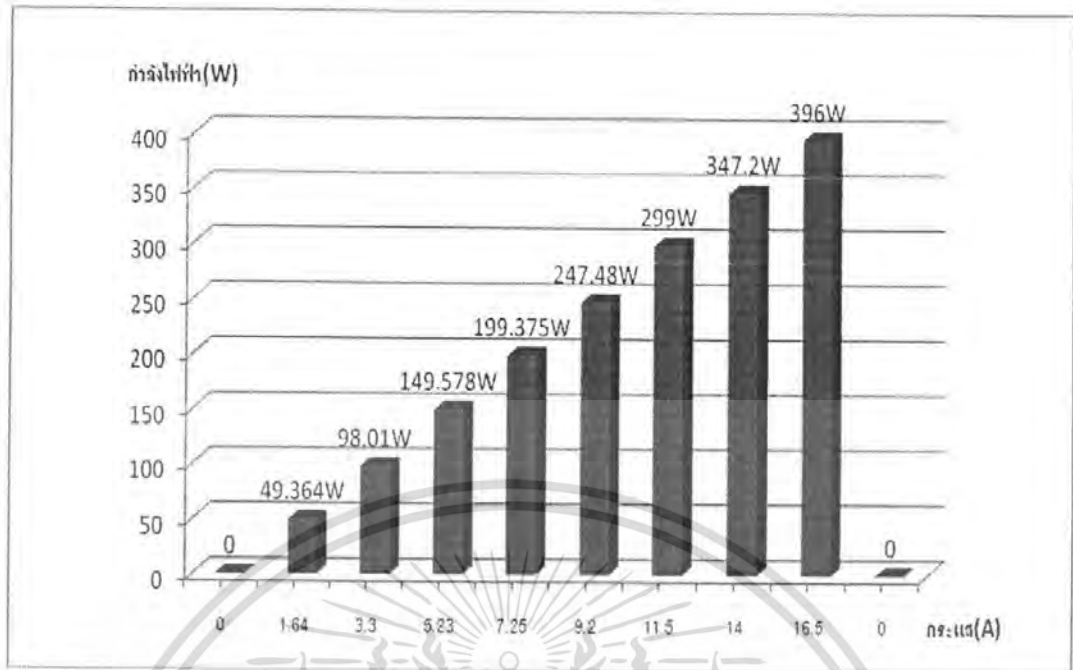
ตารางที่ 4.3 ทดสอบกับโหลดอิเล็กทรอนิกส์กับแรงดันของมอเตอร์ Flow ออกซิเจนคงที่ 6V และ Flow meter 30mm แบบต่อ Supper Capacitor

P set (W)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Pout (W)
0	30.7	0	0
50	30.1	1.64	49.364
100	29.7	3.3	98.01
150	28.6	5.23	149.578
200	27.5	7.25	199.375
250	26.9	9.2	247.48
300	26	11.5	299
350	24.8	14	347.2
400	24	16.5	396
450	0	0	0



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



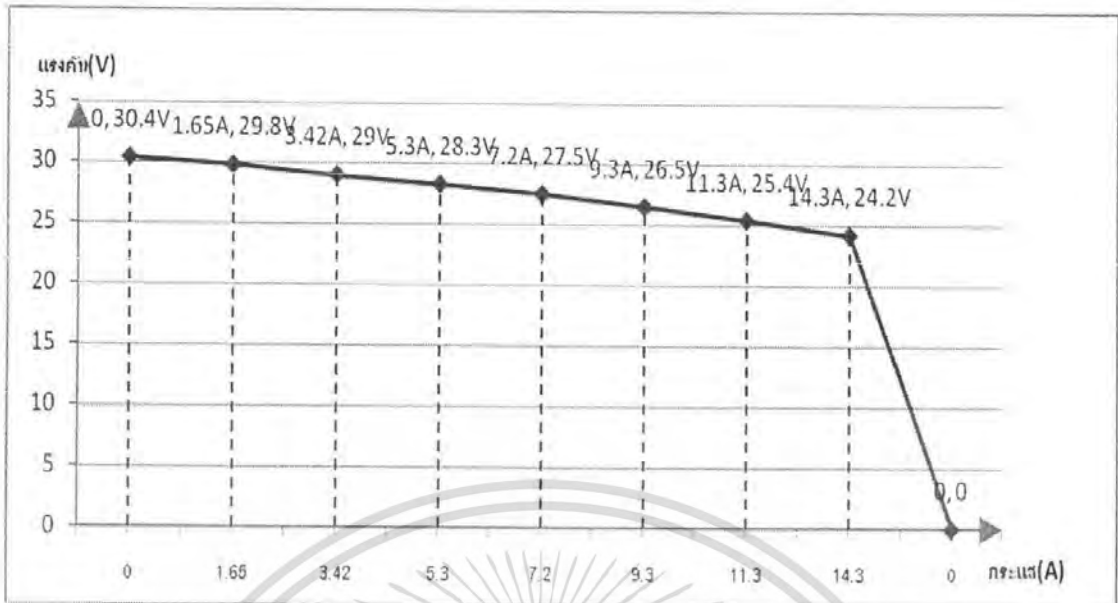
ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและกำลังไฟฟ้า

ภาพที่ 4.9 เมื่อมี Supper Capacitor ในขณะที่ No load แรงดันสูงสุดจะได้ 30.7V แล้วทำการจ่ายโหลดที่ 400W จะมีแรงดัน 24V กระแส 16.5A จะสังเกตได้ว่าในขณะที่ Supper Capacitor สามารถที่จะจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์รถไฟฟ้าได้จริง และภาพที่ 4.10 จะเป็นกราฟของกำลังไฟฟ้าเทียบกับกระแสซึ่งมีค่าสูงสุดได้ 396W

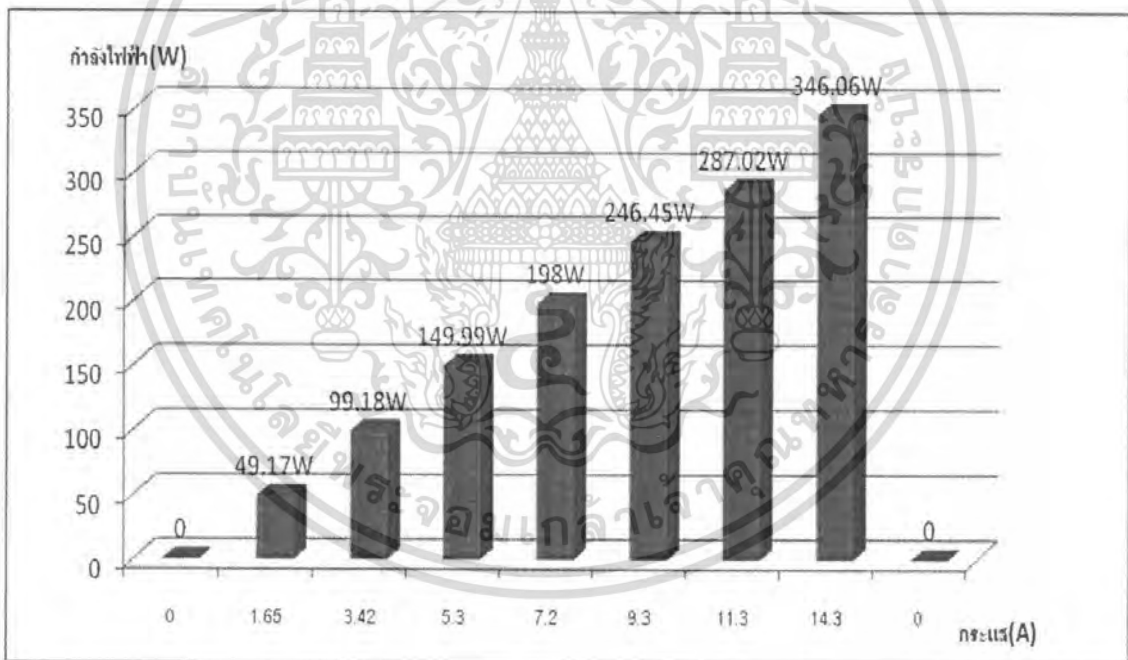
ตารางที่ 4.4 ทดสอบกับโหลดอิเล็กทรอนิกส์กับแรงดันของมอเตอร์ Flow ออกซิเจนคงที่ 6V และ Flow meter 20mm ขณะมี capacitor

P set (W)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Pout (W)
0	30.4	0	0
50	29.8	1.65	49.17
100	29	3.42	99.18
150	28.3	5.3	149.99
200	27.5	7.2	198
250	26.5	9.3	246.45
300	25.4	11.3	287.02
350	24.2	14.3	346.06
400	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



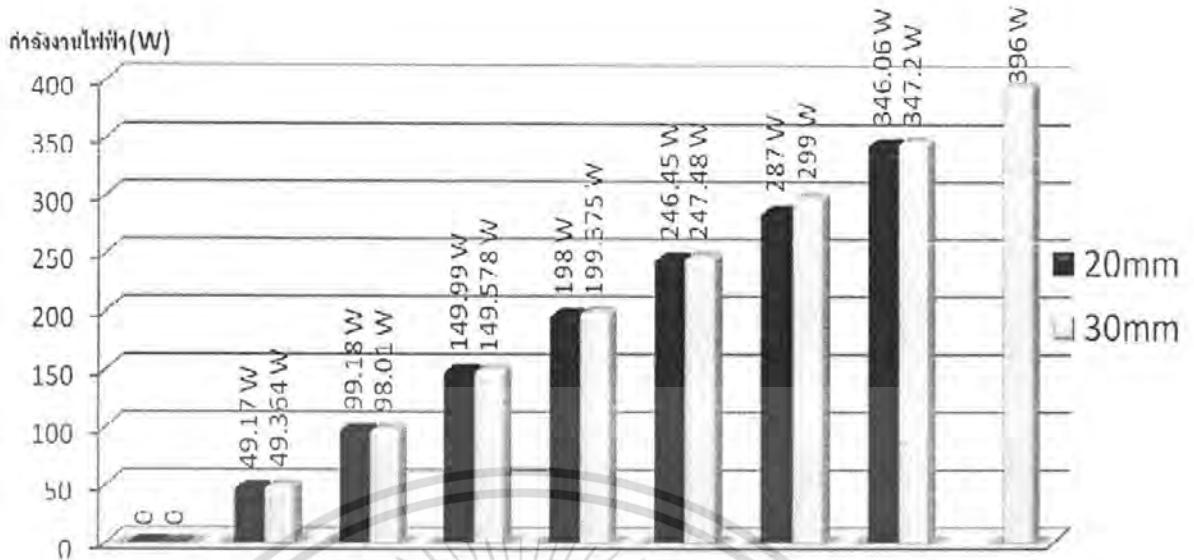
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส



ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและกำลังไฟฟ้า

ภาพที่ 4.11 เมื่อมี Supper Capacitor ในขณะที่ปรับ Flow meter 20mm แล้วจ่ายโหลดที่ 350W จะมีแรงดัน 24.2V กระแส 14.3A หลังจากนั้นทำการเพิ่มโหลดเป็น 400W ทำให้แรงดันและกระแสตกลงทันที ดังนั้นการปรับ Flow meter 20mm จึงไม่สามารถที่จะจ่ายโหลดให้กับรถไฟฟ้าได้ และภาพที่ 4.12 จะเป็นกราฟของกำลังไฟฟ้าเทียบกับกระแสซึ่งมีค่าสูงสุดได้ 346W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ความดันไฮโดรเจน 20mm กับ 30mm

จากภาพที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่ 3757 ml/min ได้กำลังเอาต์พุตสูงสุดซึ่งได้กำลังไฟฟ้าที่ 396W ดังนั้นจึงปรับอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่จะนำมาขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 3757 ml/min หรือ 30 Scale Reading(mm) จากสเกลของ Flow meter

4.5 ทดลองวัดค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าภายในระบบ

โดยการหาค่ากำลังไฟฟ้าจากการวัดค่าแรงดันและกระแสดังนี้

4.5.1 การสูญเสียกับพัดลมระบายอากาศให้กับตัว PEMFC

ซึ่งทำการทดลองซึ่งป้อนแรงดันที่ Converter 13.6 V และวัดกระแสได้ 1.44 A

ซึ่งจะได้จำนวนวัตต์เท่ากับ 19.584W

4.5.2 พัดลมระบายอากาศของชุดวงจร Buck Converter

ซึ่งทำการทดลองซึ่งป้อนแรงดันที่ Converter 13.6 V และวัดกระแสได้ 0.23 A ซึ่งจะได้จำนวนวัตต์เท่ากับ 3.128 W

และทำการวัดกระแสขณะรถไม่วิ่งจะมีกระแสประมาณ 2A จึงตามที่คำนวณ

4.5.3 มอเตอร์ Flow ออกซิเจน

ทำการทดลองป้อนแรงดัน 6V วัดกระแสได้ 1.68A ซึ่งจะได้จำนวนวัตต์เท่ากับ 10.08W

4.5.4 Solenoid 2ตัว ทำการทดลองป้อนแรงดัน 12V วัดกระแสได้ 0.7A ซึ่งจะได้

จำนวนวัตต์เท่ากับ 16.8W

รวมวัตต์ที่สูญเสียไปทั้งหมด = 49.592W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวมในระบบ

อุปกรณ์ โหลดภายในระบบ	กำลังที่สูญเสีย (W)
พัฒนาระบายอากาศ PEMFC	19.584
พัฒนาระบายอากาศชุด Buck converter	3.128
Solenoid จำนวน 2 ตัว	16.8
มอเตอร์ Flow ออกซิเจน	10.08
รวมการสูญเสียทั้งหมด	49.592

สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบ ในขณะที่ยังไม่มีการจ่าย Buck Converter จะเห็นได้ว่ามอเตอร์ Flow ออกซิเจนจะมีเสียงค่อนข้างดังเพราะจ่ายแรงดันที่ 13.6V จาก Converter โดยตรง และอัตราของออกซิเจนจะมีจำนวนมากจนเกินไปทำให้แรงดันเอาต์พุตจาก PEMFC มีค่าน้อย หลังจากที่มีวงจร Buck Converter ทำการลดทอนระดับแรงดันลงมาให้ 6V จะทำให้มอเตอร์ Flow ออกซิเจนมีเสียงเบาและอัตราของออกซิเจนที่เข้าไปผสมกับไฮโดรเจนเพียงพอและเหมาะสม ทำให้เอาต์พุตจาก PEMFC มากขึ้น หลังจากนั้นทำการทดสอบโหลดอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะหาค่ากำลังไฟฟ้าของ PEMFC ที่สามารถจ่ายโหลดได้ และนำไปจ่ายมอเตอร์ขนาด 400W ได้จริง

จากภาพที่ 4.13 จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่ 2391 ml/min ทำได้กำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายได้สูงสุด 350 w และทำการเพิ่มไฮโดรเจนเป็น 3757 ml/min จะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายได้สูงสุด 400 w แสดงว่าถ้าปริมาณการไหลของไฮโดรเจนมากเพียงพอกับออกซิเจนที่เข้าไปผสมจึงทำให้เอาต์พุต PEMFC สูงขึ้น

เมื่อทำการจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้แรงดันลดลงและกระแสมีค่ามากขึ้นจากสมการ $P=VI$ ถ้าแรงดันลดกระแสจะมีค่ามากขึ้น สังเกตได้ว่าขณะจ่ายโหลดอิเล็กทรอนิกส์ที่ 400W และจ่าย Flow meter 30mm จะสามารถวัดแรงดันได้ 24V และกระแส 16.5A และแรงดันไม่ตกและสามารถจ่ายให้กับมอเตอร์รถไฟฟ้าได้ ในกรณีที่ต้อง Supper Capacitor มาต่อในระบบจะทำให้กระแสขณะสตาร์ทไม่สูงจนเกินไปและ Supper Capacitor สามารถไปจ่ายแรงดันช่วย PEMFC ขณะที่โหลดดึงกระแสมากซึ่งจะทำให้แรงดันตกจึงมี Supper Capacitor มาช่วยเพื่อทำให้รถวิ่งได้อย่างต่อเนื่อง

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

การดำเนินงานพัฒนารถไฟฟ้าจากพลังงานเซลล์เชื้อเพลิง ได้มีการดำเนินงานตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ โดยส่วนที่ดำเนินงานไปแล้วคือ

1. ส่วนการออกแบบโครงสร้างของรถพลังงานไฟฟ้า ซึ่งได้ทำการออกแบบตั้งแต่การติดตั้งรวมถึงการซ่อมเซลล์เชื้อเพลิง

2. การติดตั้งเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อเป็นพลังงานการขับเคลื่อนให้กับรถไฟฟ้า มีการออกแบบและติดตั้งชุด Control start up โดยใช้การควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นตัวควบคุมการทำงานให้ความเป็นอัตโนมัติถึงจ่ายต่อผู้ขับขี่ และ วงจรลดระดับแรงดัน เพื่อควบคุมแรงดันมอเตอร์ดูดออกซิเจนให้มีแรงดันคงที่โดยใช้วงจร บีกคอนเวอร์เตอร์ เหตุที่ต้องมีการลดความเร็วของมอเตอร์ดูดอากาศก็เพื่อรักษาความชื้นในเซลล์เชื้อเพลิงและเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงให้จ่ายโหลดได้พิกัดสูงขึ้น

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจากการติดตั้ง Voltage Control โดยอาศัยการทำงานของ Switch ของมอสเฟตกำลังในการควบคุมระดับแรงดันจะพบว่าเมื่อลดระดับแรงดันของมอเตอร์ดูดอากาศทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงจะเห็นว่า เซลล์เชื้อเพลิงจะจ่ายโหลดเพิ่มสูงขึ้น

การควบคุมการทำงานของระบบรถไฟฟ้าในการ Start เพื่อขับเคลื่อนได้มีการออกแบบให้มีทำงานที่เป็นอัตโนมัติโดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นตัวควบคุมการทำงานโดยกำหนดให้ปริมาณ ไฮโดรเจนที่เป็นเชื้อเพลิงของเซลล์สัมพันธ์กับปริมาณกับไฮโดรเจนที่ปล่อยออกเพื่อเป็นการรักษาเสถียรภาพของเซลล์เชื้อเพลิงให้คงรักษาระดับแรงดันให้คงที่ตลอดเวลาและในการออกแบบรถไฟฟ้ายังได้มีการเพิ่ม Supper Capacitor เพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อเป็นตัวช่วยเพิ่มความสามารถในการจ่ายโหลดเมื่อแรงดันที่ เซลล์เชื้อเพลิงลดลงก็จะมี Supper Capacitor ช่วยรักษาระดับแรงดันให้มีความเสถียรและยังสามารถทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายของเซลล์เชื้อเพลิงอีกด้วยเพราะ เซลล์เชื้อเพลิงมีความ sensitive สูงจึงต้องมีการป้องกันความเสียหาย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาการทำงานของวงจร Voltage Control ให้มีความเข้าใจเสียก่อนอย่าปรับแรงดันอ้างอิงตามความชอบใจจะทำให้เกิดความเสียหายกับวงจรได้อย่างรวดเร็ว ในการนำเอาเซลล์เชื้อเพลิงมาติดตั้งใช้งานต้องมีความระมัดระวังสูงเนื่องจากเชื้อเพลิงที่นำมาใช้นั้นค่อนข้างราคาสูงจึงต้องมีความระมัดระวังในการใช้งานส่วนการเติมสารไฮโดรเจนควรมีการระมัดระวังและไม่ควรประมาทเพราะเป็นสารที่จุดติดไฟได้ง่ายไม่มีสีไม่มีกลิ่นทำให้ไม่สามารถรู้ได้ว่ารั่วไหลเมื่อใดจึงต้องมีการตรวจรอยรั่วอยู่เสมอคือการเอาฟองสบู่มาตรวจตามจุดต่อต่างๆ

ในการประกอบเซลล์เชื้อเพลิงโดยนำแผ่นเมมเบรนมาประกอบกับแผ่นไบโพล่าเซลล์ ต้องมีการ ประกอบอย่างระมัดระวังไม่ให้แผ่นเมมเบรนนี้ออกมาจากแผ่นไบโพล่าเซลล์มากเกินไปซึ่งจะทำให้แผ่นเมมเบรน เกิดการเสียหาย

5.3 สิ่งที่ต้องดำเนินการต่อ

1. ทำการออกแบบวงจรควบคุมปริมาณของออกซิเจนและไฮโดรเจนโดยมีอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด
2. พัฒนา เซลล์เชื้อเพลิงให้มีการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในทางอุตสาหกรรม เช่น นำไปใช้ในอุปกรณ์ใน UPS เป็นต้น
3. ออกแบบการแสดงผลโดยการตรวจจับแรงดันแต่ละเซลล์ซึ่งสามารถติดไปกับรถได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ชาราธิ์เศรษฐ์, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics**, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี เจ พรินติ้ง. 2548
- [2] นคร ภัคดีชาติ และ ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล, **คู่มือการทดลอง dsPIC Microcontroller เบื้องต้น**, บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด.พิมพ์ครั้งที่ 1
- [3] วรวิทย์ โพธิ์พรม, วานิช นุชบาง, นรุตว์ ศรีสวัสดิพงษ์, อาคม ชัยศิริจันทร์, " รถไฟฟ้าพลังงานผสมผสานอัจฉริยะ" **ปริญญาพันธวิศกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549
- [4] Mohan , Undeland and Robins, **Power Electronic** .New York .John Wiley and Son. Inc .2nd Edition.1995
- [4] N. Mohan, T .M. Underland, and W.P. Robins, **Power Electronic converter Application and Design**, John Wiley & Sons, Inc., 1989
- [5] Wolf Vielstich, Around Lamm and Hubert A. Gasteiger , **Hand book of Fuel**, John Wiley & Sons, Inc.2nd Edition.
- [6] Wolf Vielstich, Around Lamm and Hubert A. Gasteiger , **Hand book of Fuel**, John Wiley & Sons, Inc.4th Edition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้






ภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

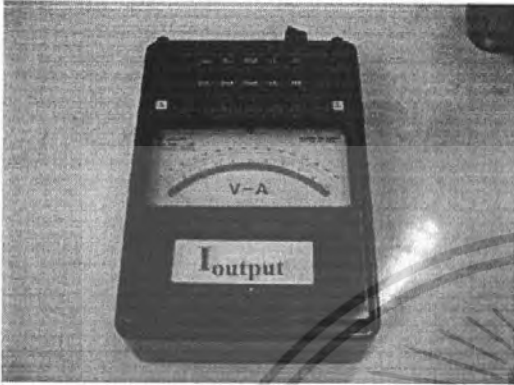
รูปถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการปฏิบัติและทดสอบ

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>- Oscilloscope Digital Storage Scope DL-1520 YOGOGAWA</p>
	<p>- Power Supply HEWLETTE 3631A 0-6V,5A/0- 25V,1A Output Dc Power Supply</p>
	<p>- Electronic Load PLZ603WH 5-500V/0-30A,DC,600W</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปถ่าย

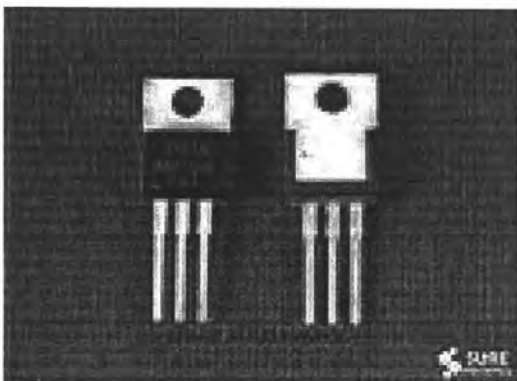
รายละเอียด



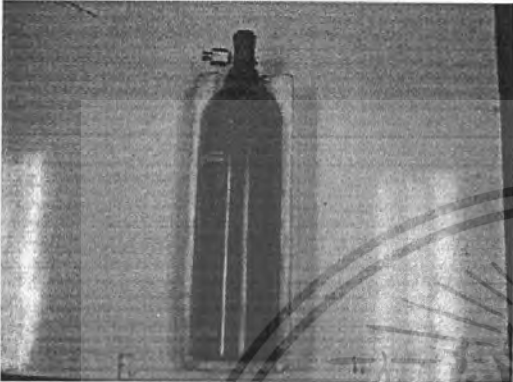


-Volt Meter/Amp Meter
3-1000V,1mA ,
1mA-30A,24-100mV
YOKOGAWA



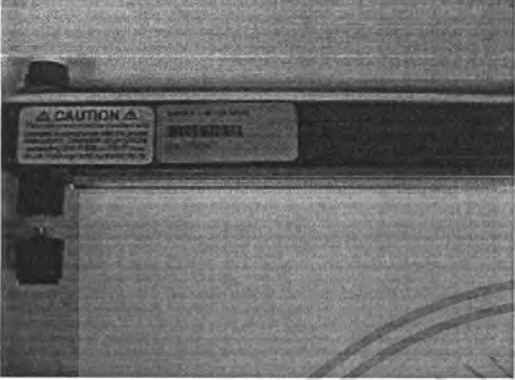
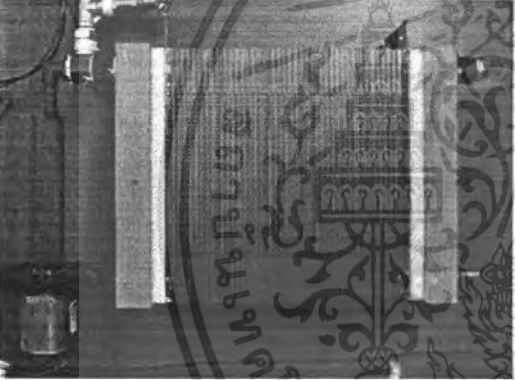
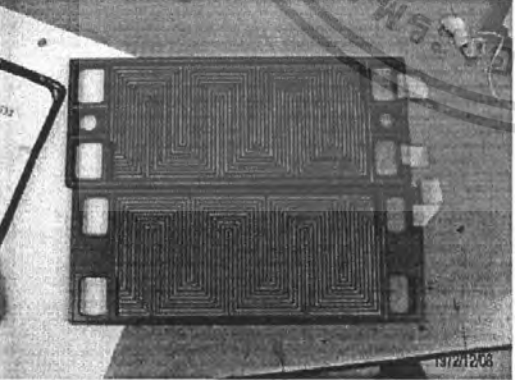
-ดิจิตอลมิเตอร์
HEWLETT PACKARD MULTIMETER 973A



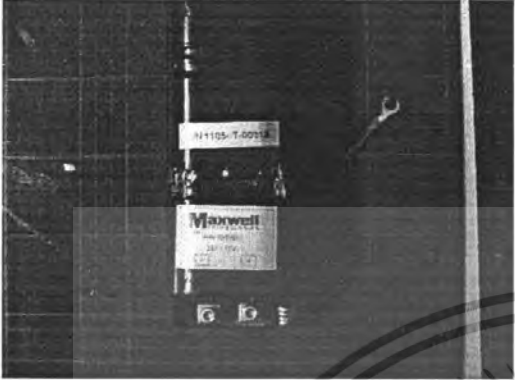

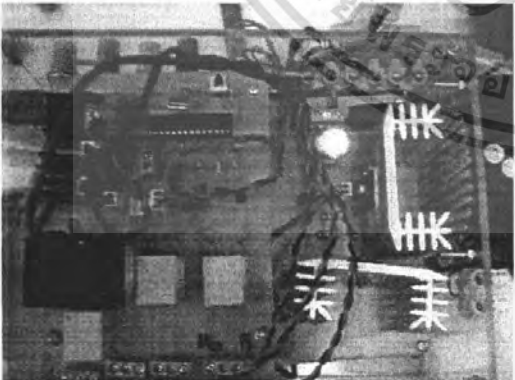
-MOSFFES
Power Mosffes เบอร์ IRFP 4710

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>-ถังใส่ไฮโดรเจน ปริมาณ 700 ลิตร</p>
	<p>-DIDOE (ไดโอด) Uter fast diode เบอร์ MUR 3060 T</p>
	<p>-THERMOMETER FLUKE 65 INFRARED</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านก⁷⁵้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปภาพ	รายละเอียด
	<p>Flow Meter เกจวัดแรงดันไฮโดรเจน</p>
	<p>เซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์มี-40 stack 1 stack มีค่าประมาณ 0.6-0.9 %V</p>
	<p>แผ่นไบโพลาร์เพลง ทำหน้าที่กระจาย Hydrogen</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกา⁷⁶้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>Super Capacitor P/N 10395858F/15V</p>
	<p>แผ่นเมมเบรนมีแรงดันตกคร่อม 0.6-0.9V</p>
	<p>ชุด Control</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>รถไฟฟ้าพลังงานเซลล์เชื้อเพลิง</p>





ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SWITCHMODE™ Pulse Width Modulation Control Circuit

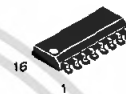
The TL494 is a fixed frequency, pulse width modulation control circuit designed primarily for SWITCHMODE power supply control.

- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On-Chip Oscillator with Master or Slave Operation
- On-Chip Error Amplifiers
- On-Chip 5.0 V Reference
- Adjustable Deadtime Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 500 mA Source or Sink
- Output Control for Push-Pull or Single-Ended Operation
- Undervoltage Lockout

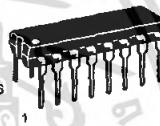
TL494

SWITCHMODE PULSE WIDTH MODULATION CONTROL CIRCUIT

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

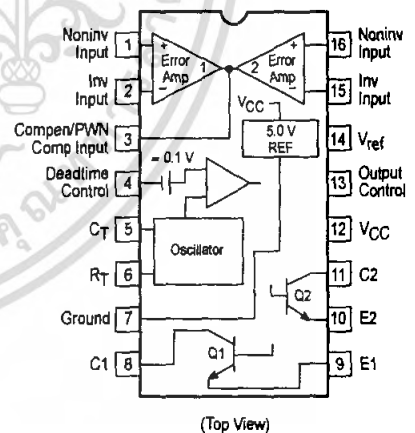


D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751B
(SO-16)



N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 648

PIN CONNECTIONS



MAXIMUM RATINGS (Full operating ambient temperature range applies, unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	TL494C	TL494I	Unit
Power Supply Voltage	V _{CC}	42		V
Collector Output Voltage	V _{C1} , V _{C2}	42		V
Collector Output Current (Each transistor) (Note 1)	I _{C1} , I _{C2}	500		mA
Amplifier Input Voltage Range	V _{IR}	-0.3 to +42		V
Power Dissipation @ T _A ≤ 45°C	P _D	1000		mW
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	R _{θJA}	80		°C/W
Operating Junction Temperature	T _J	125		°C
Storage Temperature Range	T _{stg}	-55 to +125		°C
Operating Ambient Temperature Range TL494C TL494I	T _A	0 to +70 -25 to +85		°C
Derating Ambient Temperature	T _A	45		°C

NOTE: 1. Maximum thermal limits must be observed.

ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
TL494CD	T _A = 0° to +70°C	SO-16
TL494CN		Plastic
TL494IN	T _A = -25° to +85°C	Plastic

TL494

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	7.0	15	40	V
Collector Output Voltage	V_{C1}, V_{C2}	–	30	40	V
Collector Output Current (Each transistor)	I_{C1}, I_{C2}	–	–	200	mA
Amplified Input Voltage	V_{in}	–0.3	–	$V_{CC} - 2.0$	V
Current Into Feedback Terminal	I_{fb}	–	–	0.3	mA
Reference Output Current	I_{ref}	–	–	10	mA
Timing Resistor	R_T	1.8	30	500	k Ω
Timing Capacitor	C_T	0.0047	0.001	10	μ F
Oscillator Frequency	f_{osc}	1.0	40	200	kHz

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15$ V, $C_T = 0.01$ μ F, $R_T = 12$ k Ω , unless otherwise noted.)

For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
-----------------	--------	-----	-----	-----	------

REFERENCE SECTION

Reference Voltage ($I_O = 1.0$ mA)	V_{ref}	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation ($V_{CC} = 7.0$ V to 40 V)	Reg_{line}	–	2.0	25	mV
Load Regulation ($I_O = 1.0$ mA to 10 mA)	Reg_{load}	–	3.0	15	mV
Short Circuit Output Current ($V_{ref} = 0$ V)	I_{SC}	15	35	75	mA

OUTPUT SECTION

Collector Off-State Current ($V_{CC} = 40$ V, $V_{CE} = 40$ V)	$I_{C(off)}$	–	2.0	100	μ A
Emitter Off-State Current ($V_{CC} = 40$ V, $V_C = 40$ V, $V_E = 0$ V)	$I_{E(off)}$	–	–	–100	μ A
Collector-Emitter Saturation Voltage (Note 2) Common-Emitter ($V_E = 0$ V, $I_C = 200$ mA) Emitter-Follower ($V_C = 15$ V, $I_E = -200$ mA)	$V_{sat(C)}$ $V_{sat(E)}$	– –	1.1 1.5	1.3 2.5	V
Output Control Pin Current Low State ($V_{OC} \leq 0.4$ V) High State ($V_{OC} = V_{ref}$)	I_{OCL} I_{OCH}	– –	10 0.2	– 3.5	μ A mA
Output Voltage Rise Time Common-Emitter (See Figure 12) Emitter-Follower (See Figure 13)	t_r	– –	100 100	200 200	ns
Output Voltage Fall Time Common-Emitter (See Figure 12) Emitter-Follower (See Figure 13)	t_f	– –	25 40	100 100	ns

NOTE: 2. Low duty cycle pulse techniques are used during test to maintain junction temperature as close to ambient temperature as possible.

TL494

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$, unless otherwise noted.)

For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

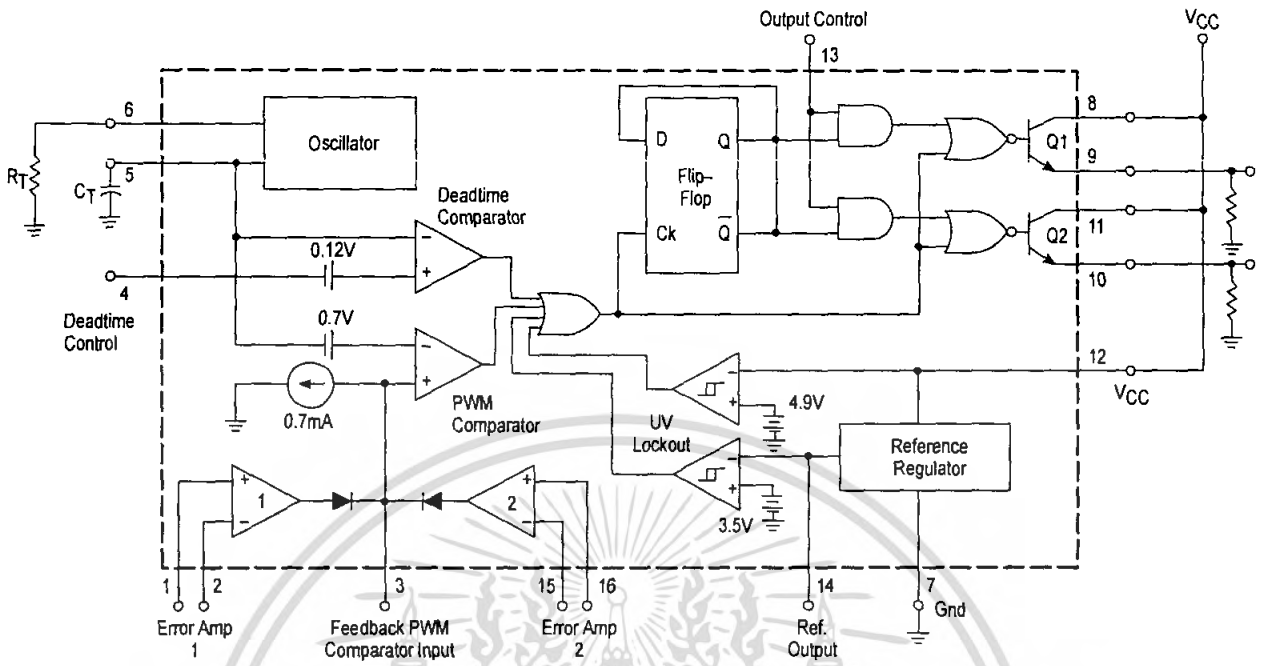
Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
ERROR AMPLIFIER SECTION					
Input Offset Voltage (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	V_{IO}	–	2.0	10	mV
Input Offset Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IO}	–	5.0	250	nA
Input Bias Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IB}	–	–0.1	–1.0	μA
Input Common Mode Voltage Range ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	V_{ICR}	–0.3 to $V_{CC}-2.0$			V
Open Loop Voltage Gain ($\Delta V_O = 3.0\text{ V}$, $V_O = 0.5\text{ V}$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	A_{VOL}	70	95	–	dB
Unity-Gain Crossover Frequency ($V_O = 0.5\text{ V}$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	f_{C-}	–	350	–	kHz
Phase Margin at Unity-Gain ($V_O = 0.5\text{ V}$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	ϕ_m	–	65	–	deg.
Common Mode Rejection Ratio ($V_{CC} = 40\text{ V}$)	CMRR	65	90	–	dB
Power Supply Rejection Ratio ($\Delta V_{CC} = 33\text{ V}$, $V_O = 2.5\text{ V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	PSRR	–	100	–	dB
Output Sink Current (V_O (Pin 3) = 0.7 V)	I_{O-}	0.3	0.7	–	mA
Output Source Current (V_O (Pin 3) = 3.5 V)	I_{O+}	2.0	–4.0	–	mA
PWM COMPARATOR SECTION (Test Circuit Figure 11)					
Input Threshold Voltage (Zero Duty Cycle)	V_{TH}	–	2.5	4.5	V
Input Sink Current ($V_{Pin 3} = 0.7\text{ V}$)	I_{L-}	0.3	0.7	–	mA
DEADTIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 11)					
Input Bias Current (Pin 4) ($V_{Pin 4} = 0\text{ V}$ to 5.25 V)	I_{IB} (DT)	–	–2.0	–10	μA
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push-Pull Mode ($V_{Pin 4} = 0\text{ V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$) ($V_{Pin 4} = 0\text{ V}$, $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	DC _{max}	45 –	48 45	50 50	%
Input Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	V_{th}	– 0	2.8 –	3.3 –	V
OSCILLATOR SECTION					
Frequency ($C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	f_{osc}	–	40	–	kHz
Standard Deviation of Frequency* ($C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	$\sigma_{f_{osc}}$	–	3.0	–	%
Frequency Change with Voltage ($V_{CC} = 7.0\text{ V}$ to 40 V , $T_A = 25^\circ\text{C}$)	Δf_{osc} (ΔV)	–	0.1	–	%
Frequency Change with Temperature ($\Delta T_A = T_{low}$ to T_{high}) ($C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$)	Δf_{osc} (ΔT)	–	–	12	%
UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION					
Turn-On Threshold (V_{CC} increasing, $I_{ref} = 1.0\text{ mA}$)	V_{th}	5.5	6.43	7.0	V
TOTAL DEVICE					
Standby Supply Current (Pin 6 at V_{ref} . All other inputs and outputs open) ($V_{CC} = 15\text{ V}$) ($V_{CC} = 40\text{ V}$)	I_{CC}	– –	5.5 7.0	10 15	mA
Average Supply Current ($C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$, $V_{Pin 4} = 2.0\text{ V}$) ($V_{CC} = 15\text{ V}$) (See Figure 12)		–	7.0	–	mA

* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula, σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2}{N-1}}$$

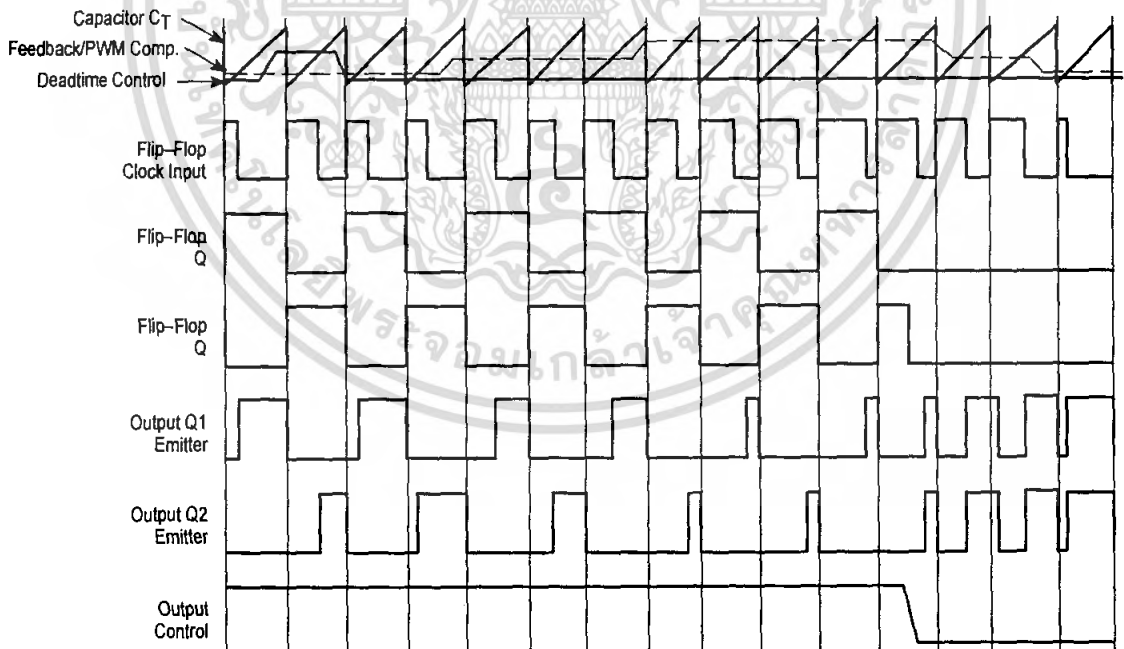
TL494

Figure 1. Representative Block Diagram



This device contains 46 active transistors.

Figure 2. Timing Diagram



TL494

APPLICATIONS INFORMATION

Description

The TL494 is a fixed-frequency pulse width modulation control circuit, incorporating the primary building blocks required for the control of a switching power supply. (See Figure 1.) An internal-linear sawtooth oscillator is frequency-programmable by two external components, R_T and C_T . The approximate oscillator frequency is determined by:

$$f_{osc} \approx \frac{1.1}{R_T \cdot C_T}$$

For more information refer to Figure 3.

Output pulse width modulation is accomplished by comparison of the positive sawtooth waveform across capacitor C_T to either of two control signals. The NOR gates, which drive output transistors Q1 and Q2, are enabled only when the flip-flop clock-input line is in its low state. This happens only during that portion of time when the sawtooth voltage is greater than the control signals. Therefore, an increase in control-signal amplitude causes a corresponding linear decrease of output pulse width. (Refer to the Timing Diagram shown in Figure 2.)

The control signals are external inputs that can be fed into the deadtime control, the error amplifier inputs, or the feedback input. The deadtime control comparator has an effective 120 mV input offset which limits the minimum output deadtime to approximately the first 4% of the sawtooth-cycle time. This would result in a maximum duty cycle on a given output of 96% with the output control grounded, and 48% with it connected to the reference line. Additional deadtime may be imposed on the output by setting the deadtime-control input to a fixed voltage, ranging between 0 V to 3.3 V.

Functional Table

Input/Output Controls	Output Function	$\frac{f_{out}}{f_{osc}} =$
Grounded	Single-ended PWM @ Q1 and Q2	1.0
@ V_{ref}	Push-pull Operation	0.5

The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on-time, established by the deadtime control input, down to zero, as the voltage at the feedback pin varies from 0.5 V to 3.5 V. Both error amplifiers have a common mode input range from -0.3 V to $(V_{CC} - 2V)$, and

may be used to sense power-supply output voltage and current. The error-amplifier outputs are active high and are ORed together at the noninverting input of the pulse-width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on time, dominates control of the loop.

When capacitor C_T is discharged, a positive pulse is generated on the output of the deadtime comparator, which clocks the pulse-steering flip-flop and inhibits the output transistors, Q1 and Q2. With the output-control connected to the reference line, the pulse-steering flip-flop directs the modulated pulses to each of the two output transistors alternately for push-pull operation. The output frequency is equal to half that of the oscillator. Output drive can also be taken from Q1 or Q2, when single-ended operation with a maximum on-time of less than 50% is required. This is desirable when the output transformer has a ringback winding with a catch diode used for snubbing. When higher output-drive currents are required for single-ended operation, Q1 and Q2 may be connected in parallel, and the output-mode pin must be tied to ground to disable the flip-flop. The output frequency will now be equal to that of the oscillator.

The TL494 has an internal 5.0 V reference capable of sourcing up to 10 mA of load current for external bias circuits. The reference has an internal accuracy of $\pm 5.0\%$ with a typical thermal drift of less than 50 mV over an operating temperature range of 0° to 70°C.

Figure 3. Oscillator Frequency versus Timing Resistance

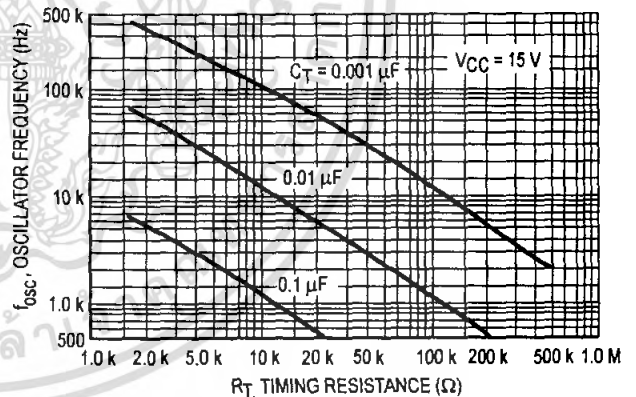


Figure 4. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

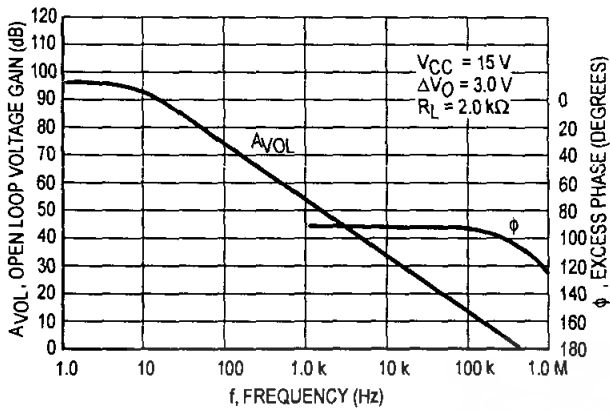


Figure 5. Percent Deadtime versus Oscillator Frequency

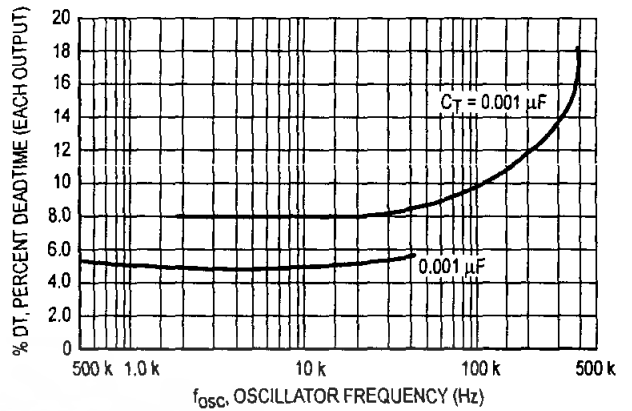


Figure 6. Percent Duty Cycle versus Deadtime Control Voltage

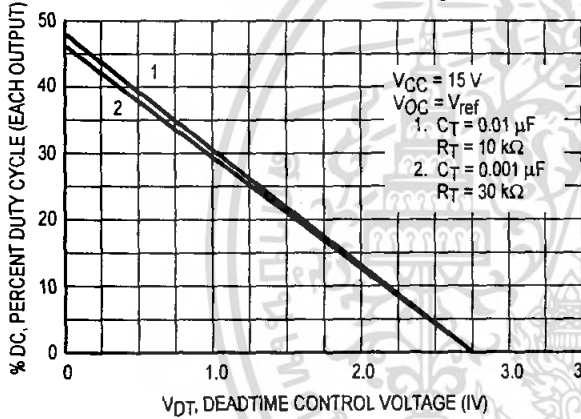


Figure 7. Emitter-Follower Configuration Output Saturation Voltage versus Emitter Current

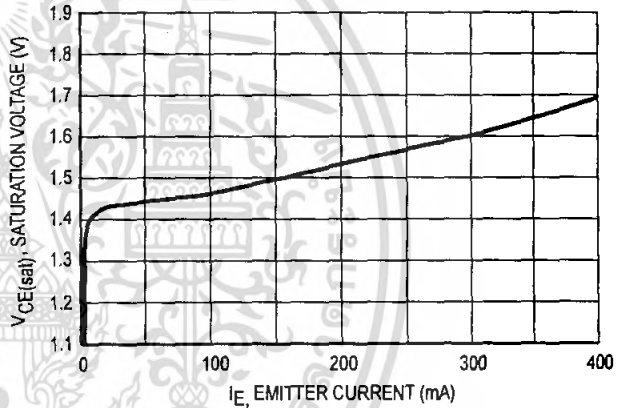


Figure 8. Common-Emitter Configuration Output Saturation Voltage versus Collector Current

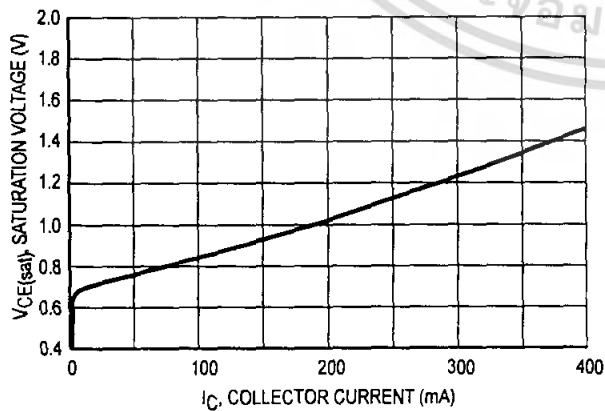


Figure 9. Standby Supply Current versus Supply Voltage

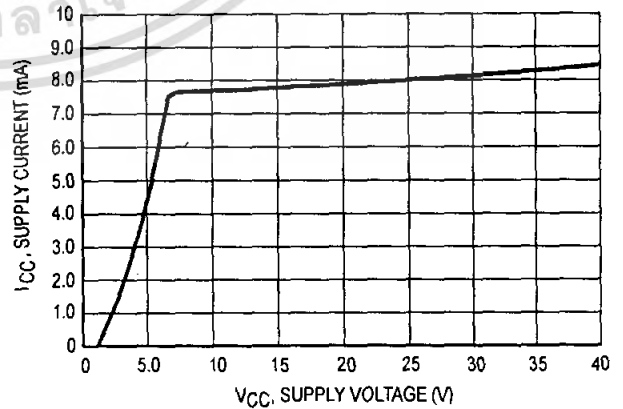


Figure 10. Error-Amplifier Characteristics

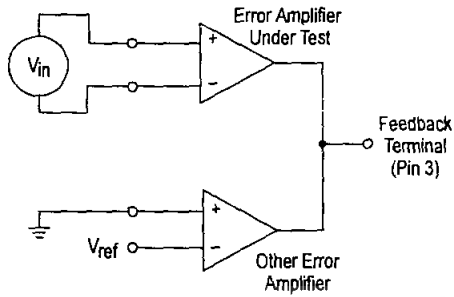


Figure 11. Deadtime and Feedback Control Circuit

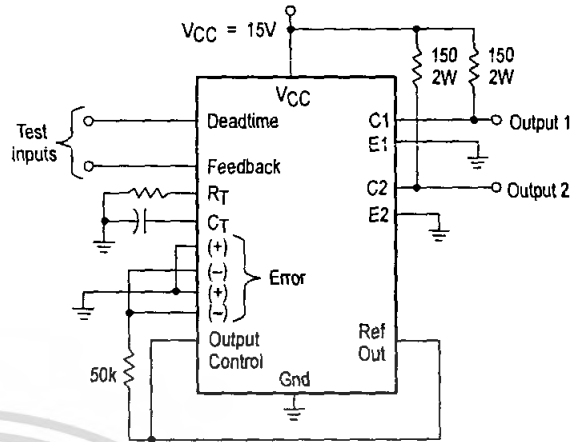


Figure 12. Common-Emitter Configuration Test Circuit and Waveform

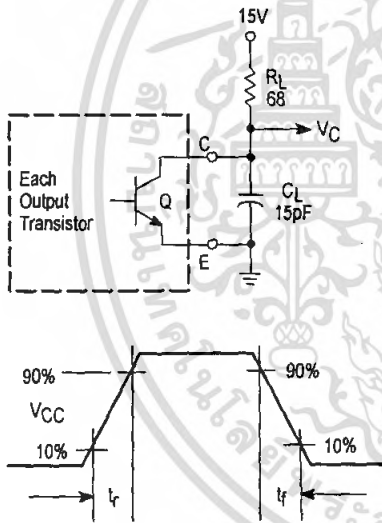


Figure 13. Emitter-Follower Configuration Test Circuit and Waveform

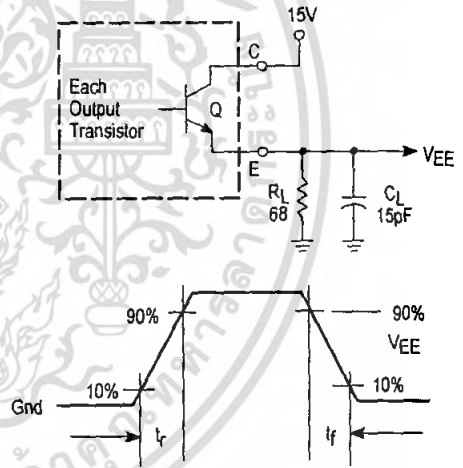


Figure 14. Error-Amplifier Sensing Techniques

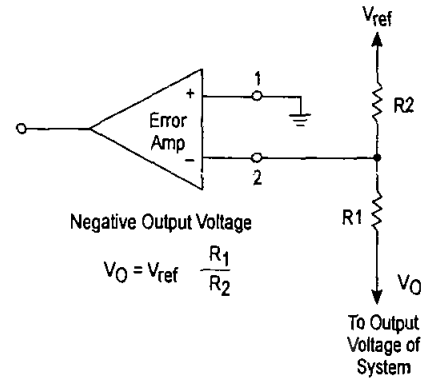
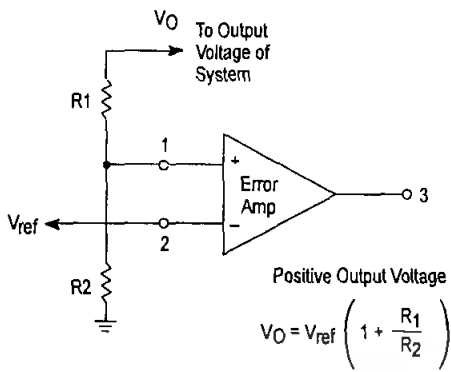


Figure 15. Deadtime Control Circuit

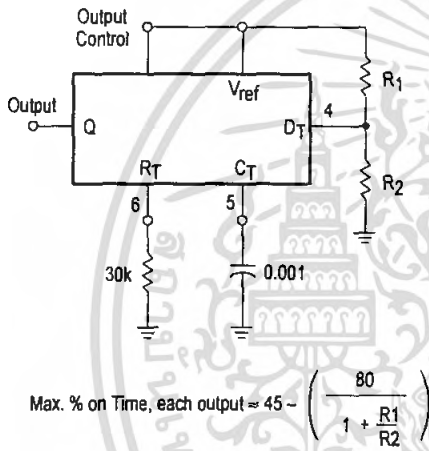


Figure 16. Soft-Start Circuit

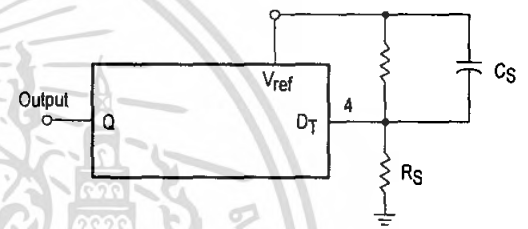
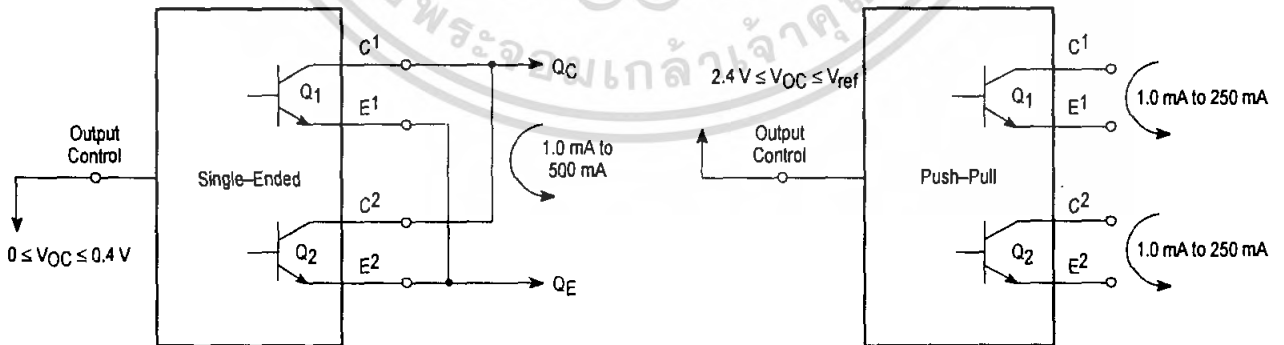


Figure 17. Output Connections for Single-Ended and Push-Pull Configurations



TL494

Figure 18. Slaving Two or More Control Circuits

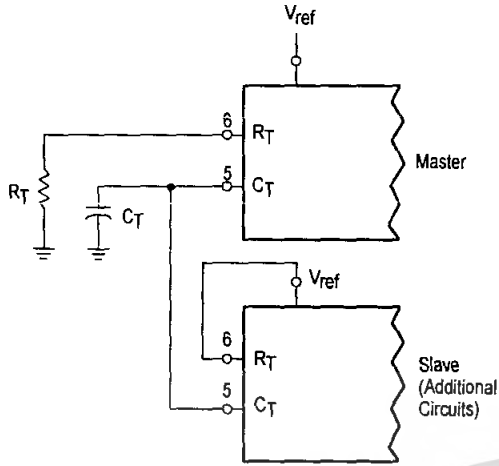


Figure 19. Operation with $V_{in} > 40\text{ V}$ Using External Zener

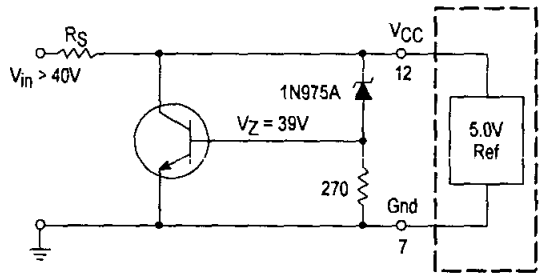
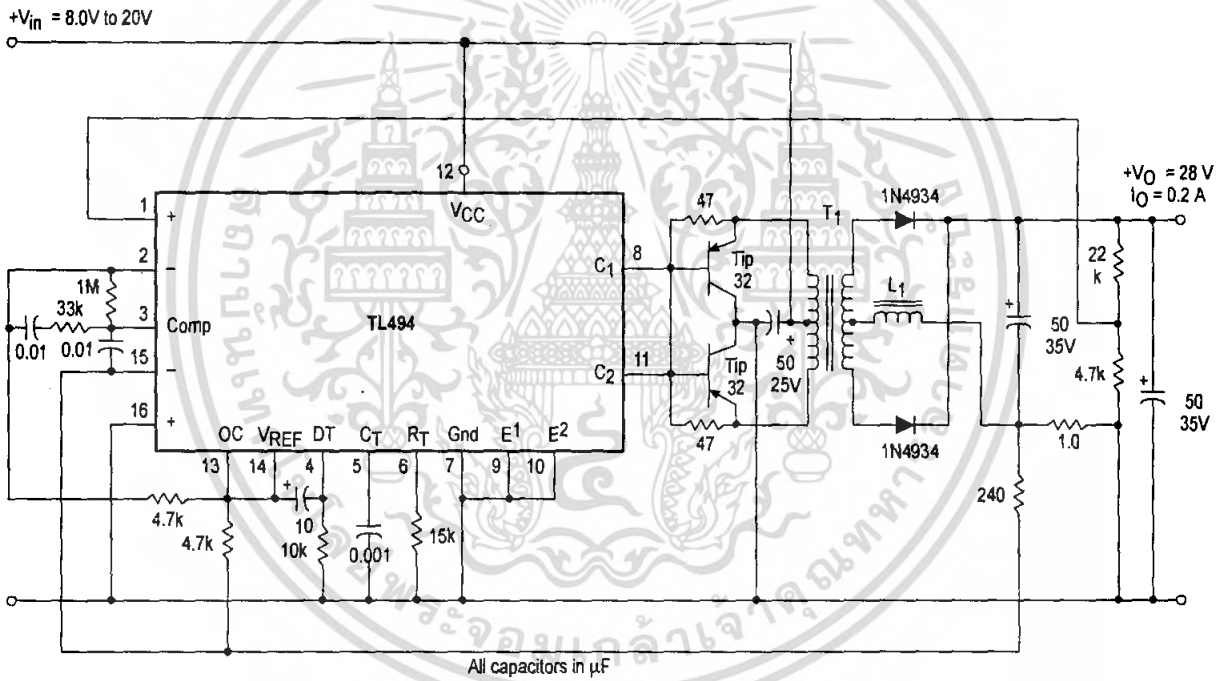


Figure 20. Pulse Width Modulated Push-Pull Converter

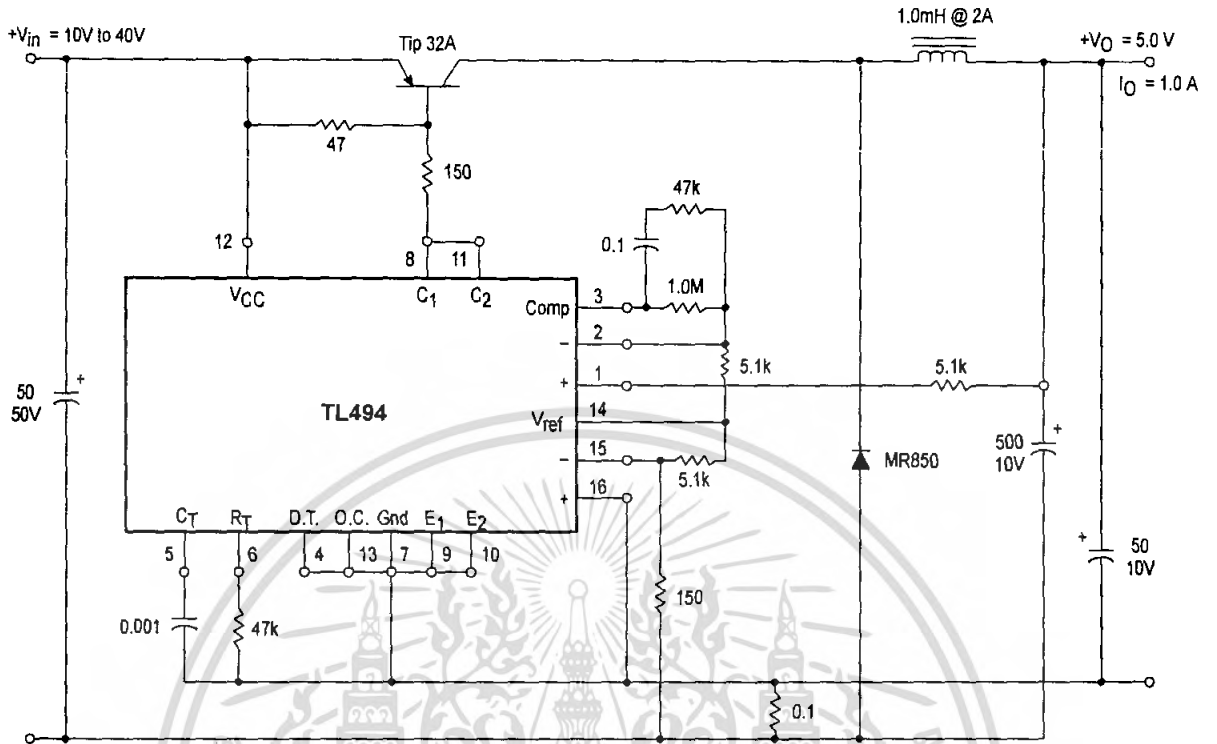


Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 10\text{ V to }40\text{ V}$	14 mV 0.28%
Load Regulation	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ mA to }1.0\text{ A}$	3.0 mV 0.06%
Output Ripple	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ A}$	65 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 28\text{ V}, R_L = 0.1\ \Omega$	1.6 A
Efficiency	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ A}$	71%

L1 – 3.5 mH @ 0.3 A
 T1 – Primary: 20T C.T. #28 AWG
 Secondary: 120T C.T. #36 AWG
 Core: Ferroxcube 1408P-L00-3CB

TL494

Figure 21. Pulse Width Modulated Step-Down Converter

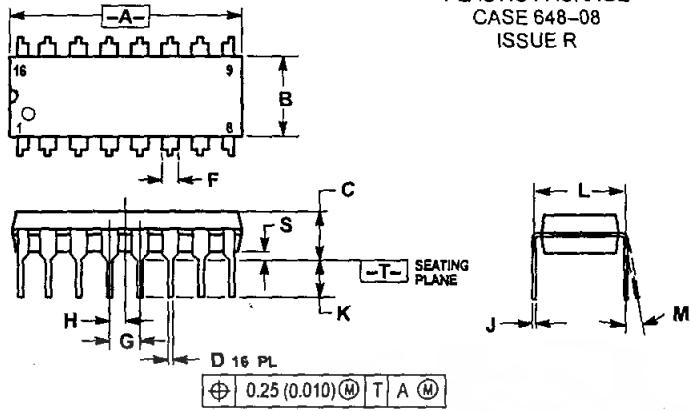


Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 8.0 \text{ V to } 40 \text{ V}$	3.0 mV 0.01%
Load Regulation	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 0.2 \text{ mA to } 200 \text{ mA}$	5.0 mV 0.02%
Output Ripple	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 200 \text{ mA}$	40 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, R_L = 0.1 \Omega$	250 mA
Efficiency	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 200 \text{ mA}$	72%

TL494

OUTLINE DIMENSIONS

N SUFFIX PLASTIC PACKAGE CASE 648-08 ISSUE R

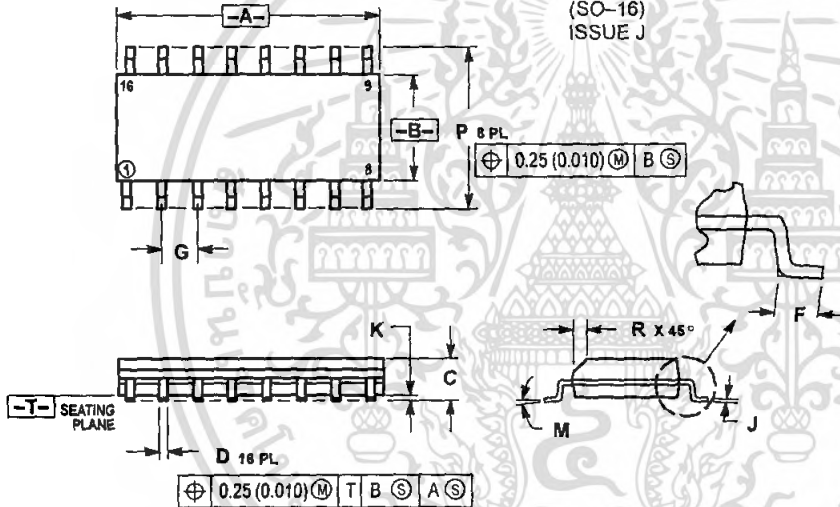


NOTES:

1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN FORMED PARALLEL.
4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.
5. ROUNDED CORNERS OPTIONAL.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.740	0.770	18.80	19.55
B	0.250	0.270	6.35	6.85
C	0.145	0.175	3.69	4.44
D	0.015	0.021	0.39	0.53
F	0.040	0.70	1.02	1.77
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.050 BSC		1.27 BSC	
J	0.008	0.015	0.21	0.38
K	0.110	0.130	2.80	3.30
L	0.295	0.305	7.50	7.74
M	0°	10°	0°	10°
S	0.020	0.040	0.51	1.01

D SUFFIX PLASTIC PACKAGE CASE 751B-05 (SO-16) ISSUE J



NOTES:

1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
3. DIMENSIONS A AND B DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 (0.006) PER SIDE.
5. DIMENSION D DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 (0.005) TOTAL IN EXCESS OF THE D DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	9.80	10.00	0.386	0.393
B	3.80	4.00	0.150	0.157
C	1.35	1.75	0.054	0.068
D	0.35	0.49	0.014	0.019
F	0.40	1.25	0.016	0.049
G	1.27 BSC		0.050 BSC	
J	0.18	0.25	0.008	0.009
K	0.10	0.25	0.004	0.009
M	0°	7°	0°	7°
P	5.80	6.20	0.229	0.244
R	0.25	0.50	0.010	0.019

IR2110(S)/IR2113(S) & (PbF)

HIGH AND LOW SIDE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation Fully operational to +500V or +600V Tolerant to negative transient voltage dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible Separate logic supply range from 3.3V to 20V Logic and power ground $\pm 5V$ offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs
- Also available LEAD-FREE

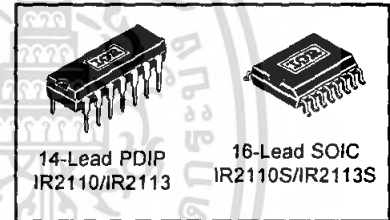
Product Summary

V_{OFFSET} (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
$I_{O+/-}$	2A / 2A
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{on/off}$ (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

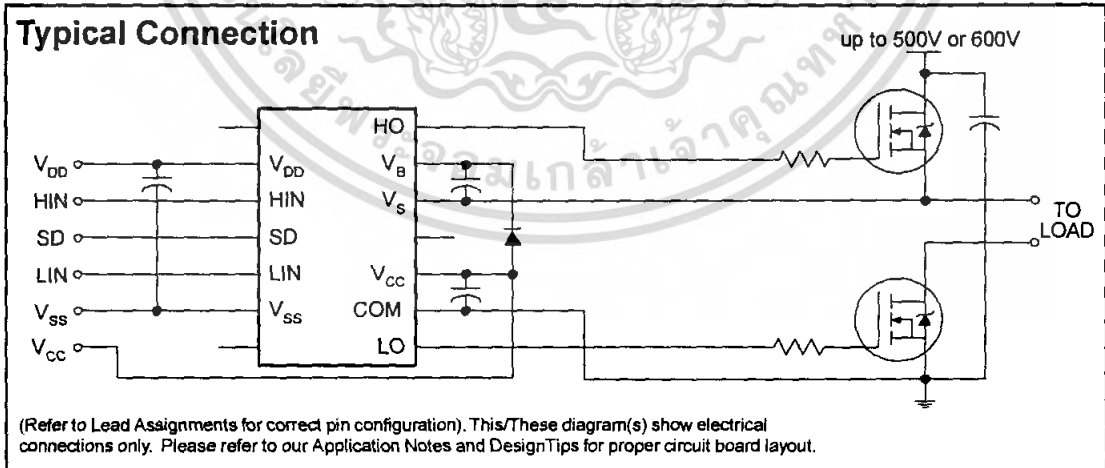
Description

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

Packages



Typical Connection



IR2110(S)/IR2113(S) & (PbF)

International
IOR Rectifier

Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions. Additional information is shown in Figures 28 through 35.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V _B	High side floating supply voltage (IR2110)	-0.3	525	V
	(IR2113)	-0.3	625	
V _S	High side floating supply offset voltage	V _B - 25	V _B + 0.3	
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S - 0.3	V _B + 0.3	
V _{CC}	Low side fixed supply voltage	-0.3	25	
V _{LO}	Low side output voltage	-0.3	V _{CC} + 0.3	
V _{DD}	Logic supply voltage	-0.3	V _{SS} + 25	
V _{SS}	Logic supply offset voltage	V _{CC} - 25	V _{CC} + 0.3	
V _{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V _{SS} - 0.3	V _{DD} + 0.3	
dV _g /dt	Allowable offset supply voltage transient (figure 2)	—	50	
P _D	Package power dissipation @ T _A ≤ +25°C (14 lead DIP)	—	1.6	W
	(16 lead SOIC)	—	1.25	
R _{THJA}	Thermal resistance, junction to ambient (14 lead DIP)	—	75	°C/W
	(16 lead SOIC)	—	100	
T _J	Junction temperature	—	150	°C
T _S	Storage temperature	-55	150	
T _L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300	

Recommended Operating Conditions

The input/output logic timing diagram is shown in figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V_S and V_{SS} offset ratings are tested with all supplies biased at 15V differential. Typical ratings at other bias conditions are shown in figures 36 and 37.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V _B	High side floating supply absolute voltage	V _S + 10	V _S + 20	V
V _S	High side floating supply offset voltage (IR2110)	Note 1	500	
	(IR2113)	Note 1	600	
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S	V _B	
V _{CC}	Low side fixed supply voltage	10	20	
V _{LO}	Low side output voltage	0	V _{CC}	
V _{DD}	Logic supply voltage	V _{SS} + 3	V _{SS} + 20	
V _{SS}	Logic supply offset voltage	-5 (Note 2)	5	
V _{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V _{SS}	V _{DD}	
T _A	Ambient temperature	-40	125	°C

Note 1: Logic operational for V_S of -4 to +500V. Logic state held for V_S of -4V to -V_B. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Note 2: When V_{DD} < 5V, the minimum V_{SS} offset is limited to -V_{DD}.

Dynamic Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS} , V_{DD}) = 15V, C_L = 1000 pF, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The dynamic electrical characteristics are measured using the test circuit shown in Figure 3.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
t_{on}	Turn-on propagation delay	7	—	120	150	ns	$V_S = 0V$
t_{off}	Turn-off propagation delay	8	—	94	125		$V_S = 500V/600V$
t_{sd}	Shutdown propagation delay	9	—	110	140		$V_S = 500V/600V$
t_r	Turn-on rise time	10	—	25	35		
t_f	Turn-off fall time	11	—	17	25		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	(IR2110) (IR2113)	— —	— —	10 20		

Static Electrical Characteristics

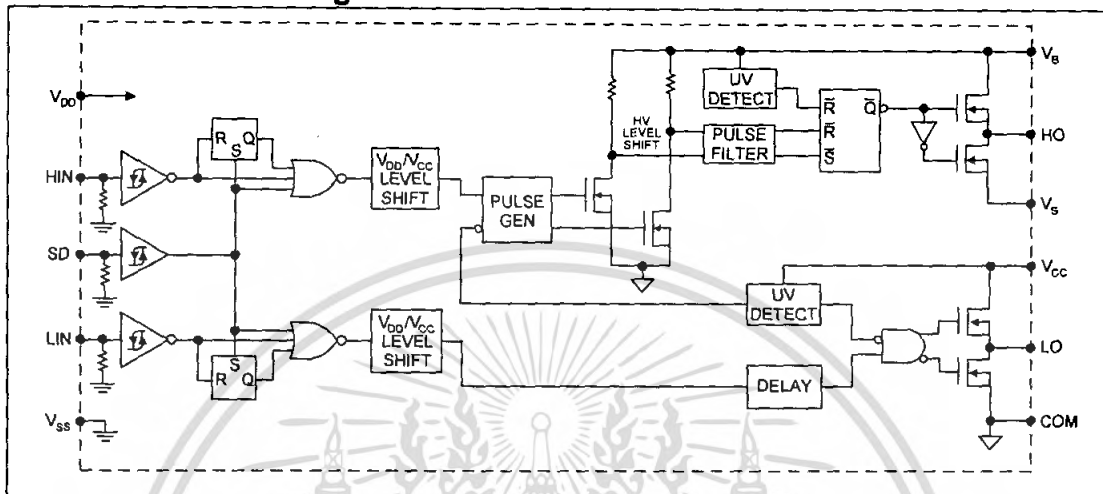
V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS} , V_{DD}) = 15V, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The V_{IN} , V_{TH} and I_{IN} parameters are referenced to V_{SS} and are applicable to all three logic input leads: HIN, LIN and SD. The V_O and I_O parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V_{IH}	Logic "1" input voltage	12	9.5	—	—	V	
V_{IL}	Logic "0" input voltage	13	—	—	6.0		
V_{OH}	High level output voltage, $V_{BIAS} - V_O$	14	—	—	1.2		$I_O = 0A$
V_{OL}	Low level output voltage, V_O	15	—	—	0.1		$I_O = 0A$
I_{LK}	Offset supply leakage current	16	—	—	50	μA	$V_B = V_S = 500V/600V$
I_{QBS}	Quiescent V_{BS} supply current	17	—	125	230		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{QCC}	Quiescent V_{CC} supply current	18	—	180	340		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{QDD}	Quiescent V_{DD} supply current	19	—	15	30		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{IN+}	Logic "1" input bias current	20	—	20	40		$V_{IN} = V_{DD}$
I_{IN-}	Logic "0" input bias current	21	—	—	1.0		$V_{IN} = 0V$
V_{BSUV+}	V_{BS} supply undervoltage positive going threshold	22	7.5	8.6	9.7	V	
V_{BSUV-}	V_{BS} supply undervoltage negative going threshold	23	7.0	8.2	9.4		
V_{CCUV+}	V_{CC} supply undervoltage positive going threshold	24	7.4	8.5	9.6		
V_{CCUV-}	V_{CC} supply undervoltage negative going threshold	25	7.0	8.2	9.4		
I_{O+}	Output high short circuit pulsed current	26	2.0	2.5	—	A	$V_O = 0V$, $V_{IN} = V_{DD}$ $PW \leq 10 \mu s$
I_{O-}	Output low short circuit pulsed current	27	2.0	2.5	—		$V_O = 15V$, $V_{IN} = 0V$ $PW \leq 10 \mu s$

IR2110(S)/IR2113(S) & (PbF)

International
IGOR Rectifier

Functional Block Diagram



Lead Definitions

Symbol	Description
VDD	Logic supply
HIN	Logic input for high side gate driver output (HO), in phase
SD	Logic input for shutdown
LIN	Logic input for low side gate driver output (LO), in phase
VSS	Logic ground
VB	High side floating supply
HO	High side gate drive output
VS	High side floating supply return
VCC	Low side supply
LO	Low side gate drive output
COM	Low side return

Lead Assignments

<p>14 Lead PDIP</p> <p>IR2110/IR2113</p>	<p>16 Lead SOIC (Wide Body)</p> <p>IR2110S/IR2113S</p>
---	---

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

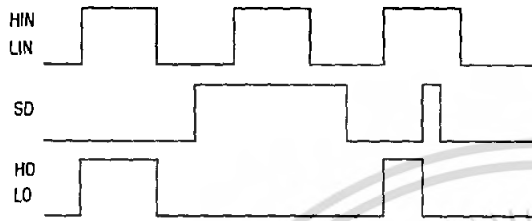


Figure 1. Input/Output Timing Diagram

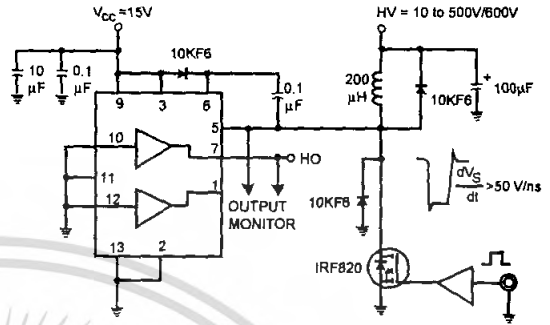


Figure 2. Floating Supply Voltage Transient Test Circuit

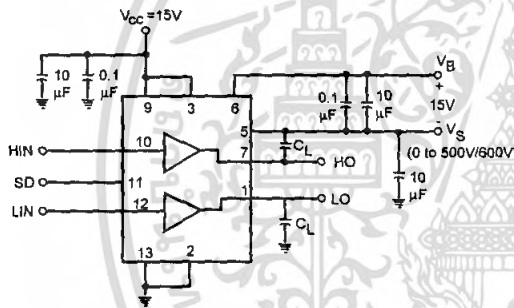


Figure 3. Switching Time Test Circuit

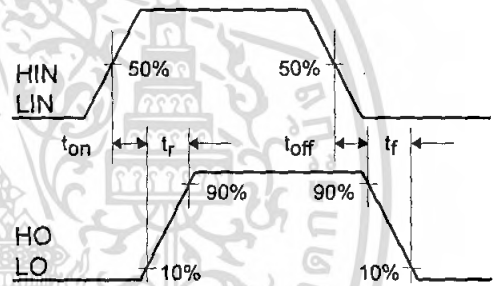


Figure 4. Switching Time Waveform Definition

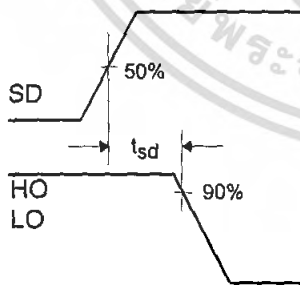


Figure 5. Shutdown Waveform Definitions

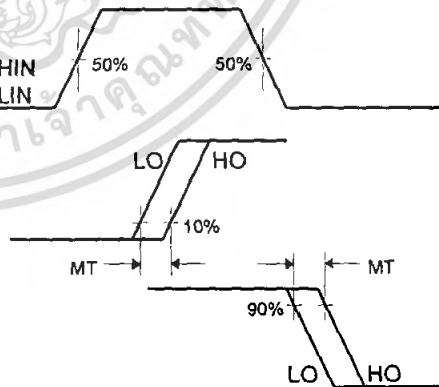


Figure 6. Delay Matching Waveform Definitions

IRFP4710

HEXFET® Power MOSFET

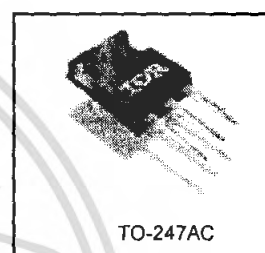
Applications

- High frequency DC-DC converters
- Motor Control
- Uninterruptible Power Supplies

V_{DSS}	$R_{DS(on)}$ max	I_D
100V	0.014 Ω	72A

Benefits

- Low Gate-to-Drain Charge to Reduce Switching Losses
- Fully Characterized Capacitance Including Effective C_{OSS} to Simplify Design, (See App. Note AN1001)
- Fully Characterized Avalanche Voltage and Current



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	72	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	51	
I_{DM}	Pulsed Drain Current $\text{\textcircled{D}}$	300	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	190	W
	Linear Derating Factor	1.2	W/ $^\circ\text{C}$
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt $\text{\textcircled{D}}$	8.2	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to +175	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds		
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf-in (1.1N-m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.81	$^\circ\text{C/W}$
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	40	

Notes $\text{\textcircled{D}}$ through $\text{\textcircled{H}}$ are on page 8

www.irf.com

1

01/08/02

Static @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.11	—	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	0.011	0.014	Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 45A$ Ⓞ
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	3.5	—	5.5	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	1.0	μA	$V_{DS} = 95V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 80V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$

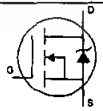
Dynamic @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
g_{fs}	Forward Transconductance	35	—	—	S	$V_{DS} = 50V, I_D = 45A$
Q_g	Total Gate Charge	—	110	170	nC	$I_D = 45A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	43	—		$V_{DS} = 50V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	40	—		$V_{GS} = 10V,$
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	35	—		$V_{DD} = 50V$
t_r	Rise Time	—	130	—	ns	$I_D = 45A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	41	—		$R_G = 4.5\Omega$
t_f	Fall Time	—	38	—		$V_{GS} = 10V$ Ⓞ
C_{iss}	Input Capacitance	—	6160	—		$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	440	—		$V_{GS} = 0V$
C_{riss}	Reverse Transfer Capacitance	—	250	—	pF	$f = 1.0MHz$
C_{oss}	Output Capacitance	—	1580	—		$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 1.0V, f = 1.0MHz$
C_{oss}	Output Capacitance	—	280	—		$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 80V, f = 1.0MHz$
$C_{oss \text{ eff.}}$	Effective Output Capacitance	—	430	—		$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 0V \text{ to } 80V$ Ⓞ

Avalanche Characteristics

	Parameter	Typ.	Max.	Units
E_{AS}	Single Pulse Avalanche EnergyⓄ	—	190	mJ
I_{AR}	Avalanche CurrentⓄ	—	45	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche EnergyⓄ	—	20	mJ

Diode Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	72	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) Ⓞ	—	—	300		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 45A, V_{GS} = 0V$ Ⓞ
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	74	110	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 45A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	180	260	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ Ⓞ
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$)				

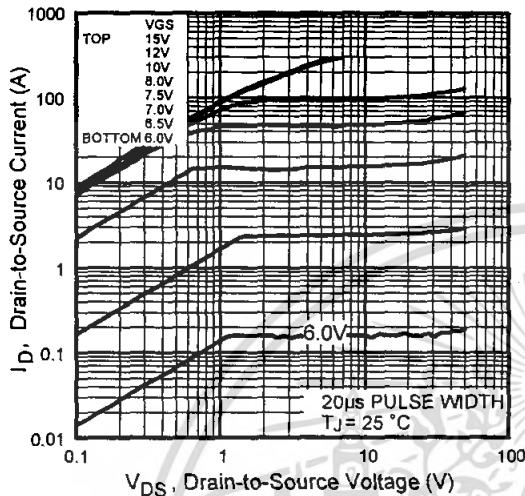


Fig 1. Typical Output Characteristics

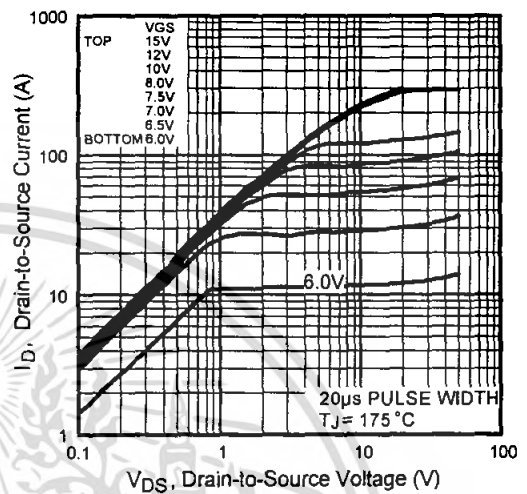


Fig 2. Typical Output Characteristics

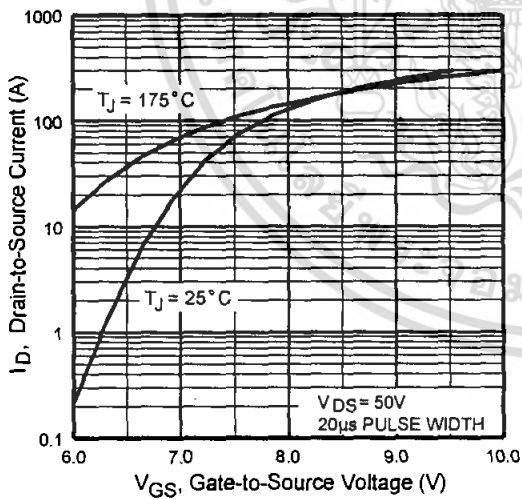


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

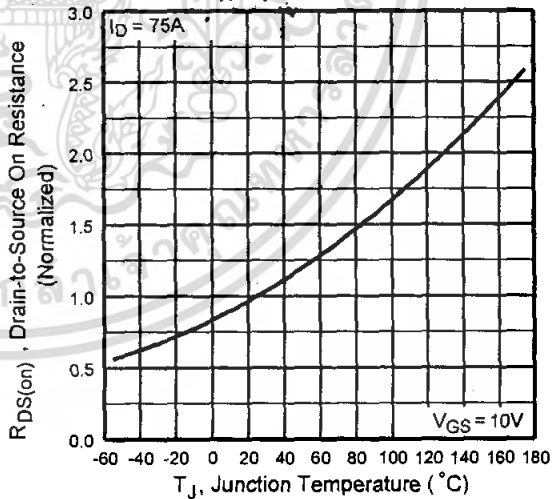


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

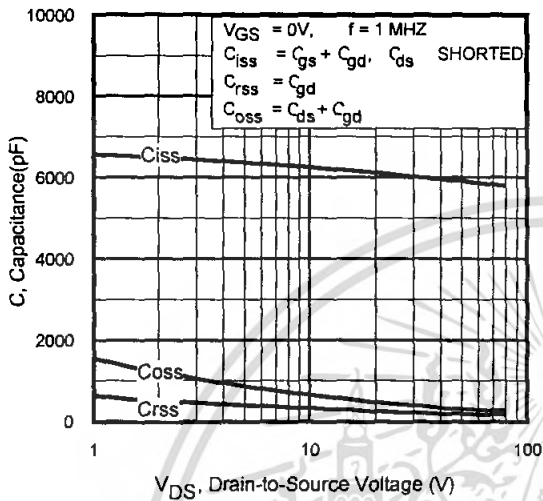


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

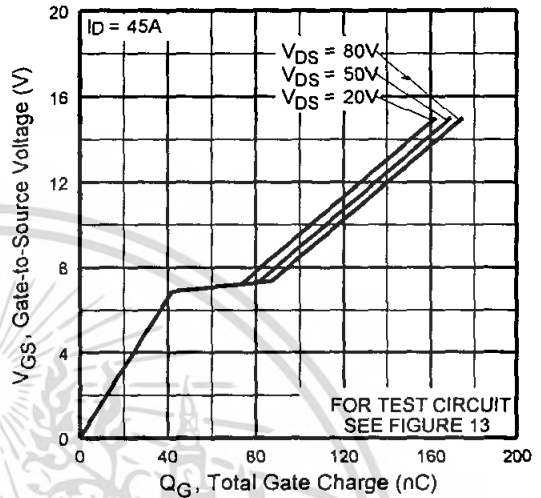


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

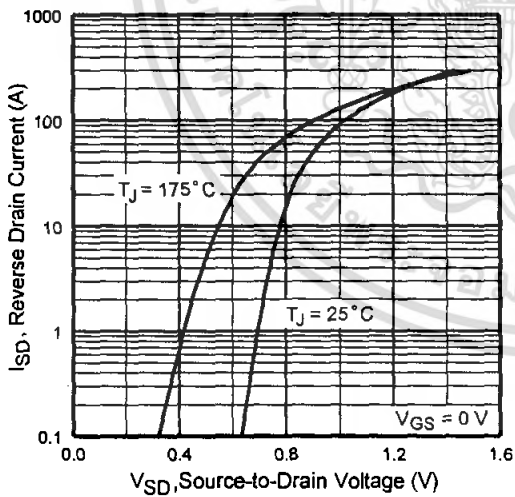


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

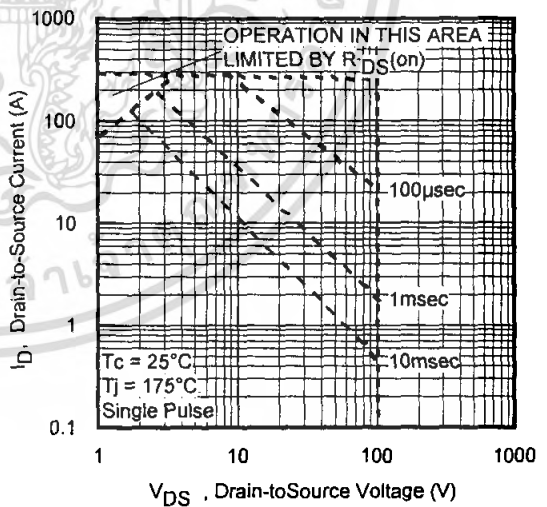


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

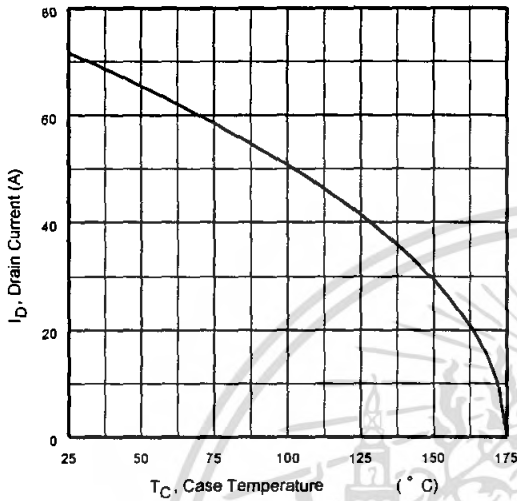


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

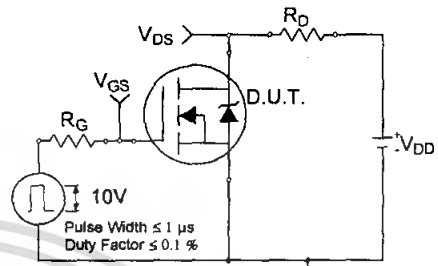


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

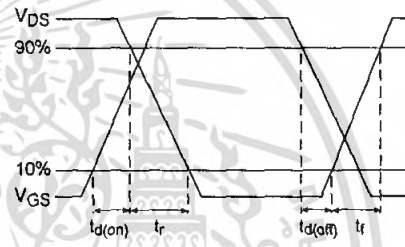


Fig 10b. Switching Time Waveforms

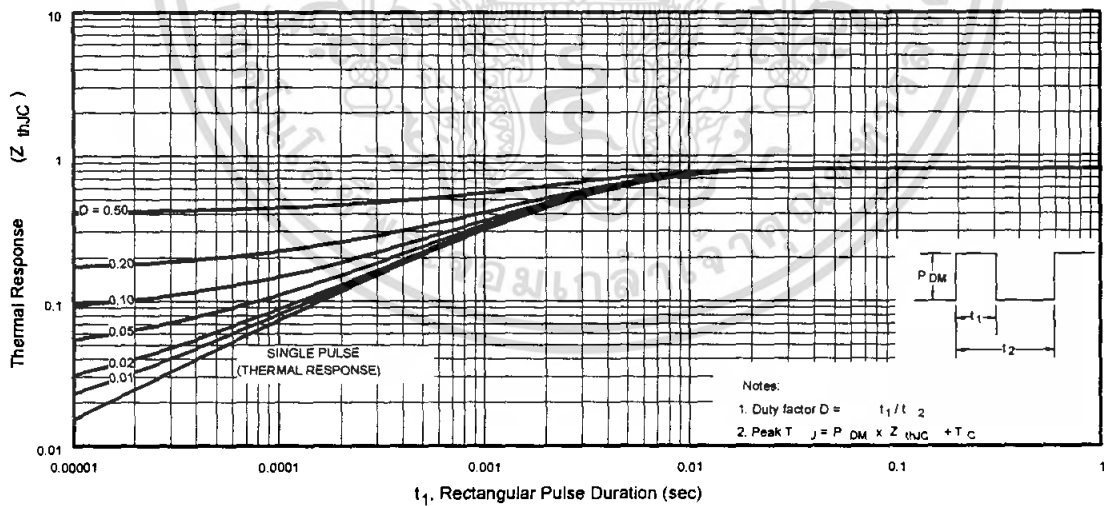


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

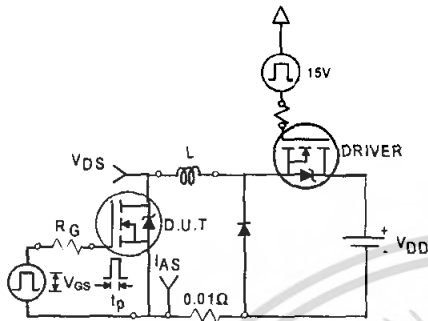


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

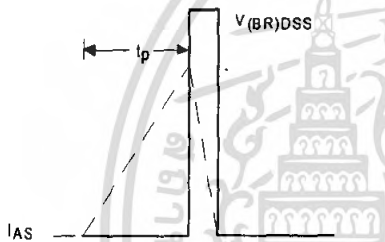


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

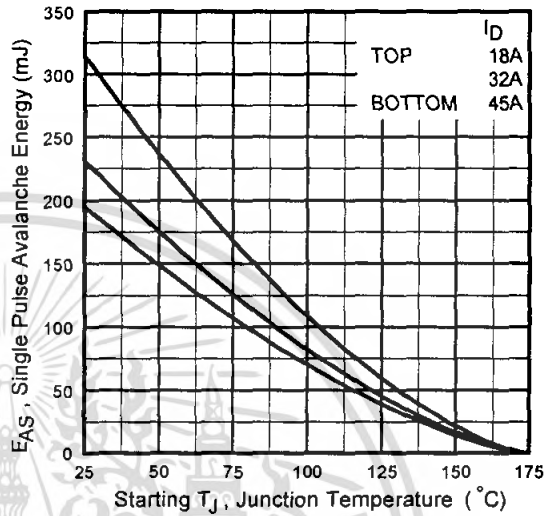


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

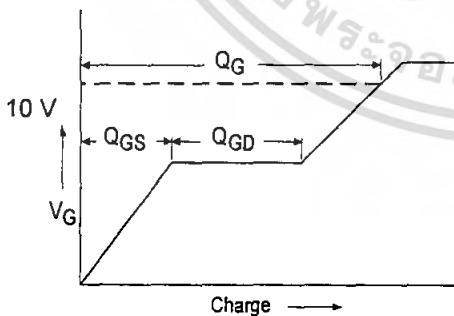


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

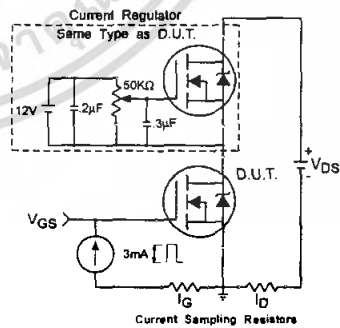


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit

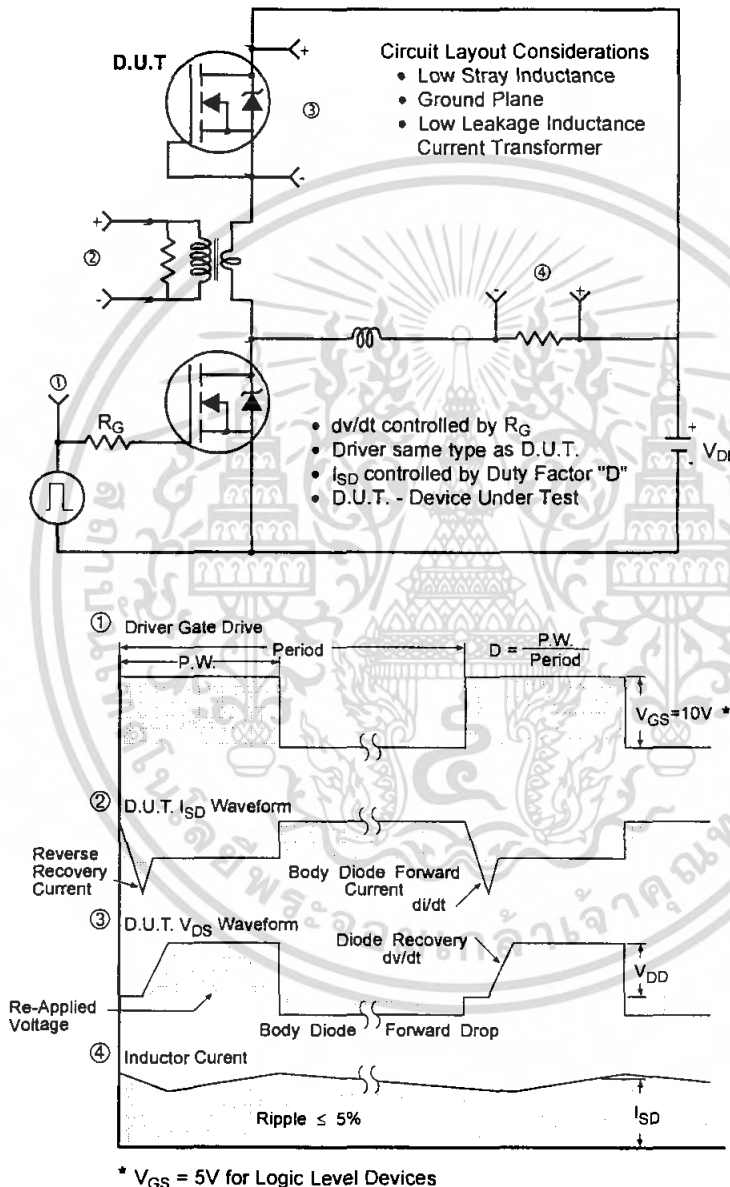


Fig 14. For N-Channel HEXFET® Power MOSFETs

INTERCHANGEABLE

Designed for low flow rates, the **Model P** flow meter is a precision instrument embodying the inherent simplicity, versatility and economy of the classical rotameter. It is particularly suitable for metering carrier gases in chromatography, indicating and controlling gases in manufacturing processes, liquid and gas measurement in laboratories, pilot plants, flow and level indicating, etc.

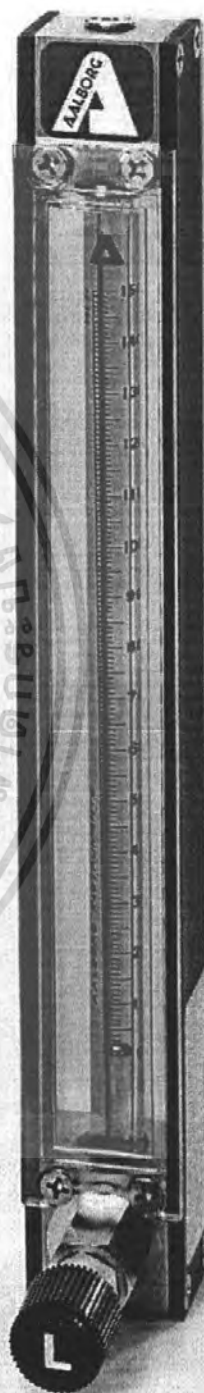
Shipped completely assembled, flow meters include standard mounting fittings in a choice of materials, side plates, thick protective magnifying front shield and back plate, optional built-in control valve, and flow tubes selected from the Flow Capacities tables. Panel mounting style is convertible to bench mounting through the use of the optional acrylic tripod. The tripod has a built-in spirit leveler and leveling screws.

For multiple tube meters see pages 7 and 8.

design features

- ✓ Rib-guided or fluted metering tubes facilitate stable, accurate readings.
- ✓ Magnifier lens in front shield to enhance reading resolution.
- ✓ Interchangeability of flow tubes and floats.
- ✓ Ease of installation and exchange of flow tubes.
- ✓ "Non-rotating" adapter feature - glass flow tubes are prevented from turning during the tightening phase of the assembly procedure.
- ✓ OPTIGRAD™ scales minimize parallax and eye fatigue.
- ✓ Chemical compatibility.
- ✓ Simple means of panel mounting.

150 mm Meter with CV™ Valve



65 mm Meter with MFV™ Valve

5 WWW.AALBORG.COM - E-MAIL : INFO@AALBORG.COM - PHONE ☎ 845.770.3000 - TOLL FREE IN U.S.A. AND CANADA 1.800.866.3837 - ORANGEBURG N.Y. U.S.A.
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BUILT-IN VALVES

Meters are available with built-in needle valves (CV™), high precision metering valves (MFV™) with "non-rising stems", or with no valves. The higher cost of MFV™ valves is justified whenever high sensitivity control and resolution are desirable particularly in conjunction with metering tubes of very low flow rates.

Generally, for gas metering it is recommended that valves are positioned at inlets (bottom) for liquids valves may be positioned either at inlets or outlets (top). For vacuum services, valves must be mounted at outlets. If unspecified at the time of ordering, meters will be shipped with valves mounted at the inlets.

Panel mounting is convertible to bench mounting through the use of an optional acrylic tripod base with spirit leveler (catalog No. TP1).

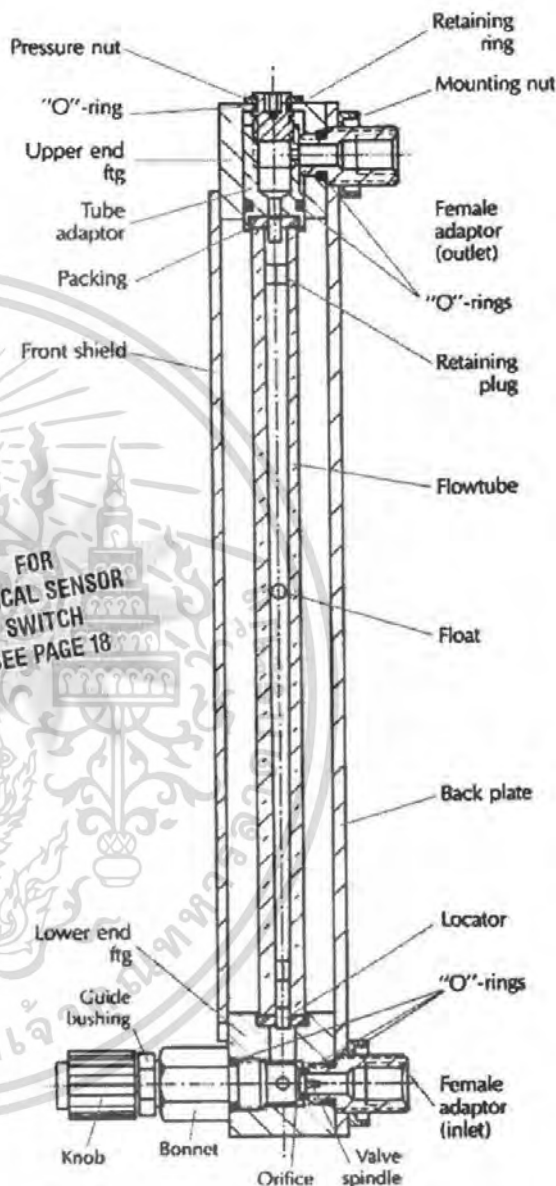
SPECIFICATIONS

STANDARD ACCURACY	±2% FS (mm scales). ±5% FS (direct reading scales).
CALIBRATED ACCURACY	±1% FS.
REPEATABILITY	±0.25%.
USEFUL FLOW RANGE	10:1 minimum with one float and better than 20:1 with combination of two floats installed in meters.
MAXIMUM OPERATING PRESSURE	200 psig/13.8 bars.
MAXIMUM OPERATING TEMPERATURE	250°F/ 121°C.

MATERIALS OF CONSTRUCTION

FLOW TUBES	Heavy walled borosilicate glass.
FLOATS	Glass, Sapphire, 316 Stainless Steel, Carbonyl and Tantalum.
CHOICE OF MOUNTING FITTINGS IN CONTACT WITH FLUIDS	a) Aluminum, black anodized. b) Brass, chrome plated. c) 316 stainless steel.
SIDE PANELS	Aluminum, black anodized.
FRONT SHIELD	Lexan® with longitudinal magnifier lens for enhanced reading resolution.
BACK PLATE	1/8" thick white acrylics.
O-RINGS AND PACKING	Buna-N® o-rings in aluminum/ brass model. Viton® o-rings in stainless steel meters. OPTIONAL Viton® PTFE Kalrez® and EPR.
CONNECTIONS	1/8" NPT female inlet and outlet connections. OPTIONAL 1/4" FNPT, hose and compression fittings are available.

Select flow tube consistent with requirements from flow capacity tables 6 to 22 (page 37 to 41).



Assorted flow tubes may be used in conjunction with a single mounting frame, an apparent benefit in many laboratory applications.

Ordering information see page 9.
Dimensional information see page 8.

The **Model Px** multiple tube flow meter line offers, the convenience and simplicity of 2, 3, 4, 5 and 6 tube meters, retaining most of the unique design features associated with single tube units. Multiple tube meters are available with 65mm or 150mm flow tubes same as used in single unit flow meters.

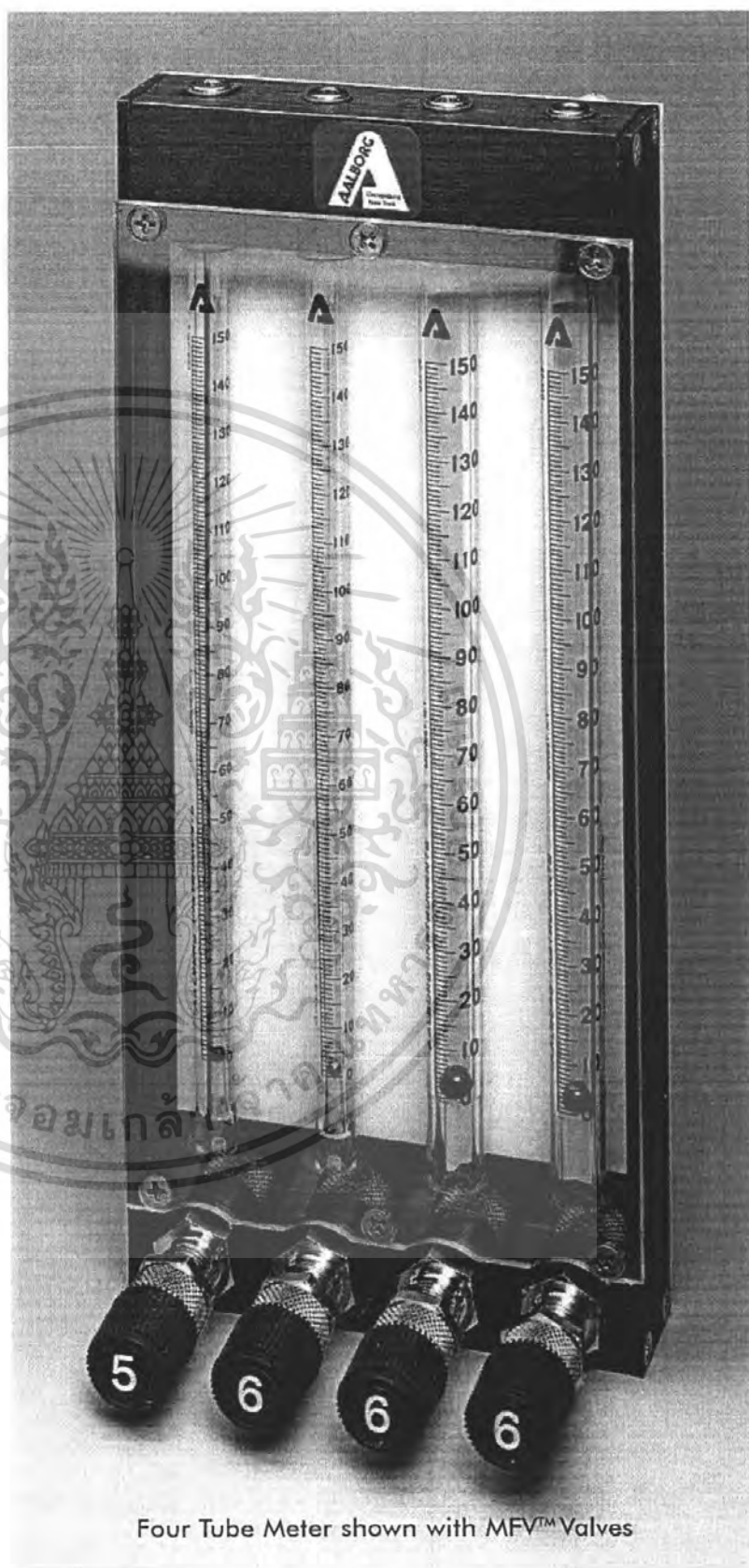
Px meters are convenient for applications where several streams of gases or liquids are to be metered in individual channels, or manifolded.

Shipped completely assembled, flow meters include standard mounting fittings in a choice of materials, side plates, thick protective front shield and back plate, optional built-in control valve, and flow tubes selected from the Flow Capacities tables.

Panel mounting style is convertible to bench mounting through the use of the optional acrylic tripod. The tripod has a built-in spirit leveler and leveling screws.

design features

- ✓ Rib-guided or fluted metering tubes facilitate stable, accurate readings.
- ✓ Interchangeability of flow tubes and floats.
- ✓ Manifolding at inlet or outlet.
- ✓ Ease of installation and exchange of flow tubes.
- ✓ "Non-rotating" adapter feature - glass flow tubes are prevented from turning during the tightening phase of the assembly procedure.
- ✓ OPTIGRAD™ scales minimize parallax and eye fatigue.
- ✓ Chemical compatibility.
- ✓ Simple means of panel mounting.



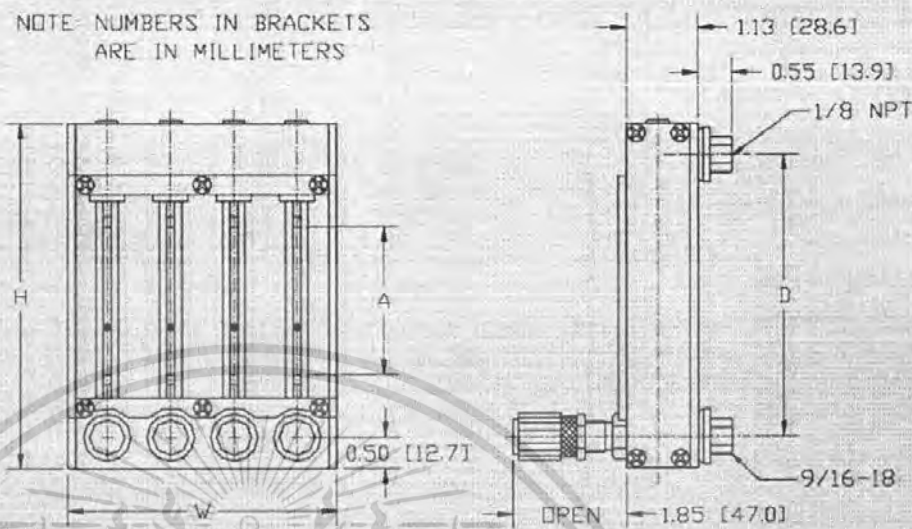
Four Tube Meter shown with MFV™ Valves

BUILT-IN VALVES

Meters may be supplied with built-in needle valves (CV™), high precision metering valves (MFV™) with "non-rising stems", or with no valves. Generally for gas metering, it is recommended that valves are positioned at inlets (bottom) for liquids valves may be positioned either at outlets (top) or inlets. For vacuum service, valves must be mounted at outlets. If unspecified at the time of ordering, meters will be shipped with valves mounted at inlets.

MOUNTING DIMENSIONS

NOTE: NUMBERS IN BRACKETS ARE IN MILLIMETERS



Ordering information see page 9.

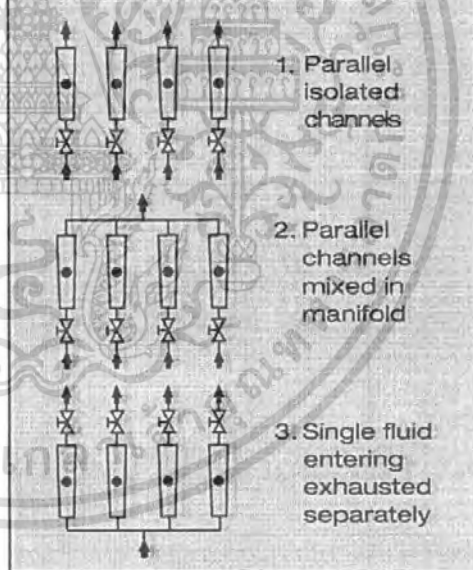
SPECIFICATIONS

STANDARD ACCURACY	±2% FS (mm scales) ±5% FS (direct reading scales). <i>Conforming to ISA RP. 16-1.2.3 Specification 2-S-10. Manifolded models excepted.</i>
CALIBRATED ACCURACY	±1% FS
REPEATABILITY	± 0.25%
USEFUL FLOW RANGES	10:1 minimum with one float. Better than 20:1 with combinations of two floats installed in meters.
MAXIMUM OPERATING PRESSURE	200 psig / 13.8 bars.
MAXIMUM OPERATING TEMPERATURE	250°F / 121°C.

MATERIALS OF CONSTRUCTION

FLOW TUBES	Heavy walled borosilicate glass.
CHOICE OF MOUNTING FITTINGS IN CONTACT WITH FLUIDS	a) Aluminum, black anodized. b) 316 Stainless Steel.
SIDE PANELS	Aluminum, black anodized.
FRONT SHIELD AND BACK PLATE	1/8" thick clear polycarbonate and white acrylics.
O-RINGS AND PACKING	Buna-N® o-rings in aluminum model. Viton® o-rings in stainless steel meters. OPTIONAL Viton®, PTFE/Kalrez®, EPR.
CONNECTIONS	1/8" NPT female inlet and outlet connections. OPTIONAL 1/4" FNPT, hose and compression fittings are available.

FLOW PATTERNS AVAILABLE



The built-in-valves are always installed in the end block opposite to the manifolded one.

Thus, if a meter is manifolded at the outlet, valves are installed at the inlets; if a meter is manifolded at the inlet, valves are installed at the outlets.

DIMENSIONS FOR P STYLE METERS

SCALE LENGTH (A)	HEIGHT (H)	CENTER TO CENTER (D)	WIDTH (W)					
			1 TUBE	2 TUBE	3 TUBE	4 TUBE	5 TUBE	6 TUBE
65mm	5.500	4.500	1.250	2.250	3.250	4.250	5.250	6.250
150mm	9.813	8.813	1.250	2.250	3.250	4.250	5.250	6.250



CONTENTS	
Introduction	Magnetic Characteristics
General Properties 1	Curve Fit Formulas 7
Tolerances 1	Initial Permeability vs. DC 8
Physical Properties	Percent Permeability vs. DC 8
Toroidal Cores 2	Percent Permeability vs. Peak AC 9
E Cores 6	Permeability vs. Frequency 9
	Core Losses 10

Copyright © 2007, Micrometals Inc., Issue C, Printed February 2007

INTRODUCTION

Micrometals 200C Series™ of magnetic alloy materials are specifically designed for severe environment applications where cores are exposed to or generate elevated temperatures. These cost-competitive core materials are not subject to thermal aging for operating temperatures up to +200°C. Revision C of this catalog introduces 2 new materials to the 60 series of materials. The -63 Material offers excellent high frequency properties while the -66 Material offers core losses that are well suited from 100kHz to 500kHz.

FINISH

The toroidal cores are provided with a protective coating. The T16 and T20 sizes are coated with Parylene C. The larger cores are coated with a two color code finish that is UL approved for Flame Class UL94V-0 per file #E140098(S).

AVAILABILITY

Part numbers which appear in bold print are considered stock items and will be most available. Other items are available on a build-to-order basis.

SAMPLES & ENGINEERING KITS

Micrometals will gladly extend sample cores and design assistance to aid in your core selection. Contact the factory regarding available engineering kits.

WARRANTY

Parts are warranted to conform to the specifications in the latest issue of this catalog. Micrometals' liability is limited to return of parts and repayment of price; or replacement of nonconforming parts. Notice of nonconformance must be made within 30 days after delivery. Before using these products, buyer agrees to determine suitability of the product for their intended use or application. Micrometals shall not be liable for any other loss or damage, including but not limited to incidental or consequential damages.

MICROMETALS FAX (714) 970-0400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GENERAL MATERIAL PROPERTIES

Material Mix No.	Reference Permeability (μ_0)	Material Density (g/cm^3)	Relative Cost	Color Code
-60	55	6.1	2.2	Brown/Black
-61	35	6.1	2.2	Brown/Gray
-63	35	5.9	3.7	Brown/Beige
-66	66	6.2	2.9	Brown/Brown
-70	100	7.4	14	Beige/Black
-M125	125	7.7	15	Lt Blue/Lt. Blue

CORE LOSS COMPARISON (mW/cm³)

PERM. WITH DC BIAS

Material Mix No.	60Hz @5000G	1kHz @1500G	10kHz @500G	50kHz @225G	100kHz @140G	500kHz @50G	1MHz @40G	DC = 50 Oersted % μ_0	$\mu_{effective}$
-60	43	72	76	70	52	38	68	74	40.6
-61	80	118	113	97	69	43	72	87	30.5
-63	74	77	60	47	31	15	20	92	31.2
-66	48	69	48	29	17	14	31	63	44.0
-70	5.8	9.0	9.6	13	13	28	70	50	49.5
-M125	5.3	6.3	6.2	10	13	34	86	44	55.0

MAGNETIC TOLERANCE & DIMENSIONAL TOLERANCE (inches)

MATERIAL MIX NO.	-60, -61, -63 & -66 Materials			-70 Material		-M125 Material	
A_L Tolerance	±10%			±10%		±10%	
TOROIDS*	OD	ID	Ht	TOROIDS*	OD	ID	Ht
T14 - T20	±.010	±.010	±.010	T150 - T225	±.025	±.025	±.030
T22 - T38	±.015	±.015	±.020	T249 - T400	±.030	±.030	±.030
T40 - T72	±.020	±.020	±.020	T520 - T650	±.050	±.050	±.050
T80 - T141	±.020	±.020	±.025				
E-CORES	A	B	C	D	F	G	Max. Gap**
E49 - E118	±.010	±.010	±.005	±.007	±.005	±.007	.0015
E125 - E162	±.015	±.015	±.007	±.010	±.007	±.010	.0015
E168 - E225	±.015	±.015	±.010	±.010	±.007	±.010	.0020
E305 - E450	±.030	±.030	±.015	±.020	±.015	±.020	.0030
E610	±.040	±.040	±.025	±.030	±.025	±.030	.005

*Tolerance includes coating **Gap per piece.

MATERIAL DESCRIPTION

60 Series: The 60 series of materials are cost effective magnetic powder alloy materials available in a wide range of properties with permeabilities ranging from 35 to 66. The -63 Material has excellent high frequency properties and can be utilized past 10MHz. The -66 Material has the best performance in the 100kHz to 500kHz range.

70 Series: The 70 series is a magnetic powder alloy including nickel. The -70 Material has higher permeability than the 60 series with excellent losses up to 400kHz. The -70 Material is a relatively expensive material, most competitively priced in smaller sizes.

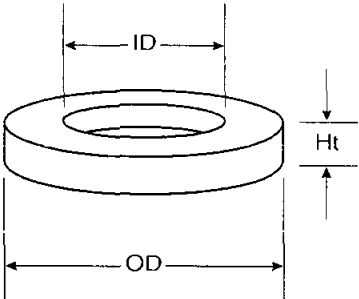
M Series: The M series is a moly-permalloy powder material and will have the highest permeability and lowest losses below 200kHz. Similar to the -70 Material in cost, the -M125 Material will be most competitively priced in physically small sizes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOROIDAL CORES

COLOR CODE

- 60 Brown/Black
- 61 Brown/Gray
- 63 Brown/Beige
- 66 Brown/Brown
- 70 Beige/Black
- M125 Lt. Blue/Lt. Blue



TYPICAL PART NO.

T 80 - 60 B /

OD in 100th inches
Micrometals Mix No.
Letter indicates Alternate Height
Code Area For Other Characteristics

Refer to page 1 for tolerances.

MICROMETALS Part No.	A _L nH/N ²	OD in/mm	ID in/mm	Ht in/mm	ℓ cm	A cm ²	V cm ³
T20-60	13.0	.200/5.08	.088/2.24	.070/1.78	1.15	.023	.026
T20-63	7.8						
T20-66	15.5						
T20-70	22.5						
T25-60	17.0	.255/6.48	.120/3.05	.096/2.44	1.50	.037	.055
T25-63	10.0						
T25-66	20.0						
T25-70	31.0						
T30-60	22.0	.307/7.80	.151/3.84	.128/3.25	1.84	.060	.110
T30-63	14.0						
T30-66	26.5						
T30-70	40.5						
T30-M125	52.0						
T30-M125E	64.0	.310/7.87	.156/3.96	.156/3.96	1.84	.073	.134
T37-60	19.0	.375/9.53	.205/5.21	.128/3.25	2.31	.064	.147
T37-63	12.0						
T37-66	22.5						
T37-70	34.0						
T38-60	36.0	.375/9.53	.175/4.45	.190/4.83	2.18	.114	.248
T38-63	22.5						
T38-66	43.0						
T38-70	65.0						
T39-M125	53.3	.380/9.65	.188/4.78	.125/3.18	2.27	.072	.164
T40-66	31.5	.400/10.20	.200/5.08	.156/3.96	2.39	.096	.229
T40-M125	66.0						
T44-60	25.5	.440/11.20	.229/5.82	.159/4.04	2.68	.099	.266
T44-63	16.0						
T44-66	30.5						
T44-70	46.5						
T45-63B	18.0	.440/11.20	.250/6.35	.190/4.83	2.75	.135	.370
T45-66B	34.0						
T45-M125C	53.0	.440/11.20	.250/6.35	.156/3.96	2.75	.091	.250

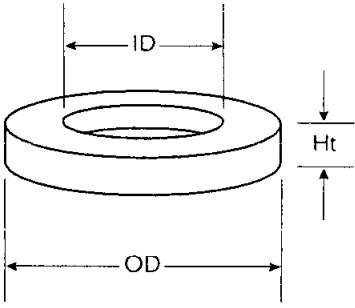
MICROMETALS FAX (714) 970-0400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOROIDAL CORES

COLOR CODE

- 60 Brown/Black
- 61 Brown/Gray
- 63 Brown/Beige
- 66 Brown/Brown
- 70 Beige/Black
- M125 Lt. Blue/Lt. Blue



TYPICAL PART NO.

T 80 - 60 B /

OD in 100th inches
Micrometals Mix No.
Letter indicates Alternate Height
Code Area For Other Characteristics

Refer to page 1 for tolerances.

MICROMETALS Part No.	A_L nH/N ²	OD in/mm	ID in/mm	Ht in/mm	l cm	A cm ²	V cm ³
T50-60	24.0	.500/12.70	.303/7.70	.190/4.83	3.19	.112	.358
T50-63	15.5						
T50-66	29.0						
T50-70	44.0						
T50-M125	56.0						
T50-60B	32.0	.500/12.7	.303/7.70	.250/6.35	3.19	.148	.471
T50-63B	20.0						
T50-66B	38.0						
T50-70B	58.0						
T50-63C	27.5	.500/12.7	.303/7.70	.335/8.51	3.19	.200	.637
T50-66C	51.0						
T50-66D	57.0	.500/12.7	.303/7.70	.375/9.53	3.19	.223	.711
T50-70D	88.0						
T60-60	34.5	.600/15.2	.336/8.53	.234/5.94	3.74	.187	.699
T60-63	21.5						
T60-66	41.0						
T60-70	62.0						
T66-M125	72.0	.650/16.5	.400/10.2	.250/6.35	4.19	.192	.803
T68-60	29.0	.690/17.5	.370/9.40	.190/4.83	4.23	.179	.759
T68-63	18.5						
T68-66	35.0						
T68-70	53.0						
T68-60A	39.5	.690/17.5	.370/9.40	.250/6.35	4.23	.242	1.03
T68-63A	25.0						
T68-66A	47.0						
T68-70A	71.0						
T80-60	31.0	.795/20.2	.495/12.6	.250/6.35	5.14	.231	1.19
T80-63	19.5						
T80-66	37.0						
T80-70	56.0						
T80-M125	68.0						
T80-60B	46.5	.795/20.2	.495/12.6	.375/9.53	5.14	.347	1.78
T80-63B	29.0						
T80-66B	55.0						
T80-70B	84.0						

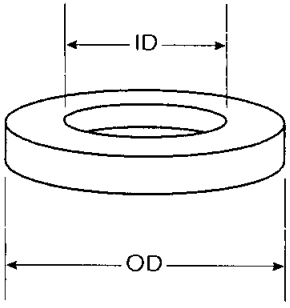
MICROMETALS
 TEL. (714) 970-9400
 FAX (714) 970-0400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOROIDAL CORES

COLOR CODE

- 60 Brown/Black
- 61 Brown/Gray
- 63 Brown/Beige
- 66 Brown/Brown
- 70 Beige/Black
- M125 Lt. Blue/Lt. Blue



TYPICAL PART NO.

T 80 - 60 B /

OD in 100th inches
 Micrometals Mix No.
 Letter indicates Alternate Height
 Code Area For Other Characteristics

Refer to page 1 for tolerances.

MICROMETALS Part No.	A_L nH/N ²	OD in/mm	ID in/mm	Ht in/mm	ℓ cm	A cm ²	V cm ³
T90-60	47.0	.900/22.9	.550/14.0	.375/9.53	5.78	.395	2.28
T90-66	56.0						
T90-70	85.0						
T90-M125E	90.0	.900/22.9	.550/14.0	.300/7.62	5.78	.320	1.85
T93-M125	105.0	.928/23.6	.567/14.4	.350/8.89	5.96	.389	2.32
T94-60	42.0	.942/23.9	.560/14.2	.312/7.92	5.97	.362	2.16
T94-63	26.0						
T94-66	50.0						
T94-70	76.0						
T106-60	70.0	1.060/26.9	.570/14.5	.437/11.1	6.49	.659	4.28
T106-63	44.5						
T106-66	84.0						
T106-70	125.0						
T106-M125	157.0						
T106-60B	91.0	1.060/26.9	.570/14.5	.575/14.6	6.49	.858	5.57
T106-63B	57.0						
T106-66B	109.0						
T130-60	58.0	1.300/33.0	.780/19.8	.437/11.1	8.28	.698	5.78
T130-63	36.0						
T130-66	69.0						
T130-70	105.0						
T150-60	65.0	1.510/38.4	.845/21.5	.437/11.1	9.38	.887	8.31
T150-63	41.0						
T150-66	78.0						
T150-70	118.0						
T157-60	73.0	1.570/39.9	.950/24.1	.570/14.5	10.1	1.06	10.7
T157-63	45.0						
T157-66	87.0						
T157-70	130.0						
T175-60	82.0	1.750/44.5	1.070/27.2	.650/16.5	11.2	1.34	15.0
T175-66	97.0						
T184-60	116.0	1.840/46.7	.950/24.1	.710/18.0	11.2	1.88	21.0
T184-63	72.0						
T184-66	139.0						

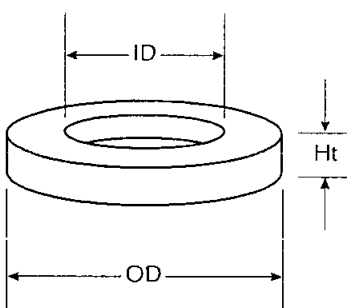
MICROMETALS FAX (714) 970-0400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOROIDAL CORES

COLOR CODE

- 60 Brown/Black
- 61 Brown/Gray
- 63 Brown/Beige
- 66 Brown/Brown
- 70 Beige/Black
- M125 Lt. Blue/Lt. Blue



TYPICAL PART NO.

T 80 - 60 B /

OD in 100th inches
Micrometals Mix No.
Letter indicates Alternate Height
Code Area For Other Characteristics

Refer to page 1 for tolerances.

MICROMETALS Part No.	A_t nH/N ²	OD in/mm	ID in/mm	Ht in/mm	l cm	A cm ²	V cm ³
T200-60	67.0	2.000/50.8	1.250/31.8	.550/14.0	13.0	1.27	16.4
T200-66	80.0						
T200-60B	120.0	2.000/50.8	1.250/31.8	1.000/25.4	13.0	2.32	30.0
T200-66B	145.0						
T225-60	67.0	2.250/57.2	1.405/35.7	.550/14.0	14.6	1.42	20.7
T225-61	42.5						
T225-63	42.5						
T225-60B	120.0	2.250/57.2	1.405/35.7	1.000/25.4	14.6	2.59	37.8
T225-66B	145.0						
T250-60	177.0	2.500/63.5	1.250/31.8	1.000/25.4	15.0	3.84	57.4
T250-61	113.0						
T250-63	113.0						
T250-66	210.0						
T250-61A	56.0	2.500/63.5	1.250/31.8	.500/12.7	15.0	1.92	28.7
T300-60	58.0	3.040/77.2	1.930/49.0	.500/12.7	19.8	1.68	33.4
T300-61	37.0						
T300-66	70.0						
T300-60D	116.0	3.040/77.2	1.930/49.0	1.000/25.4	19.8	3.38	67.0
T300-63D	74.0						
T300-66D	140.0						
T400-60	96.0	4.000/102	2.250/57.2	.650/16.5	25.0	3.46	86.4
T400-66	114.0						
T400-60D	192.0	4.000/102	2.250/57.2	1.300/33.0	25.0	6.85	171
T400-61D	120.0						
T400-63D	120.0						
T400-66D	228.0						
T520-63	68.0	5.200/132	3.080/78.2	.800/20.3	33.1	5.24	173
T520-66	130.0						
T650-63	200.0	6.500/165	3.500/88.9	2.000/50.8	39.9	18.4	734
T650-66	380.0						

TEL. (714) 970-9400
 FAX (714) 970-0400

MICROMETALS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E CORES

COLOR CODE
 -60 Brown/Black
 -66 Brown/Brown
 -70 Beige/Black

TYPICAL PART NO.

E 168 - 60 A /

"A" dimension in 100th inches
 Micrometals Mix No.
 Letter Indicates Alternate "C" dimension
 Indicates Center-leg gap per half in .001 inches

E49-E100 Not Color Coded
Refer to page 1 for tolerances.

E CORES ORDERED PER HALF

MICROMETALS Part No. (BOBBIN)	A _L nH/N ² (REF. SIZE)	MAGNETIC DIMENSIONS						MAGNETIC DIMENSIONS			
		A in/mm	B in/mm	C in/mm	D in/mm	F in/mm	G in/mm	ℓ cm	A cm ²	V cm ³	W cm ²
E49-66 E49-70 (PB49)	32.0 45.0 (US LAM: EE-28-29)	.500/12.7	.437/11.1	.125/3.18	.312/7.93	.125/3.18	.375/9.53	2.86	.101	.288	.252
E75-60 E75-70 (PB75)	50.0 72.0 (US LAM: EI-187)	.750/19.1	.635/16.1	.187/4.75	.455/11.6	.187/4.75	.562/14.3	4.20	.226	.936	.551
E100-60 (PB100E)	75.0 (US LAM: EE-24-25)	1.000/25.4	.750/19.1	.250/6.35	.500/12.7	.250/6.35	.750/19.1	5.08	.403	2.05	.806
E137-60 E137-66 (PB137)	100.0 113.0 (US LAM: EI-375)	1.375/34.9	1.145/29.1	.375/9.53	.770/19.6	.375/9.53	1.000/25.4	7.40	.907	6.72	1.55
E162-66 (PB162)	168.0 (US LAM: EI-21)	1.625/41.3	1.342/34.1	.500/12.7	.842/21.4	.500/12.7	1.125/28.6	8.41	1.61	13.6	1.70
E168-60 E168-66 (PB168)	135.0 155.0 (DIN: 42/15)	1.685/42.8	1.660/42.2	.590/15.0	1.210/30.7	.475/12.0	1.210/30.7	10.4	1.81	18.5	2.87
E168-66A (PB168A)	190.0 (DIN: 42/20)	1.685/42.8	1.660/42.2	.787/20.0	1.210/30.7	.475/12.0	1.210/30.7	10.4	2.41	24.6	2.87
E220-60 E220-66 (PB220)	196.0 220.0 (DIN: 55/21)	2.210/56.1	2.180/55.4	.820/20.8	1.510/38.3	.680/17.3	1.520/38.6	13.2	3.62	47.7	4.09
E305-60 E305-66 (PB305 or PB305/V0)	222.0 250.0	3.051/77.5	3.051/77.5	.933/23.7	2.118/53.8	.933/23.7	2.118/53.8	18.5	5.62	104	8.10
E305-60A E305-66A (PB305A or PB305A/V0)	280.0 315.0	3.051/77.5	3.051/77.5	1.244/31.6	2.118/53.8	.933/23.7	2.118/53.8	18.5	7.49	139	8.10
E450-60 E450-66 (PB450/V0)	400.0 460.0 (US LAM: EI-30)	4.500/114	3.636/92.4	1.375/34.9	2.250/57.2	1.375/34.9	3.120/79.3	22.9	12.2	280	12.7
E610-66	500.0	6.102/155	6.102/155	1.866/47.4	4.236/108	1.866/47.4	4.236/108	37.0	22.5	832	32.4

MICROMETALS
FAX (714) 970-0400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAGNETIC CHARACTERISTICS

PERCENT PERMEABILITY vs DC MAGNETIZING FORCE

Material	a	b	c	d	e
-60	10140	6.06×10^{-3}	-0.570	2.24×10^{-4}	0.0304
-61	10050	2.12×10^{-3}	-0.362	8.82×10^{-5}	0.0137
-63	10000	-6.28×10^{-5}	-7.41	6.16×10^{-5}	0.0168
-66	10000	8.67×10^{-3}	-5.72	4.66×10^{-4}	0.0315
-70	10040	-4.41×10^{-3}	-83.5	7.40×10^{-4}	0.2220
-M125	9900	-1.60×10^{-2}	-88.6	1.11×10^{-3}	0.2260

PERCENT PERMEABILITY vs PEAK AC FLUX DENSITY*

Material	a	b	c	d	e
-60	9800	1.66×10^{-3}	27.7	1.04×10^{-8}	-1.33×10^{-3}
-61	9970	4.95×10^{-4}	11.5	6.54×10^{-10}	-8.78×10^{-4}
-63	10000	-3.41×10^{-5}	3.08	4.63×10^{-8}	-7.36×10^{-5}
-66	10000	4.64×10^{-5}	12.1	3.27×10^{-8}	-1.01×10^{-3}
-70	10120	-8.81×10^{-4}	11.4	8.82×10^{-9}	-8.29×10^{-4}
-M125	10120	8.81×10^{-4}	11.4	8.82×10^{-9}	-8.29×10^{-4}

CORE LOSS vs PEAK AC FLUX DENSITY

Material	a	b	c	d
-60	5.3×10^8	1.4×10^8	1.2×10^6	2.7×10^{-14}
-61	4.0×10^8	1.1×10^8	5.1×10^5	2.4×10^{-14}
-63	9.9×10^8	2.6×10^8	1.0×10^4	3.3×10^{-15}
-66	1.7×10^{10}	5.0×10^7	1.2×10^6	1.7×10^{-14}
-70	1.0×10^{10}	1.3×10^9	7.9×10^6	4.2×10^{-14}
-M125	3.1×10^{10}	2.7×10^9	3.3×10^6	5.3×10^{-14}

* Curve fit formula valid only for ranges shown on graph

The magnetic characteristic curves shown on pages 8 and 9 have a typical tolerance of +20%, -10%.

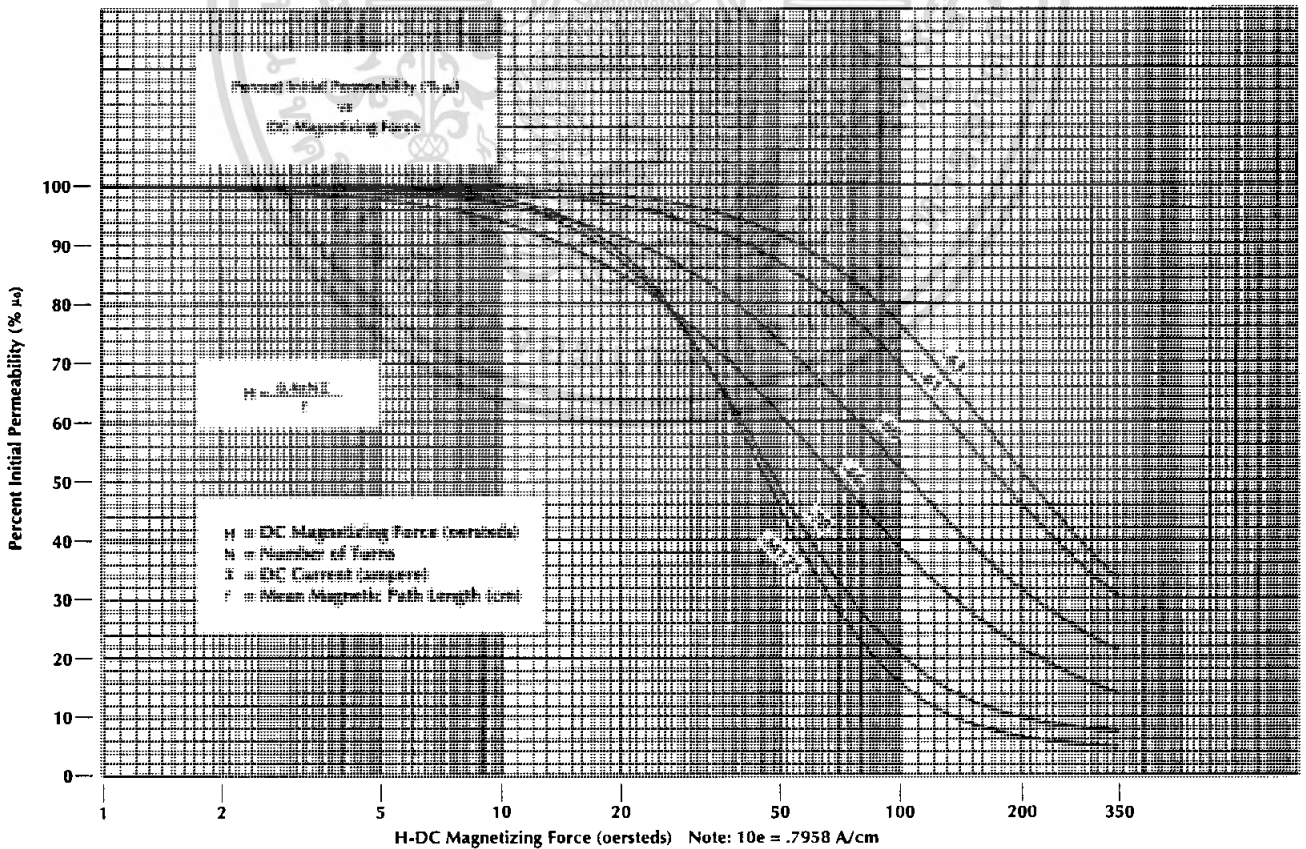
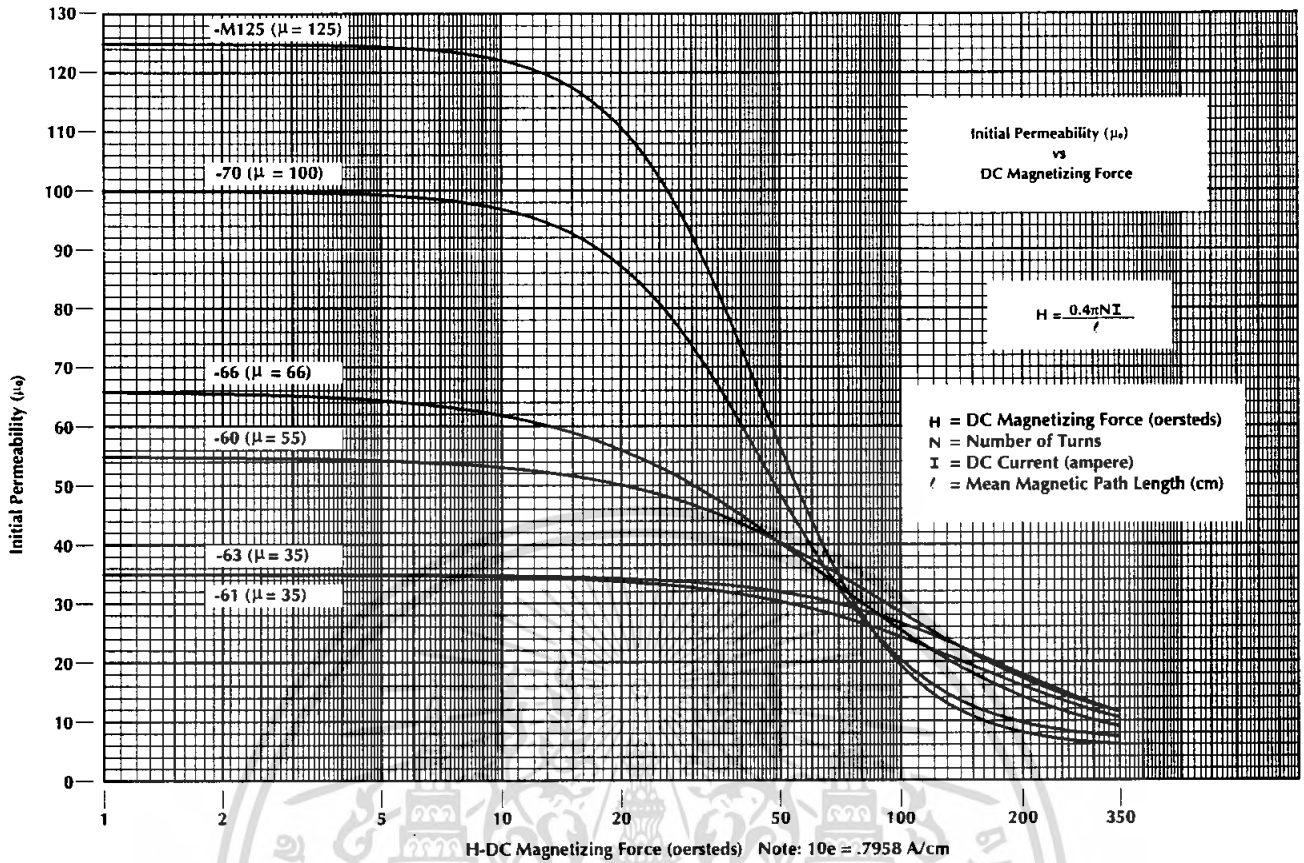
The core loss curves on pages 10 to 12 have a typical tolerance of $\pm 15\%$.

TEL. (714) 970-9400
FAX (714) 970-0400

MICROMETALS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAGNETIC CHARACTERISTICS



MICROMEALS
 FAX (714) 970-0400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POWER RELAY

1 POLE—3, 5, 10 A

FBR160 SERIES

■ FEATURES

- Compact with high power (3 A to 10 A)
- 6 types of contact materials available for home electronics and automotive applications
- Design conforms to the following safety standards
 - UL114 No. E63615
 - UL508 No. E63614
 - CSA No. LR64026
 - Japan Electric Appliance Control Law (150–300 V)
- For automatic assembly
 - Tube packaging suitable for automatic insertion equipment is available



■ ORDERING INFORMATION

[Example] FBR16 1 S E D 012 UH -CSA --- -S
 (a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) (h) (i) (j)

(a)	Series Name	FBR16: FBR160 Series		
(b)	Contact Arrangement	1 : 1 form C (SPDT) 3 : 1 form A (SPST-NO)		
(c)	Enclosure	S : Flux free N : Plastic sealed		
(d)	Coil Rating	E : Nominal power 0.36 W type C : Nominal power 0.5 W type (refer to the SPECIFICATIONS)		
(e)	Coil	D : DC Coil		
(f)	Nominal Voltage	(Example) 012: 12 VDC coil 024: 24 VDC coil (refer to the COIL DATA CHART)		
(g)	UL Standard and Contact Material	UL 114 recognized	UL508 recognized	Material / Rating
		U UK UH UW UHB UWB	R RK RH RW RHB RWB	Silver (3A) Silver-cadmium oxide (3 A) Silver-cadmium oxide (5 A) Silver tin oxide alloy (5 A) Silver-cadmium oxide (AC 10 A) Silver tin oxide alloy (DC 10 A)

(Continued)

FBR160 SERIES

(h)	CSA Standard	No designation: standard -CSA: CSA recognized (g) specifies UL 114 or UL 508
(i)	Custom Designation	Suffix number for custom design
(j)	Package Style	Nil : Standard tray -S : Tube carrier

Note: The designation name is stamped on the top of the relay case as follows:
(Example) Designation ordered: FBR161NED012-H
Stamp: 161NED012-H

■ SAFETY STANDARD AND FILE NUMBERS

UL 114 (File No. E63615)

UL 508 (File No. E63614)

C22.2, No. 14 (File No. LR40304, LR61320 or LR64026)

Nominal voltage	Type (contact material)	Contact rating	
5 to 24 VDC	Silver (no designation)	3 A	120 VAC/ 30 VDC resistive
	Silver-cadmium oxide (-K)	1/10 HP	120 VAC
	Silver-cadmium oxide(-H)	5 A	120 VAC/30 VDC resistive
	Silver tin oxide alloy (-W)	1/6 HP	120 VAC
	Silver tin oxide alloy (-WB)	10 A (N.O.) 7 A (N.C.)	120 VAC/250 VAC resistive
	Silver-cadmium oxide (-HB)	10 A	30 VDC resistive
		1/8 HP	120 VAC/250 VAC

FBR160 SERIES

■ SPECIFICATIONS

Item		—	-K	-H	-W	-HB	-WB	
Contact	Arrangement and Style	1 form C or 1 form A, single contact						
	Material	Silver	Silver-cadmium oxide		Silver tin oxide alloy	Silver-cadmium oxide	Silver tin oxide alloy	
	Resistance (initial)	Maximum 100 mΩ (silver contact at 0.5 A 6 VDC/other contacts at 1 A 6 VDC)						
	Ratings (resistive load)	3 A 120 VAC 3 A 28 VDC		5 A 120 VAC 5 A 28 VAC		5 A 28 VDC	10 A 120 VAC (N.O.) 7 A 120 VAC (N.C.)	10 A 28 VDC
	Maximum Carrying Current	5 A				10 A	10 A	
	Maximum Switching Power	360 VA or 84 W		600 VA or 140 W		140 W	1,200 VA	280 W
	Max. Switching Voltage* ¹	250 VAC or 125 VDC						
	Minimum Switching Load* ²	0.3 W (30 mA 5 V)			0.3 W (50 mA 5 V)	0.5 W (100 mA 5 V)	0.5 W (100 mA 5 V)	
Coil	Nominal Power	Approx. 0.36 W (E coil type)/0.5 W (C coil type) (at 20°C)						
	Operating Temperature	-30°C to +80°C (no frost) * ³						
	Operate Humidity	45 to 85% RH						
Time Value	Operate (at nominal voltage)	Maximum 10 msec						
	Release (at nominal voltage)	Maximum 5 msec						
Insulation	Resistance (initial)	Minimum 100 MΩ (at 500 VDC)						
	Dielectric Strength	Between coil and contacts	1,500 VAC 1 minute					
		Between open contacts	500 VAC 1 minute					
Surge Strength	3,500 V (at 1.2 × 50 μs)							
Life	Mechanical	1 × 10 ⁷ operations minimum						
	Electrical (refer to the REFERENCE DATA)	DC	1 × 10 ⁵ operations minimum (at contact rating)					
		AC	1 × 10 ⁵ operations minimum (at contact rating)					
Other	Vibration Resistance	10 to 55 Hz (double amplitude of 1.5mm)						
	Shock Resistance	No contact opening	100 m/s ² (11 ± 1ms)					
		No damage	1,000 m/m ² (6 ± 1ms)					
	Weight	Approximately 11 g						

*¹ If the switching voltage exceeds the rated contact voltage, reduce the current. The current values vary according to the type of load.

*² Values when switching a resistive load at normal room temperature and humidity, and in a clean environment. The minimum switching load varies with the switching frequency and operation environment.

*³ Based on UL Class A coil insulation system.

FBR160 SERIES

■ COIL RATINGS

1. E (0.36 WATT COIL TYPE)

MODEL				Nominal voltage	Coil resistance (±10%)	Nominal current (at nominal voltage) approx.	Must operate voltage	Must release voltage	Maximum allowable voltage	Nominal power	Coil temperature rise
1 Form C type		1 Form A type									
Flux free	Plastic sealed	Flux free	Plastic sealed								
FBR161SED005 □	FBR161NED005 □	FBR163SED005 □	FBR163SED005 □	5 VDC	70 Ω	71 mA	80% max. of nominal voltage	10% min. of nominal voltage	210% of nominal voltage	Approx. 360 mW (at nominal voltage)	Approx. 30 deg (at nominal voltage)
FBR161SED006 □	FBR161NED006 □	FBR163SED006 □	FBR163SED006 □	6 VDC	100 Ω	60 mA					
FBR161SED009 □	FBR161NED009 □	FBR163SED009 □	FBR163SED009 □	9 VDC	225 Ω	40 mA					
FBR161SED012 □	FBR161NED012 □	FBR163SED012 □	FBR163SED012 □	12 VDC	400 Ω	30 mA					
FBR161SED024 □	FBR161NED024 □	FBR163SED024 □	FBR163SED024 □	24 VDC	1,600 Ω	15 mA					

Note: All values in the table are measured at 20°C.

2. C (0.5 WATT COIL TYPE)

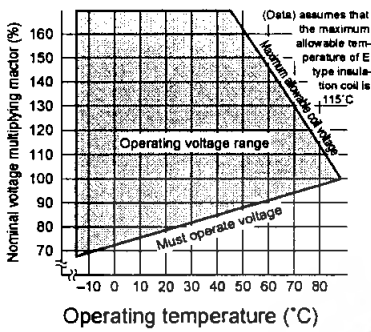
MODEL				Nominal voltage	Coil resistance (±10%)	Nominal current (at nominal voltage) approx.	Must operate voltage	Must release voltage	Maximum allowable voltage	Nominal power	Coil temperature rise
1 Form C type		1 Form A type									
Flux free	Plastic sealed	Flux free	Plastic sealed								
FBR161SCD005 □	FBR161NCD005 □	FBR163SCD005 □	FBR163SCD005 □	5 VDC	50 Ω	100 mA	75% max. of nominal voltage	10% min. of nominal voltage	210% of nominal voltage	Approx. 500 mW (at nominal voltage)	Approx. 35 deg (at nominal voltage)
FBR161SCD006 □	FBR161NCD006 □	FBR163SCD006 □	FBR163SCD006 □	6 VDC	72 Ω	83 mA					
FBR161SCD009 □	FBR161NCD009 □	FBR163SCD009 □	FBR163SCD009 □	9 VDC	162 Ω	56 mA					
FBR161SCD012 □	FBR161NCD012 □	FBR163SCD012 □	FBR163SCD012 □	12 VDC	288 Ω	42 mA					
FBR161SCD024 □	FBR161NCD024 □	FBR163SCD024 □	FBR163SCD024 □	24 VDC	1,152 Ω	21 mA					
FBR161SCD048 □	FBR161NCD048 □	FBR163SCD048 □	FBR163SCD048 □	48 VDC	4,600 Ω	10 mA					

Note: All values in the table are measured at 20°C.

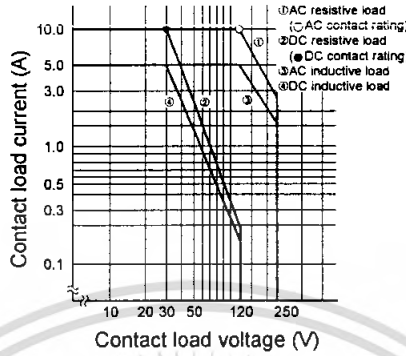
FBR160 SERIES

CHARACTERISTIC DATA

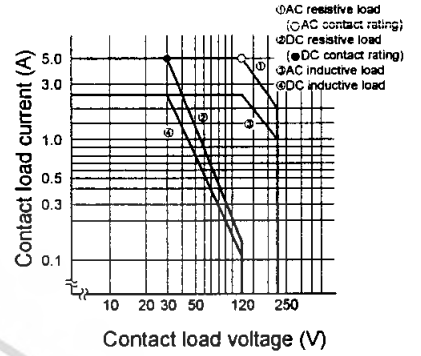
Range of operation temperature and voltage
E type [0.36 W type]



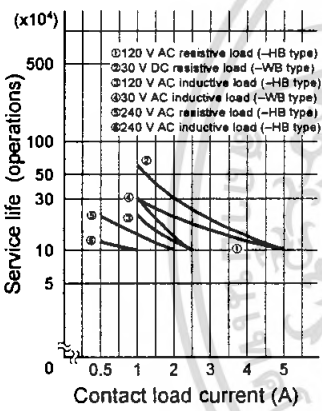
Maximum switching capacity (10 A type)



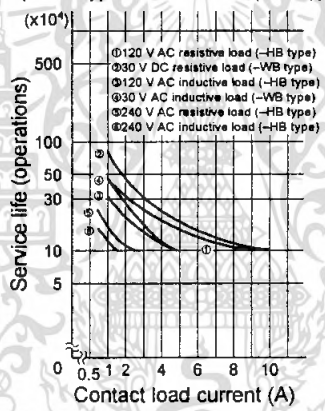
Maximum switching capacity (5 A type)



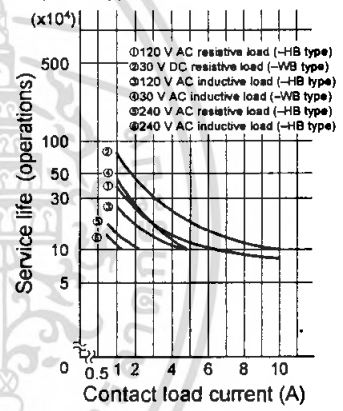
Life curve (5 A type)



Life curve (10 A type, make side (N.O.))

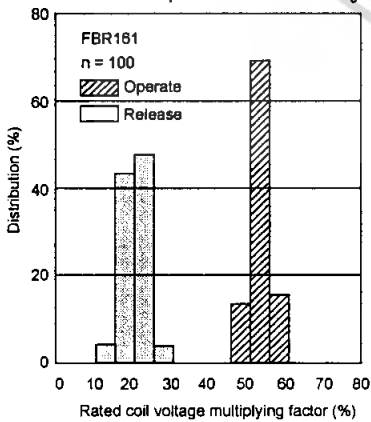


Life curve (10 A type, break side (N.C.))

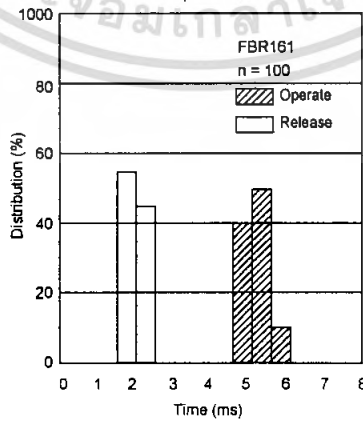


REFERENCE DATA

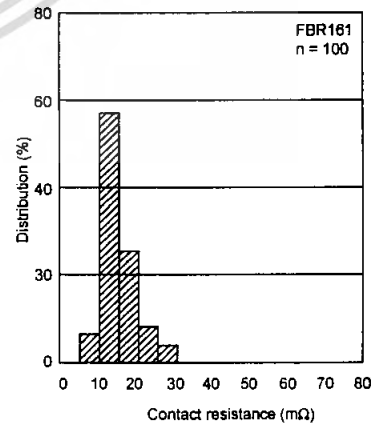
Distribution of operate and release voltage



Distribution of operate and release time



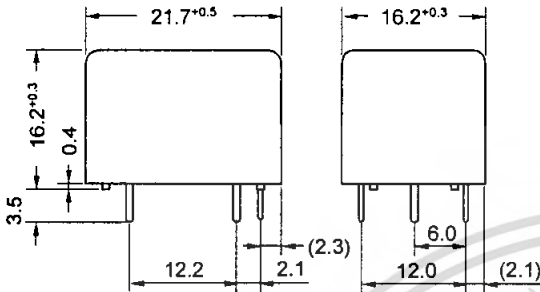
Distribution of contact resistance



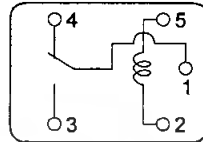
FBR160 SERIES

■ DIMENSIONS

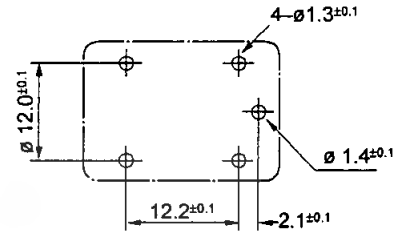
● Dimensions



● Schematic (BOTTOM VIEW)

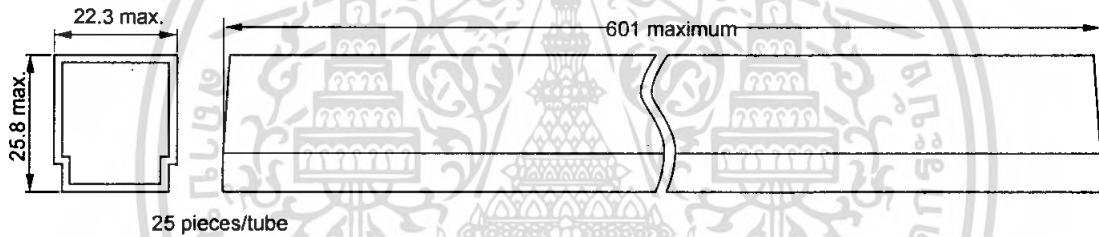


● PC board mounting hole layout (BOTTOM VIEW)



Note : For 1 form A type, terminal No.4 is removed.

● Tube carrier



Unit: mm

Fujitsu Components International Headquarter Offices

Japan
Fujitsu Component Limited
Gotanda-Chuo Building
3-5, Higashigotanda 2-chome, Shinagawa-ku
Tokyo 141, Japan
Tel: (81-3) 5449-7010
Fax: (81-3) 5449-2626
Email: promothq@ft.ed.fujitsu.com
Web: www.fcd.fujitsu.com

North and South America
Fujitsu Components America, Inc.
250 E. Caribbean Drive
Sunnyvale, CA 94089 U.S.A.
Tel: (1-408) 745-4900
Fax: (1-408) 745-4970
Email: marcom@fcai.fujitsu.com
Web: www.fcai.fujitsu.com

Europe
Fujitsu Components Europe B.V.
Diamantlaan 25
2132 WV Hoofddorp
Netherlands
Tel: (31-23) 5560910
Fax: (31-23) 5580950
Email: info@fceu.fujitsu.com
Web: www.fceu.fujitsu.com

Asia Pacific
Fujitsu Components Asia Ltd.
102E Pasir Panjang Road
#04-01 Citilink Warehouse Complex
Singapore 118529
Tel: (65) 6375-8560
Fax: (65) 6273-3021
Email: fcal@fcal.fujitsu.com
www.fcal.fujitsu.com

© 2003 Fujitsu Components America, Inc. All company and product names are trademarks or registered trademarks of their respective owners. Rev. 02/12/2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



dsPIC30F2010 Data Sheet

High-Performance, 16-Bit
Digital Signal Controllers

Note the following details of the code protection feature on Microchip devices:

- Microchip products meet the specification contained in their particular Microchip Data Sheet.
- Microchip believes that its family of products is one of the most secure families of its kind on the market today, when used in the intended manner and under normal conditions.
- There are dishonest and possibly illegal methods used to breach the code protection feature. All of these methods, to our knowledge, require using the Microchip products in a manner outside the operating specifications contained in Microchip's Data Sheets. Most likely, the person doing so is engaged in theft of intellectual property.
- Microchip is willing to work with the customer who is concerned about the integrity of their code.
- Neither Microchip nor any other semiconductor manufacturer can guarantee the security of their code. Code protection does not mean that we are guaranteeing the product as "unbreakable."

Code protection is constantly evolving. We at Microchip are committed to continuously improving the code protection features of our products. Attempts to break Microchip's code protection feature may be a violation of the Digital Millennium Copyright Act. If such acts allow unauthorized access to your software or other copyrighted work, you may have a right to sue for relief under that Act.

Information contained in this publication regarding device applications and the like is provided only for your convenience and may be superseded by updates. It is your responsibility to ensure that your application meets with your specifications. MICROCHIP MAKES NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES OF ANY KIND WHETHER EXPRESS OR IMPLIED, WRITTEN OR ORAL, STATUTORY OR OTHERWISE, RELATED TO THE INFORMATION, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ITS CONDITION, QUALITY, PERFORMANCE, MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR PURPOSE. Microchip disclaims all liability arising from this information and its use. Use of Microchip devices in life support and/or safety applications is entirely at the buyer's risk, and the buyer agrees to defend, indemnify and hold harmless Microchip from any and all damages, claims, suits, or expenses resulting from such use. No licenses are conveyed, implicitly or otherwise, under any Microchip intellectual property rights.

**QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
== ISO/TS 16949:2002 ==**



dsPIC30F2010

28-Pin dsPIC30F2010 Enhanced Flash 16-Bit Digital Signal Controller

Note: This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the "dsPIC30F Family Reference Manual" (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the "dsPIC30F/33F Programmer's Reference Manual" (DS70157).

High-Performance Modified RISC CPU:

- Modified Harvard architecture
- C compiler optimized instruction set architecture
- 83 base instructions with flexible addressing modes
- 24-bit wide instructions, 16-bit wide data path
- 12 Kbytes on-chip Flash program space
- 512 bytes on-chip data RAM
- 1 Kbyte nonvolatile data EEPROM
- 16 x 16-bit working register array
- Up to 30 MIPS operation:
 - DC to 40 MHz external clock input
 - 4 MHz-10 MHz oscillator input with PLL active (4x, 8x, 16x)
- 27 interrupt sources
- Three external interrupt sources
- 8 user-selectable priority levels for each interrupt
- 4 processor exceptions and software traps

DSP Engine Features:

- Modulo and Bit-Reversed modes
- Two 40-bit wide accumulators with optional saturation logic
- 17-bit x 17-bit single-cycle hardware fractional/integer multiplier
- Single-cycle Multiply-Accumulate (MAC) operation
- 40-stage Barrel Shifter
- Dual data fetch

Peripheral Features:

- High current sink/source I/O pins: 25 mA/25 mA
- Three 16-bit timers/counters; optionally pair up 16-bit timers into 32-bit timer modules
- Four 16-bit capture input functions
- Two 16-bit compare/PWM output functions
 - Dual Compare mode available
- 3-wire SPI modules (supports 4 Frame modes)
- I²C™ module supports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing
- Addressable UART modules with FIFO buffers

Motor Control PWM Module Features:

- 6 PWM output channels
 - Complementary or Independent Output modes
 - Edge and Center-Aligned modes
- 4 duty cycle generators
- Dedicated time base with 4 modes
- Programmable output polarity
- Dead-time control for Complementary mode
- Manual output control
- Trigger for synchronized A/D conversions

Quadrature Encoder Interface Module Features:

- Phase A, Phase B and Index Pulse input
- 16-bit up/down position counter
- Count direction status
- Position Measurement (x2 and x4) mode
- Programmable digital noise filters on inputs
- Alternate 16-bit Timer/Counter mode
- Interrupt on position counter rollover/underflow

Analog Features:

- 10-bit Analog-to-Digital Converter (ADC) with:
 - 1 Msps (for 10-bit A/D) conversion rate
 - Six input channels
 - Conversion available during Sleep and Idle
- Programmable Brown-out Reset

dsPIC30F2010

Special Digital Signal Controller Features:

- Enhanced Flash program memory:
 - 10,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 100K (typical)
- Data EEPROM memory:
 - 100,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 1M (typical)
- Self-reprogrammable under software control
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Flexible Watchdog Timer (WDT) with on-chip low-power RC oscillator for reliable operation
- Fail-Safe clock monitor operation

- Detects clock failure and switches to on-chip low-power RC oscillator
- Programmable code protection
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) programming capability
- Selectable Power Management modes
 - Sleep, Idle and Alternate Clock modes

CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash technology
- Wide operating voltage range (2.5V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low power consumption

dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family*

Device	Pins	Program Mem. Bytes/Instructions	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16-bit	Input Cap	Output Comp/Std PWM	Motor Control PWM	A/D 10-bit 1 Msps	Quad Enc	UART	SPI	I ² C™	CAN
dsPIC30F2010	28	12K/4K	512	1024	3	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F3010	28	24K/8K	1024	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F4012	28	48K/16K	2048	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	1
dsPIC30F3011	40/44	24K/8K	1024	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	-
dsPIC30F4011	40/44	48K/16K	2048	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	1
dsPIC30F5015	64	66K/22K	2048	1024	5	4	4	8 ch	16 ch	Yes	1	2	1	1
dsPIC30F6010	80	144K/48K	8192	4096	5	8	8	8 ch	16 ch	Yes	2	2	1	2
dsPIC30F6010A	80	144K/48K	8192	4096	5	8	8	8 ch	16 ch	Yes	2	2	1	2

* This table provides a summary of the dsPIC30F2010 peripheral features. Other available devices in the dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family are shown for feature comparison.

Pin Diagrams

28-Pin SDIP and SOIC

MCLR	1	28	AVDD
EMUD3/AN0/VREF+/CN2/RB0	2	27	AVSS
EMUC3/AN1/VREF-/CN3/RB1	3	26	PWM1L/RE0
AN2/SS1/LVDIN/CN4/RB2	4	25	PWM1H/RE1
AN3/INDX/CN5/RB3	5	24	PWM2L/RE2
AN4/QEA/IC7/CN6/RB4	6	23	PWM2H/RE3
AN5/QEB/IC8/CN7/RB5	7	22	PWM3L/RE4
VSS	8	21	PWM3H/RE5
OSC1/CLKI	9	20	VDD
OSC2/CLKO/RC15	10	19	VSS
EMUD1/SOSC1/T2CK/U1ATX/CN1/RC13	11	18	PGC/EMUC/U1RX/SDI1/SDA/RF2
EMUC1/SOSCO/T1CK/U1ARX/CN0/RC14	12	17	PGD/EMUD/U1TX/SDO1/SCL/RF3
VDD	13	16	FLTA/INT0/SCK1/OCFA/RE8
EMUD2/OC2/IC2/INT2/RD1	14	15	EMUC2/OC1/IC1/INT1/RD0

28-Pin QFN

EMUC3/AN1/VREF-/CN3/RB1	28	EMUC3/AN0/VREF+/CN2/RB0	27	MCLR	26	AVDD	25	PWM1L/RE0	24	PWM1H/RE1	23	22	
AN2/SS1/LVDIN/CN4/RB2	1	AN3/INDX/CN5/RB3	2	AN4/QEA/IC7/CN6/RB4	3	AN5/QEB/IC8/CN7/RB5	4	VSS	5	OSC1/CLKI	6	OSC2/CLKO/RC15	7
EMUD1/SOSC1/T2CK/U1ATX/CN1/RC13	8	EMUC1/SOSCO/T1CK/U1ARX/CN0/RC14	9	VDD	10	EMUD2/OC2/IC2/INT2/RD1	11	EMUC2/OC1/IC1/INT1/RD0	12	FLTA/INT0/SCK1/OCFA/RE8	13	PGD/EMUD/U1TX/SDO1/SCL/RF3	14
EMUC2/OC1/IC1/INT1/RD0	11	FLTA/INT0/SCK1/OCFA/RE8	13	PGD/EMUD/U1TX/SDO1/SCL/RF3	14	PGC/EMUC/U1RX/SDI1/SDA/RF2	15	VSS	16	VDD	17	PWM3L/RE4	18
PGC/EMUC/U1RX/SDI1/SDA/RF2	15	VSS	16	VDD	17	PWM3H/RE5	18	PWM2L/RE2	21	PWM2H/RE3	20	PWM3L/RE4	19

dsPIC30F2010

Table of Contents

1.0	Device Overview	5
2.0	CPU Architecture Overview	9
3.0	Memory Organization	19
4.0	Address Generator Units	31
5.0	Interrupts	37
6.0	Flash Program Memory	43
7.0	Data EEPROM Memory	49
8.0	I/O Ports	53
9.0	Timer1 Module	57
10.0	Timer2/3 Module	61
11.0	Input Capture Module	67
12.0	Output Compare Module	71
13.0	Quadrature Encoder Interface (QE1) Module	75
14.0	Motor Control PWM Module	81
15.0	SPI Module	91
16.0	I2C Module	95
17.0	Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) Module	103
18.0	10-bit High-Speed Analog-to-Digital Converter (ADC) Module	111
19.0	System Integration	123
20.0	Instruction Set Summary	137
21.0	Development Support	145
22.0	Electrical Characteristics	149
23.0	Packaging Information	187
	The Microchip Web Site	199
	Customer Change Notification Service	199
	Customer Support	199
	Reader Response	200
	Product Identification System	201

TO OUR VALUED CUSTOMERS

It is our intention to provide our valued customers with the best documentation possible to ensure successful use of your Microchip products. To this end, we will continue to improve our publications to better suit your needs. Our publications will be refined and enhanced as new volumes and updates are introduced.

If you have any questions or comments regarding this publication, please contact the Marketing Communications Department via E-mail at docerrors@microchip.com or fax the Reader Response Form in the back of this data sheet to (480) 792-4150. We welcome your feedback.

Most Current Data Sheet

To obtain the most up-to-date version of this data sheet, please register at our Worldwide Web site at:

<http://www.microchip.com>

You can determine the version of a data sheet by examining its literature number found on the bottom outside corner of any page. The last character of the literature number is the version number, (e.g., DS30000A is version A of document DS30000).

Errata

An errata sheet, describing minor operational differences from the data sheet and recommended workarounds, may exist for current devices. As device/documentation issues become known to us, we will publish an errata sheet. The errata will specify the revision of silicon and revision of document to which it applies.

To determine if an errata sheet exists for a particular device, please check with one of the following:

- Microchip's Worldwide Web site; <http://www.microchip.com>
- Your local Microchip sales office (see last page)

When contacting a sales office, please specify which device, revision of silicon and data sheet (include literature number) you are using.

Customer Notification System

Register on our web site at www.microchip.com to receive the most current information on all of our products.

1.0 DEVICE OVERVIEW

Note: This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the "dsPIC30F Family Reference Manual" (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the "dsPIC30F/33F Programmer's Reference Manual" (DS70157).

This document contains device specific information for the dsPIC30F2010 device. The dsPIC30F devices contain extensive Digital Signal Processor (DSP) functionality within a high-performance 16-bit microcontroller (MCU) architecture. Figure 1-1 shows a device block diagram for the dsPIC30F2010 device.



dsPIC30F2010

FIGURE 1-1: dsPIC30F2010 BLOCK DIAGRAM

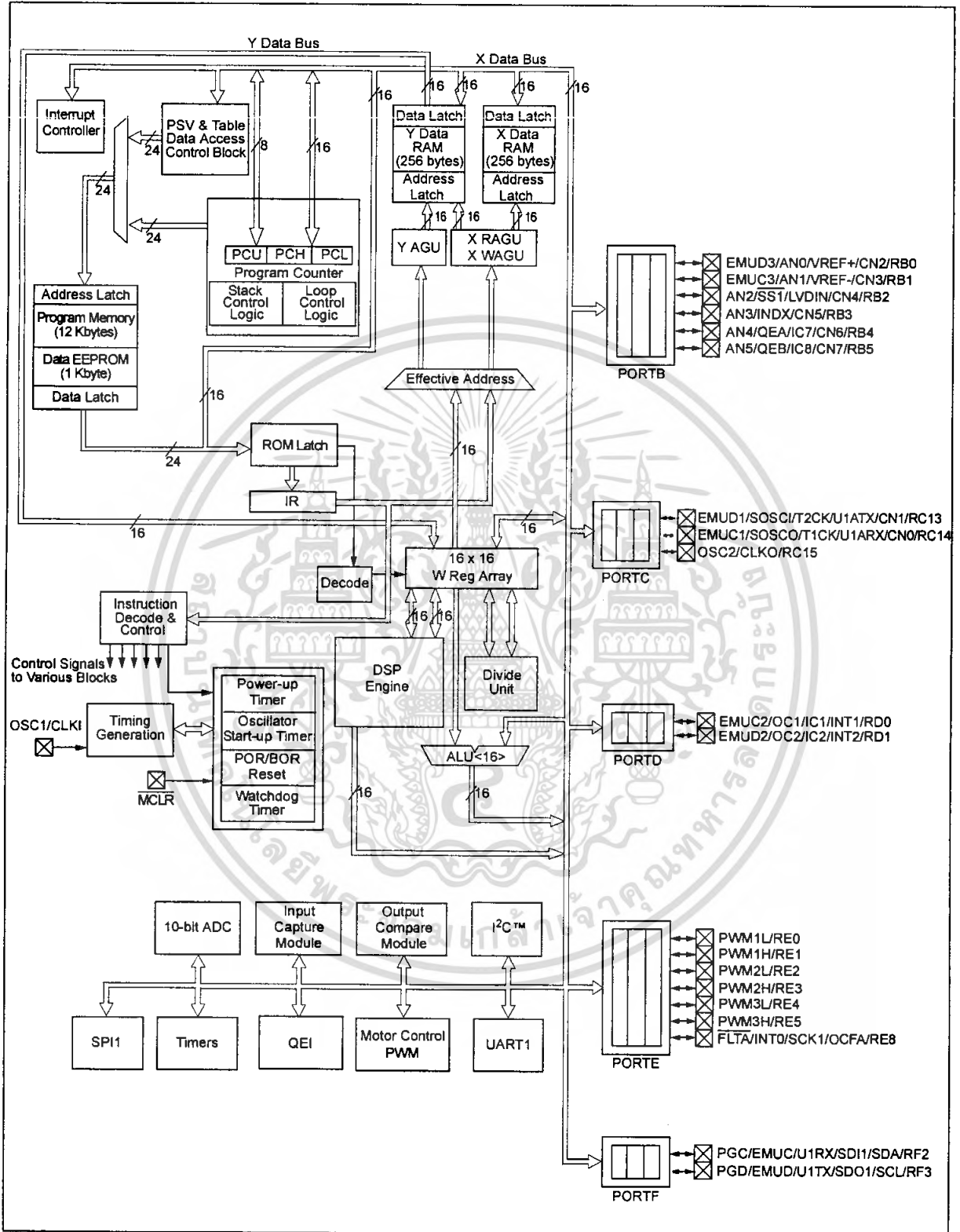


Table 1-1 provides a brief description of device I/O pinouts and the functions that may be multiplexed to a port pin. Multiple functions may exist on one port pin. When multiplexing occurs, the peripheral module's functional requirements may force an override of the data direction of the port pin.

TABLE 1-1: PINOUT I/O DESCRIPTIONS

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
AN0-AN5	I	Analog	Analog input channels.
AVDD	P	P	Positive supply for analog module.
AVSS	P	P	Ground reference for analog module.
CLKI	I	ST/CMOS	External clock source input. Always associated with OSC1 pin function.
CLKO	O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLKO in RC and EC modes. Always associated with OSC2 pin function.
CN0-CN7	I	ST	Input change notification inputs. Can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs.
EMUD	I/O	ST	ICD Primary Communication Channel data input/output pin.
EMUC	I/O	ST	ICD Primary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD1	I/O	ST	ICD Secondary Communication Channel data input/output pin.
EMUC1	I/O	ST	ICD Secondary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD2	I/O	ST	ICD Tertiary Communication Channel data input/output pin.
EMUC2	I/O	ST	ICD Tertiary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD3	I/O	ST	ICD Quaternary Communication Channel data input/output pin.
EMUC3	I/O	ST	ICD Quaternary Communication Channel clock input/output pin.
IC1, IC2, IC7, IC8	I	ST	Capture inputs. The dsPIC30F2010 has 4 capture inputs. The inputs are numbered for consistency with the inputs on larger device variants.
INDX	I	ST	Quadrature Encoder Index Pulse input.
QEA	I	ST	Quadrature Encoder Phase A input in QEI mode.
QEB	I	ST	Quadrature Encoder Phase A input in QEI mode. Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode.
INT0	I	ST	External interrupt 0
INT1	I	ST	External interrupt 1
INT2	I	ST	External interrupt 2
FLTA	I	ST	PWM Fault A input
PWM1L	O	—	PWM 1 Low output
PWM1H	O	—	PWM 1 High output
PWM2L	O	—	PWM 2 Low output
PWM2H	O	—	PWM 2 High output
PWM3L	O	—	PWM 3 Low output
PWM3H	O	—	PWM 3 High output
MCLR	I/P	ST	Master Clear (Reset) input or programming voltage input. This pin is an active-low Reset to the device.
OCFA	I	ST	Compare Fault A input (for Compare channels 1, 2, 3 and 4).
OC1-OC2	O	—	Compare outputs.
OSC1	I	ST/CMOS	Oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
OSC2	I/O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLKO in RC and EC modes.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog = Analog input
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O = Output
 I = Input P = Power

dsPIC30F2010

TABLE 1-1: PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
PGD	I/O	ST	In-Circuit Serial Programming™ data input/output pin.
PGC	I	ST	In-Circuit Serial Programming clock input pin.
RB0-RB5	I/O	ST	PORTB is a bidirectional I/O port.
RC13-RC14	I/O	ST	PORTC is a bidirectional I/O port.
RD0-RD1	I/O	ST	PORTD is a bidirectional I/O port.
RE0-RE5, RE8	I/O	ST	PORTE is a bidirectional I/O port.
RF2, RF3	I/O	ST	PORTF is a bidirectional I/O port.
SCK1	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for SPI #1.
SDI1	I	ST	SPI #1 Data In.
SDO1	O	—	SPI #1 Data Out.
SS1	I	ST	SPI #1 Slave Synchronization.
SCL	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for I ² C™.
SDA	I/O	ST	Synchronous serial data input/output for I ² C.
SOSCO	O	—	32 kHz low-power oscillator crystal output.
SOSCI	I	ST/CMOS	32 kHz low-power oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
T1CK	I	ST	Timer1 external clock input.
T2CK	I	ST	Timer2 external clock input.
U1RX	I	ST	UART1 Receive.
U1TX	O	—	UART1 Transmit.
U1ARX	I	ST	UART1 Alternate Receive.
U1ATX	O	—	UART1 Alternate Transmit.
VDD	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
VSS	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VREF+	I	Analog	Analog Voltage Reference (High) input.
VREF-	I	Analog	Analog Voltage Reference (Low) input.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog = Analog input
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O = Output
 I = Input P = Power

2.0 CPU ARCHITECTURE OVERVIEW

Note: This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the "dsPIC30F Family Reference Manual" (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the "dsPIC30F/33F Programmer's Reference Manual" (DS70157).

This document provides a summary of the dsPIC30F2010 CPU and peripheral function. For a complete description of this functionality, please refer to the "dsPIC30F Family Reference Manual" (DS70046).

2.1 Core Overview

The core has a 24-bit instruction word. The Program Counter (PC) is 23 bits wide with the Least Significant bit (LSb) always clear (see Section 3.1 "Program Address Space"), and the Most Significant bit (MSb) is ignored during normal program execution, except for certain specialized instructions. Thus, the PC can address up to 4M instruction words of user program space. An instruction prefetch mechanism is used to help maintain throughput. Program loop constructs, free from loop count management overhead, are supported using the DO and REPEAT instructions, both of which are interruptible at any point.

The working register array consists of 16x16-bit registers, each of which can act as data, address or offset registers. One working register (W15) operates as a software Stack Pointer for interrupts and calls.

The data space is 64 Kbytes (32K words) and is split into two blocks, referred to as X and Y data memory. Each block has its own independent Address Generation Unit (AGU). Most instructions operate solely through the X memory AGU, which provides the appearance of a single unified data space. The Multiply-Accumulate (MAC) class of dual source DSP instructions operate through both the X and Y AGUs, splitting the data address space into two parts (see Section 3.2 "Data Address Space"). The X and Y data space boundary is device specific and cannot be altered by the user. Each data word consists of 2 bytes, and most instructions can address data either as words or bytes.

There are two methods of accessing data stored in program memory:

- The upper 32 Kbytes of data space memory can be mapped into the lower half (user space) of program space at any 16K program word boundary, defined by the 8-bit Program Space Visibility Page (PSVPAG) register. This lets any instruction access program space as if it were data space, with a limitation that the access requires an additional cycle. Moreover, only the lower 16 bits of each instruction word can be accessed using this method.

- Linear indirect access of 32K word pages within program space is also possible using any working register, via table read and write instructions. Table read and write instructions can be used to access all 24 bits of an instruction word.

Overhead-free circular buffers (Modulo Addressing) are supported in both X and Y address spaces. This is primarily intended to remove the loop overhead for DSP algorithms.

The X AGU also supports Bit-Reversed Addressing on destination effective addresses, to greatly simplify input or output data reordering for radix-2 FFT algorithms. Refer to Section 4.0 "Address Generator Units" for details on Modulo and Bit-Reversed Addressing.

The core supports Inherent (no operand), Relative, Literal, Memory Direct, Register Direct, Register Indirect, Register Offset and Literal Offset Addressing modes. Instructions are associated with predefined Addressing modes, depending upon their functional requirements.

For most instructions, the core is capable of executing a data (or program data) memory read, a working register (data) read, a data memory write and a program (instruction) memory read per instruction cycle. As a result, 3-operand instructions are supported, allowing $C = A + B$ operations to be executed in a single cycle.

A DSP engine has been included to significantly enhance the core arithmetic capability and throughput. It features a high-speed 17-bit by 17-bit multiplier, a 40-bit ALU, two 40-bit saturating accumulators and a 40-bit bidirectional barrel shifter. Data in the accumulator or any working register can be shifted up to 15 bits right or 16 bits left in a single cycle. The DSP instructions operate seamlessly with all other instructions and have been designed for optimal real-time performance. The MAC class of instructions can concurrently fetch two data operands from memory, while multiplying two W registers. To enable this concurrent fetching of data operands, the data space has been split for these instructions and linear for all others. This has been achieved in a transparent and flexible manner, by dedicating certain working registers to each address space for the MAC class of instructions.

The core does not support a multi-stage instruction pipeline. However, a single stage instruction prefetch mechanism is used, which accesses and partially decodes instructions a cycle ahead of execution, in order to maximize available execution time. Most instructions execute in a single cycle, with certain exceptions.

The core features a vectored exception processing structure for traps and interrupts, with 62 independent vectors. The exceptions consist of up to 8 traps (of which 4 are reserved) and 54 interrupts. Each interrupt is prioritized based on a user-assigned priority between 1 and 7 (1 being the lowest priority and 7 being the highest) in conjunction with a predetermined 'natural order'. Traps have fixed priorities, ranging from 8 to 15.

dsPIC30F2010

2.2 Programmer's Model

The programmer's model is shown in Figure 2-1 and consists of 16x16-bit working registers (W0 through W15), 2x40-bit accumulators (ACCA and ACCB), STATUS Register (SR), Data Table Page register (TBLPAG), Program Space Visibility Page register (PSVPAG), DO and REPEAT registers (DOSTART, DOEND, DCOUNT and RCOUNT) and Program Counter (PC). The working registers can act as data, address or offset registers. All registers are memory mapped. W0 acts as the W register for file register addressing.

Some of these registers have a shadow register associated with each of them, as shown in Figure 2-1. The shadow register is used as a temporary holding register and can transfer its contents to or from its host register upon the occurrence of an event. None of the shadow registers are accessible directly. The following rules apply for transfer of registers into and out of shadows.

- PUSH.S and POP.S
W0, W1, W2, W3, SR (DC, N, OV, Z and C bits only) are transferred.
- DO instruction
DOSTART, DOEND, DCOUNT shadows are pushed on loop start, and popped on loop end.

When a byte operation is performed on a working register, only the Least Significant Byte of the target register is affected. However, a benefit of memory mapped working registers is that both the Least and Most Significant Bytes can be manipulated through byte wide data memory space accesses.

2.2.1 SOFTWARE STACK POINTER/ FRAME POINTER

The dsPIC® DSC devices contain a software stack. W15 is the dedicated software Stack Pointer (SP), and will be automatically modified by exception processing and subroutine calls and returns. However, W15 can be referenced by any instruction in the same manner as all other W registers. This simplifies the reading, writing and manipulation of the Stack Pointer (e.g., creating stack frames).

Note: In order to protect against misaligned stack accesses, W15<0> is always clear.

W15 is initialized to 0x0800 during a Reset. The user may reprogram the SP during initialization to any location within data space.

W14 has been dedicated as a Stack Frame Pointer as defined by the LNK and ULNK instructions. However, W14 can be referenced by any instruction in the same manner as all other W registers.

2.2.2 STATUS REGISTER

The dsPIC DSC core has a 16-bit STATUS Register (SR), the LSB of which is referred to as the SR Low Byte (SRL) and the MSB as the SR High Byte (SRH). See Figure 2-1 for SR layout.

SRL contains all the MCU ALU operation status flags (including the Z bit), as well as the CPU Interrupt Priority Level status bits, IPL<2:0>, and the REPEAT active status bit, RA. During exception processing, SRL is concatenated with the MSB of the PC to form a complete word value which is then stacked.

The upper byte of the STATUS register contains the DSP adder/subtractor status bits, the DO Loop Active bit (DA) and the Digit Carry (DC) status bit.

2.2.3 PROGRAM COUNTER

The Program Counter is 23 bits wide. Bit 0 is always clear. Therefore, the PC can address up to 4M instruction words.

FIGURE 2-1: PROGRAMMER'S MODEL

