

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รถไฟฟ้าพลังงานผสมผสานอัจฉริยะ

HYBRID ELECTRIC VEHICLE



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72935
วัน,เดือน,ปี..... 26 ส.ย. 2550

b. 11771915
i.

ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถไฟฟ้าพลังงานผสมผสานอัจฉริยะ
HYBRID ELECTRIC VEHICLE



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง รถไฟฟ้าพลังงานผสมผสานอัจฉริยะ

ผู้จัดทำ

- 
1. นายวรุดิ โปธิ์พรม
 2. นายวานิช นุชบาง
 3. นายนรต์วี ศรีสวัสดิ์พงษ์
 4. นายอาคม ชัยศิริรินทร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. วีระเชษฐุ์ ชั่นเงิน) อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถไฟฟ้าพลังงานผสมผสานอัจฉริยะ

นายวรุฒิ ไพฑ์พรม
 นายวานิช นุชบาง
 นายนรภัทร์ ศรีสวัสดิ์พงษ์
 นายอาคม ชัยศิริรินทร์
 รศ. ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

รถไฟฟ้าไฮบริดอัจฉริยะเป็นรถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 48 V, 5,000 W ทำการควบคุมความเร็วโดยใช้อินเวอร์เตอร์ สามารถวิ่งด้วยความเร็ว 50 กม./ชม. รถคันนี้ใช้พลังงานผสมผสานระหว่าง 2 พลังงาน คือ แบตเตอรี่ที่ใช้จำลองการทำงานแทนเซลล์เชื้อเพลิง และ เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) ในส่วนของการพัฒนารถในเบื้องต้นได้ทำการออกแบบ วงจรแปลงผันทบระดับ โดยมีวงจรควบคุมการป้อนกลับสามารถควบคุมกระแสและแรงดันและยังสามารถลดอัตราความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือแรงบิดในขณะสตาร์ทของมอเตอร์ เพื่อช่วยจำกัดไม่ให้เกิดการดึงกระแสจากแบตเตอรี่มากเกินไปได้และสามารถทำให้เกิดเสถียรภาพให้แก่ระบบของ เซลล์แสงอาทิตย์ ได้

ผลการวิจัยได้พิสูจน์ให้เห็นว่าสามารถจำกัดกระแสและแรงดันจากแบตเตอรี่และเซลล์แสงอาทิตย์ ไม่ให้มีค่าเกินพิกัดที่ตั้งไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

HYBIRD ELECTRIC VEHICLE

Worawut Poprom

Wanit Nootbang

Narat Srisawatpong

Arkhom Chaisiriniran

Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern Advisor

2006

ABSTRACT

The intelligent hybrid car in this thesis is driven by the motor, with 48 V, 5,000 W, which controls the speed up to 50 km/hr using inverter. This car is designed to combine of the energies; battery (will be replaced by fuel cell) and solar cell. The boost converter is included the feedback controller to control the voltage and current of the energy source for decreasing the damage from load charging at the beginning operation of motor. This technique can limit the current fed from battery can cause effect to the stability of the solar cell system.

The achievement of the energy hybrid is demonstrated at various operation conditions such as with high power from solar cell and additional battery which will be planned to replace by the fuel cell

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ทางคณะผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณ รศ. ร.อ. ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ซึ่งให้ความช่วยเหลือ และแนะแนวทางในการศึกษาว่า ตลอดจนการทำงาน และขอขอบคุณที่ ๑ ห้องปฏิบัติการความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Lab EMC) ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิจัยจนสำเร็จ ขอกราบขอบพระคุณภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสในการศึกษา และเรียนรู้การใช้ชีวิตในระดับอุดมศึกษา

และสุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่เป็นทุกสิ่งทุกอย่าง เป็นผู้ให้ที่ยิ่งใหญ่ ของคณะผู้จัดทำ ให้งานประสบความสำเร็จดังสมปรารถนา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของกำลังไฟฟ้า.....	4
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม(Series).....	5
2.3 การคำนวณหาพิกัดกำลังของมอเตอร์.....	6
2.4 การควบคุมความเร็วมอเตอร์.....	6
2.5 มอสเฟตกำลัง (Power Mosfet).....	7
2.5.1 การทำงานของมอสเฟตกำลัง.....	7
2.5.2 วงจรสมมูลของมอสเฟต.....	7
2.5.3 แรงดันสไปค.....	8
2.5.4 ข้อดีของการใช้มอสเฟต.....	9
2.5.5 การขนานมอสเฟต.....	10
2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell).....	10
2.6.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดัน Solar Cell.....	11
2.6.2 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น.....	13
2.6.3 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	15
2.6.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	15
2.6.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_L	16
2.6.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_J	16
2.6.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ (V_{oc}).....	17
2.7 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells).....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.1 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง.....	17
2.7.2 องค์ประกอบหลักของ Fuel Cell.....	18
2.7.3 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	19
2.8 (MPPT) Maximum Power Point Tracking	23
2.8.1 หลักการของ Maximum Power Point Tracking.....	23
2.8.2 ระบบ MPPT มีประสิทธิภาพสูง	23
2.8.3 เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าพร้อมด้วย MPPT.....	23
2.9 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter)	24
2.10 TL-494	27
2.11 ฟังก์ชันถ่ายโอนของ PWM	28
2.11.1 วงจรขยายความผิดพลาดที่มีการชดเชย.....	29
2.12 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ (Battery Charger).....	32
2.11.1 พารามิเตอร์ในการอัดประจุ.....	32
2.11.2 หลักการประจุไฟฟ้าของเครื่องประจุแบตเตอรี่	32
2.11.3 การอัดประจุของแบตเตอรี่.....	33
2.12.4 การอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรดโดยทั่วไป	37
2.13 ระบบหาพิกัดบนพื้นโลก GPS (Global Positioning System).....	37
2.13.1 ลักษณะการทำงานของระบบ GPS.....	37
2.14.2 ประโยชน์ส่วนหนึ่งของการใช้งาน GPS	38
2.14.3 อุปกรณ์ที่นำมาใช้งาน GPS.....	38
2.14.4 GIS ในงานการติดตามยานพาหนะ.....	38
สรุป	39
บทที่ 3 การออกแบบ.....	40
3.1 การออกแบบและการเลือกอุปกรณ์ที่ใช้กับชุด Voltage Current Control ..40	
3.1.1 สิ่งสำคัญที่จำเป็นในการออกแบบวงจรควบคุม I และ V.....	40
3.1.2 การทำงานของ RCD สนับเบอร์.....	41
3.2 การออกแบบ Voltage and Current Control ใช้บูสต์คอนเวอร์เตอร์	42
3.2.1 ตัวเหนี่ยวนำ (L)	47
3.2.2 ตัวเก็บประจุ (C)	49
สรุป	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	52
4.1 การทดสอบวงจร Voltage and Current Control กับโหลด R.....	53
4.1.1 ควบคุมแรงดันขาออกจากชุด Voltage and Current Control ให้คงที่ที่ 50 ถึง 51 V.....	53
4.1.2 ควบคุมกระแสขาเข้าจากชุด Voltage and Current Control ให้ไหลไม่เกิน 15 A.....	57
4.2 การทดสอบวงจร Voltage and Current Control กับรถไฟฟ้า	61
4.2.1 ทำการทดสอบกับ Solar cell ในการจ่ายพลังงานกับรถไฟฟ้า	61
4.2.2 ทำการทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ในการจ่ายพลังงาน ให้กับรถไฟฟ้า(ในการทดลองนี้ใช้แบตเตอรี่ 48Vแทนในการทดสอบ)	67
สรุปผลการทดลอง	70
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	71
5.1 บทสรุป	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
5.3 สิ่งที่ควรดำเนินการต่อ	72

VI
สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....4
2.2	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (Series)5
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วมอเตอร์และแรงบิดที่จ่าย ให้กับภาระทางกลของมอเตอร์กระแสตรงแบบต่างๆ.....6
2.4	การทำงานของมอสเฟต.....7
2.5	วงจรสมมูลย์ของมอสเฟต.....8
2.6	การป้องกันแรงดันสไปด์คร่อม เกต-ซอร์ส.....8
2.7	ก. การป้องกันแรงดันสไปด์คร่อม เทรน-ซอร์ส.....9 ข. ไม่ได้ต่อคาปาซิเตอร์.....9 ค. เมื่อต่อคาปาซิเตอร์และไดโอด.....9
2.8	การขนานมอสเฟต10
2.9	วงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น.....11
2.10	การผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์.....12
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่ไม่ได้รับแสงและได้รับแสง.....13
2.12	องค์ประกอบหลักของ Fuel Cell.....18
2.13	เมื่อส่งผ่านก๊าซไฮโดรเจน เข้ามา.....20
2.14	H ₂ จะถูกปล่อยไปทางด้านแอโนดโดยใช้ความดันจาก tank โดยชนแล้วเกิดการแตกตัว20
2.15	เมื่อก๊าซไปสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา ก็เกิดการแตกตัวออกเป็น โปรตอนและอิเล็กตรอน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้โปรตอนผ่านได้ แต่จะไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน21
2.16	โดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยังวงจรภายนอก ส่วนโปรตอนนั้น จะผ่านช่องของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนไปยังขั้วแคโทด ซึ่งจะไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่รับมาจากวงจรภายนอก21
2.17	อะตอมของออกซิเจนซึ่งแตกตัวโดยการเร่งของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นโมเลกุลของน้ำขึ้น.....22
2.18	โมเลกุลของน้ำ และจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ.....22

VII

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19	กำลังผลิตสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสง 1,000 วัตต์/ตารางเมตร แสดงโดยใช้ I-V curve24
2.20	วงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์24
2.21	กระแสของคาปาซิเตอร์.....27
2.22	แบบการทำงานของ TL-49428
2.23	กระบวนการ PWM จะมีค่าแรงดันต้านออกก็ต่อเมื่อแรงดัน V_c ที่ออกจากวงจรมอเตอร์ขยายความคลาดเคลื่อนที่ถูกชดเชย มีค่าสูงกว่าค่าของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม.....29
2.24	(ก) Type 2 วงจรมอเตอร์ขยายความผิดพลาดที่ได้ชดเชยแล้ว (ข) ผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรมอเตอร์30
2.25	ผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรมอเตอร์31
2.26	ทิศทางการไหลของกระแสประจุแบบคเตอร์33
2.27	การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันในการอัดประจุแบบกระแสคงที่.....34
2.28	ค่าแรงดัน และ กระแสของเครื่องอัดประจุแบบแรงดันคงที่35
2.29	กราฟกระแสและแรงดันเมื่อทำการชาร์จประจุแบบวิธีรวม36
2.30	ระบบจีพีเอสแบ่งออกเป็นสามส่วน 1. ส่วนอากาศ 2. ส่วนควบคุม และ 3. ส่วนผู้ใช้.....36
2.31	GIS ใช้ร่วมกับ GPS ในการติดตามรถประจำทาง และ รถจักรยาน38
3.1	กราฟหาความถี่41
3.2	รูปวงจร Boost Converter43
3.4	ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 4.23\mu H$ $C = 220\mu F$44
3.5	ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 60\mu H$ $C = 220\mu F$44
3.6	ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 123\mu H$ $C = 220\mu F$45
3.7	ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 123\mu H$ $C = 40\mu F$45
3.8	ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 123\mu H$ $C = 100\mu F$46
3.9	ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 123\mu H$ $C = 220\mu F$46
3.10	ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 123\mu H$ $C = 220\mu F$ $R = 1\Omega$46
3.11	ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 123\mu H$ $C = 220\mu F$ $R = 5\Omega$47
3.12	ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 123\mu H$ $C = 220\mu F$ $R = 10\Omega$47
3.13	รูปตัวเหนี่ยวนำที่ทำการพันเสร็จแล้ว48
3.14	ค่าที่วัดค่าความเหนี่ยวนำ $L = 123.63$ mH ที่ความถี่ $f = 40$ kHz48

VIII สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 วงจรในการผสมผสานพลังงานทั้ง3 แหล่งพลังงานเข้าด้วยกันในรถไฟฟ้า Hybrid Car	50
4.1 การทดสอบชุดวงจร Voltage and Current Control เบื้องต้นกับโหลด R	53
4.2 รูปสัญญาณพัลส์แสดงช่วง Duty ของโหลด R ที่ 20Ω	54
4.3 รูปสัญญาณพัลส์แสดงช่วง Duty ที่ขณะไม่มีโหลด.....	55
4.4 รูปสัญญาณพัลส์แสดงช่วง Duty ที่ขณะมีโหลด R = 10.4Ω	55
4.5 รูปสัญญาณพัลส์แสดงช่วง Duty ที่ขณะไม่มีโหลด.....	56
4.6 รูปสัญญาณพัลส์แสดงช่วง Duty ที่ขณะมีโหลด R = 6Ω	56
4.7 การทดสอบชุดวงจร Voltage and Current Control เบื้องต้นกับโหลด R	57
4.8 รูปสัญญาณพัลส์แสดงช่วง Duty ที่ขณะไม่มีโหลด.....	58
4.9 รูปสัญญาณพัลส์แสดงช่วง Duty ที่ขณะมีโหลด R = 8.2Ω	58
4.10 รูปสัญญาณพัลส์แสดงช่วง Duty ที่ขณะไม่มีโหลด	59
4.11 รูปสัญญาณพัลส์แสดง ช่วง Duty ที่ขณะมีโหลด R = 8.2Ω	59
4.12 รูปสัญญาณพัลส์แสดงช่วง Duty ที่ขณะไม่มีโหลด.....	60
4.13 รูปสัญญาณพัลส์แสดงช่วง Duty ที่ขณะมีโหลด R = 8.2Ω	60
4.14 การต่อวงจรเพื่อทดสอบกับการจ่ายพลังงานจาก Solar cell โดยตรงจ่ายเข้าขณะรถวิ่งขับโหลด	61
4.15 การต่อวงจรเพื่อทดสอบการจ่ายพลังงานจาก Solar cell โดยมีการต่อชุด Voltage and Current Control	63
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสเทียบกับความเร็ว ก่อนผ่านชุด Voltage and Current Control โดยแหล่งจ่ายเป็น Solar cell	65
4.17 กราฟระหว่างแรงดันและกระแสเทียบกับความเร็ว เมื่อผ่านชุด Voltage and Current Control โดยแหล่งจ่ายเป็น Solar cell.....	65
4.18 รูปสัญญาณพัลส์ขณะรถหยุดนิ่ง	66
4.19 รูปพัลส์ขณะรถเริ่มออกตัว	66
4.20 รูปพัลส์ขณะรถเริ่มมีความเร็วคงที่.....	66
4.21 การต่อวงจรเพื่อทดสอบการจ่ายพลังงานจาก Fuel cell โดยมีการต่อชุด Voltage and Current Control	67
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสเทียบกับความเร็ว ก่อนผ่านชุด Voltage and Current Control โดยแหล่งจ่ายเป็น Battery.....	69

IX

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสเทียบกับความเร็ว เมื่อผ่านชุดVoltage and Current Control โดยแหล่งจ่ายเป็น Battery	69
4.24 รูปสัญญาณพัลส์ขณะรถหยุดนิ่ง	70
4.25 รูปพัลส์ขณะรถเริ่มออกตัว	70
4.26 รูปพัลส์ขณะรถเริ่มมีความเร็วคงที่	70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พิกัดและชนิดของตัวเก็บประจุที่ใช้โดยทั่วไป	49
4.1 ทดสอบเบื้องต้นกับโหลด R	52
4.2 ทดสอบกับโหลดที่เป็นรถไฟฟ้าโดยทดสอบขณะรถวิ่ง	52
4.3 ควบคุมแรงดัน Output ให้ได้ 52 V โดยมีแรงดัน Input คงที่ ที่ 12 V	54
4.4 ควบคุมแรงดัน Output ให้ได้ 52 V โดยมีแรงดัน Input คงที่ ที่ 24 V	55
4.5 ควบคุมแรงดัน Output ให้ได้ 52 V โดยมีแรงดัน Input คงที่ ที่ 36 V	56
4.6 ควบคุมแรงดัน Output ให้ได้ 52 V ให้กระแสไหลไม่เกิน 15 A โดยมีแรงดัน Input คงที่ ที่ 24 V	58
4.7 ควบคุมแรงดัน Output ให้ได้ 52 V ให้กระแสไหลไม่เกิน 15 A โดยมีแรงดัน Input คงที่ ที่ 36V	59
4.8 ควบคุมแรงดัน Output ให้ได้ 52 V ให้กระแสไหลไม่เกิน 15 A โดยมีแรงดัน Input คงที่ ที่ 48 V	60
4.9 การทำการทดสอบโดยการจ่าย Solar cell โดยตรงจ่ายเข้าขณะ รถวิ่งขับโหลดเต็มพิกัด โดยอัตราเร่งเต็มที่ตั้งแต่เริ่มวิ่งจนถึง ความเร็วสูงสุดที่รถทำได้	62
4.10 การทำการทดสอบโดยการจ่าย Solar cell โดยต่อผ่านชุด Boost converter Voltage and Current Control โดยจ่ายเข้าขณะรถวิ่งขับโหลดเต็มพิกัด โดยอัตราเร่งเต็มที่ตั้งแต่เริ่มวิ่งจนถึงความเร็วสูงสุดที่รถทำได้	64
4.11 การทำการทดสอบโดยการจ่าย Fuel cell โดยต่อผ่านชุด Boost converter Voltage and Current Control และจ่ายเข้าขณะรถวิ่งขับโหลดเต็มพิกัด โดยอัตราเร่งเต็มที่ตั้งแต่เริ่มวิ่งจนถึงความเร็วสูงสุดที่รถทำได้	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ความต้องการในการใช้ยานพาหนะในการเดินทางในปัจจุบันมีเพิ่มมากขึ้น ยานพาหนะส่วนใหญ่จะใช้พลังงานน้ำมันในการขับเคลื่อน และเป็นต้นกำลังในการทำงานของระบบต่างๆ ภายในยานพาหนะ น้ำมันจึงมีความสำคัญมากกับยานพาหนะทุกประเภทแต่ในปัจจุบันเมื่อมีการใช้ยานพาหนะเพิ่มมากขึ้นทุกวันแต่น้ำมันไม่มีความสามารถในการเพิ่มจำนวนได้เพราะว่าน้ำมันต้องใช้ระยะเวลาในการหมักของซากพืชซากสัตว์แล้วจะกลายเป็นน้ำมันเหมือนทุกวันนี้ใช้เวลานานเป็นล้านๆปี ในปัจจุบันจึงมีการเล็งเห็นปัญหว่าน้ำมันกำลังจะหมดไปภายในอีกไม่กี่สิบปีข้างหน้า ผู้ผลิตน้ำมันรายใหญ่ของโลกจึงได้ทำการลดกำลังการผลิตน้ำมันเพื่อเป็นการต่ออายุให้กับน้ำมันหลายๆ ประเทศโดยเฉพาะประเทศที่กำลังพัฒนาอย่างประเทศไทยจึงได้ประสบปัญหาเกี่ยวกับราคาน้ำมันที่มีความรุนแรงมากขึ้น หลายประเทศจึงได้มีการออกมาตรการมาหลายอย่างแต่อย่างไรก็เป็นมาตรการที่ออกมาต่าง ๆ เหล่านั้นเป็นการแก้ปัญหาได้ในระยะสั้นๆเท่านั้น ไม่สามารถที่จะแก้ปัญหาในระยะยาวได้

เราจึงคิดที่จะสร้างและใช้พลังงานทดแทนให้มากขึ้น โดยใช้การผสมผสานพลังงานจาก 3 แหล่งจ่ายเพื่อทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้การรถไฟฟ้า ซึ่งถือได้ว่าเป็นรถยนต์แบบในการผสมผสานแหล่งจ่าย พลังงานที่ใช้ในการผสมผสานระหว่าง 3 พลังงาน คือ การใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้มาจากแผงโซลาร์เซลล์ การใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้มาจากแบตเตอรี่และพลังงานที่ได้มาจากเซลล์เชื้อเพลิง โดยเซลล์เชื้อเพลิงนี้จะเป็พลังงานที่ใช้ไฮโดรเจนในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานใหม่ที่สำคัญในอนาคต ซึ่งในการผสมผสานระหว่าง 3 พลังงานนี้เป็นการผสมผสานเป็นครั้งแรกของประเทศไทย เพื่อให้เป็นแนวทางในการออกแบบรถยนต์รุ่นใหม่ ๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนารถยนต์ในอนาคตที่คาดว่าจะมีการปฏิวัติวงการเรื่องพลังงานน้ำมันอันเนื่องมาจากราคาน้ำมันที่มีแนวโน้มว่าจะมีราคาแพงมากขึ้นเรื่อยๆ
2. เพื่อเป็นการลดใช้พลังงานน้ำมันซึ่งประเทศไทยไม่สามารถผลิตได้เอง และได้นำเข้ามาเป็นจำนวนหลายล้านบาทแล้ว ต่อปีทำให้ประเทศไทยต้องเสียดุลการค้าทางด้านนี้มาเป็นเวลานานแล้ว
3. เพื่อเป็นยานพาหนะที่เป็นต้นแบบในการอนุรักษ์ธรรมชาติ ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม เพราะไม่มีการเผาไหม้ทำให้เกิดก๊าซ (Carbon dioxide) ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศที่ทาสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน

4. เพื่อเป็นการรณรงค์ยานพาหนะที่ไม่มีเสียงรบกวน ที่ทำให้เกิดการรบกวนบุคคลรอบข้าง
5. เป็นรถยนต์ต้นแบบคันแรกที่ใช้ 3 พลังงานมาผสมผสานกันได้แบบลงตัวคือพลังงานที่ได้มาจาก Solar cell, Battery และ Hydrogen และมีการออกแบบให้ใช้พลังงานในแต่ละส่วนได้อย่างคุ้มค่าที่สุดที่สุด

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. ศึกษาและวิจัยการทำงานของ Voltage and Current Control ที่ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้มาจาก Solar cell มีค่ามากที่สุดเพื่อนำไปชาร์จแบตเตอรี่ และนำไปจ่ายพลังงานให้กับโหลด
2. ศึกษาและวิจัยการจ่ายโหลดจาก 3 พลังงานให้มีค่าสูงสุดในขณะแต่ละช่วงเวลาและในสภาวะแวดล้อมต่างๆ
3. ศึกษาและวิจัยการทำงานของ DC-DC Converter (PWM) เพื่อใช้ในการควบคุมแรงดันและกระแสที่ได้มาจาก Solar cell และ Fuel cell ก่อนที่จะนำไปชาร์จเข้าแบตเตอรี่
4. ศึกษาวิจัยพลังงาน Fuel cell ที่เป็นพลังงานใหม่
5. ศึกษาและวิจัยการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า ชนิด DC Motor

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาการทำงานและคุณลักษณะของ Buck – Boost Converter ในการเพิ่มหรือลดแรงดันเพื่อนำไปจ่ายโหลดให้มีประสิทธิภาพ
2. ศึกษาการทำงานของ DC Motor ไฟฟ้ากระแสตรง
3. ศึกษาโครงสร้างและการทำงานแบบสวิตชิงของมอเตอร์เฟดกำลังแบบต่างๆและการทำงานของมอเตอร์เฟสในสภาวะต่างๆ
4. ศึกษาการทำงานของ Voltage and Current Control ที่มี Input Voltage น้อยกว่า Output Voltage โดยมีการควบคุมแรงดันด้าน Output เพื่อให้มีกำลังในด้าน Input มากกว่ากำลังด้านโดยใช้ประสิทธิภาพของ แผงโซลาร์เซลล์ได้แบบเต็มที่
5. ศึกษาการทำงานของ Fuel cell ว่ามีหลักการการทำงานอย่างไรและสามารถสร้างพลังงานในรูปแบบไหนได้บ้าง
6. ออกแบบวงจร Boost Converter เพื่อนำค่าที่ได้จาก Solar cell ไฟชาร์จให้กับแบตเตอรี่และจ่ายให้กับโหลด
7. ออกแบบวงจร Voltage and Current Control เพื่อให้ได้ค่าสูงสุดนำไปชาร์จแบตเตอรี่

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. มีความรู้ความเข้าใจในระบบของ Fuel Cell ว่าทำงานอย่างไรและมีการนำพลังงานในการ Hydrogen ว่ามีส่วนในการขับเคลื่อนพลังงานอย่างไร
2. มีความรู้ความเข้าใจในหลักการการทำงานของ Voltage and Current Control แล้วนำมาประยุกต์ใช้กับงานอื่นได้
3. มีความรู้ความเข้าใจหลักการการทำงานของ DC-DC Converter แบบ Boost Converter
4. มีความรู้ความเข้าใจในการทำ DC-DC Converter ทั้งแบบ OPEN LOOP และ CLOSE LOOP สามารถบอกถึงความแตกต่างของ OPEN LOOP และ CLOSE LOOP
5. สามารถทำการ simulation เพื่อทำการออกแบบวงจรและดูการทำงานได้
6. สามารถนำผลที่ได้จากการวิจัยไปใช้ได้จริงและเป็นทรัพย์สินของ สจล. ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของกำลังไฟฟ้า

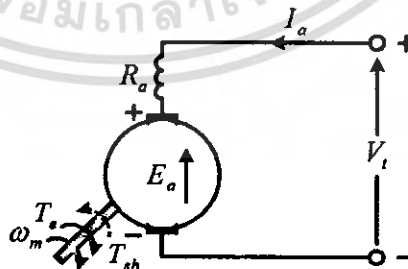
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ สเตเตอร์ (Stator) ประกอบด้วย ขั้วแม่เหล็กและแปรงถ่าน โดยสเตเตอร์จะเป็นตัวกำหนดแนวทางของสนามแม่เหล็กให้อยู่ภายในเครื่องจักรจากขั้วแม่เหล็กหนึ่งไปยังขั้วแม่เหล็กหนึ่ง ขั้วแม่เหล็ก (field Poles) เป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กที่ได้มาจากการกระตุ้นขดลวดสนาม โรเตอร์ (Rotor) หรืออาร์เมเจอร์จะประกอบด้วยวงแหวนแยก (Split-ring) โดยขดลวดอาร์เมเจอร์จะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้า-กล ส่วนวงแหวนแยกและแปรงถ่านจะทำหน้าที่กำหนดทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านตัวนำเพื่อให้เกิดแรงกระทำกับขดลวดตัวนำในทิศทางที่เกิดการหมุนอย่างต่อเนื่อง ส่วนวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังรูปที่ 2.1

ข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1. มีแรงบิดขนาดสตาร์ทสูงมากจึงเหมาะกับงานยกของหรืองานประเภทขับเคลื่อน
2. ควบคุมง่ายกว่าและนุ่มนวลกว่ามอเตอร์กระแสสลับที่ทำงานในแบบเดียวกัน
3. ช่วงความเร็วควบคุมได้กว้าง สามารถเพิ่มความเร็วให้สูงหรือต่ำกว่าปกติได้

ข้อเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

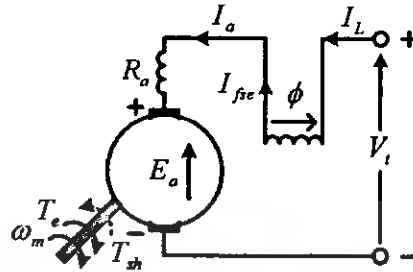
1. มีวิธีการสตาร์ทที่ยุ่งยากกว่ามอเตอร์กระแสสลับในมอเตอร์ขนาดใหญ่
2. ต้องจัดหาแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงไว้ใช้งาน
3. ค่าบำรุงการรักษามากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเนื่องจากการสึกหรอของคอมมิวเตเตอร์ที่เกิดจากอาร์ค การขัดสีของแปรงถ่าน
4. มีราคาแพงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน



รูปที่ 2.1 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (Series)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมเหมาะสำหรับงานที่ต้องค่าแรงบิดสูงๆที่ความเร็วรอบต่ำ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (Series)

สมการที่ใช้สำหรับอธิบายมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมสามารถแสดงได้ดังนี้

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

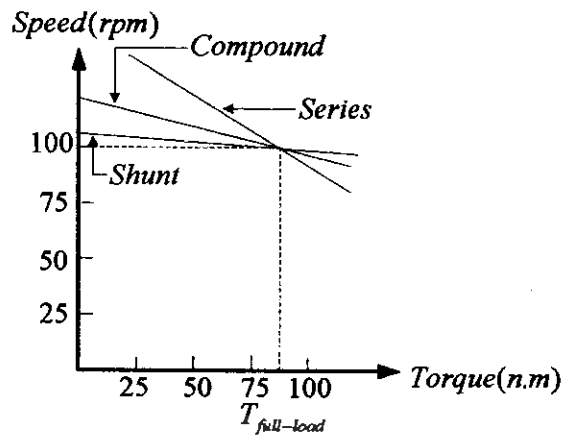
$$I_L = I_{fse} = I_a \quad (2.2)$$

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

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

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

จากสมการจะเห็นว่าค่า ϕ จะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่จ่ายให้กับภาระไฟฟ้า $I_L = I_a$ เมื่อมอเตอร์จ่ายภาระทางกลเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสอาร์เมเจอร์ต้องเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลทำให้สนามแม่เหล็กจากขดลวดสนามแบบอนุกรมมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (สมการที่ 2.1) ทำให้ได้แรงบิดที่สูงขึ้นจากทั้ง I_a และ ϕ (สมการที่ 2.4) เมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตามภาระทางกล ความเร็วมอเตอร์จะต้องลดลงค่อนข้างมากเพื่อที่จะรักษาสถิตระหว่างค่า V_t และ E_a จะเห็นว่าความเร็วมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อภาระทางกลเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วมอเตอร์และแรงบิดที่จ่ายให้กับภาระทางกลของมอเตอร์กระแสตรงแบบต่างๆ

2.3 การคำนวณหาพิคกำลังของมอเตอร์

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณหาขนาดพิคกำลังของมอเตอร์ เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมีดังนี้

W = น้ำหนักของรถ(kg)

V = อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็ว(m/s)

μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างยางกับถนน(ton/Kg)

η_m = ประสิทธิภาพของมอเตอร์

η = ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง

P_m = ค่าขนาดกำลังของมอเตอร์(KW)

เมื่อทราบค่าตัวแปรทั้งหมดแล้วสามารถหาได้จากสมการ

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

2.4 การควบคุมความเร็วมอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมมีวิธีการควบคุมความเร็วได้ 3 วิธีดังนี้

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

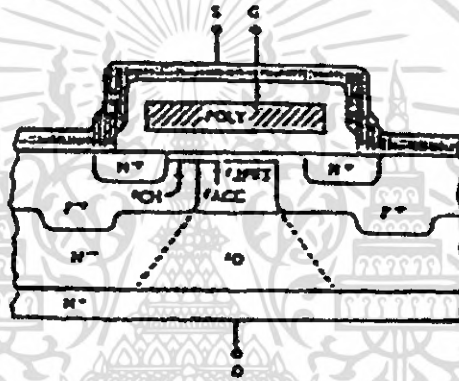
โดยวิธีที่ใช้ในโรงงานนี้จะเป็นการควบคุมความเร็วโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า V , โดยการใช้วงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์

2.5 มอสเฟตกำลัง (Power mosfet)

ส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบบีตคอนเวอร์เตอร์ ก็คือ สวิตช์ในวงจรงานนี้จะใช้มอสเฟตทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ดังนั้นจะต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษในการที่จะนำมอสเฟตมาใช้งานในลักษณะนี้

2.5.1 การทำงานของมอสเฟตกำลัง

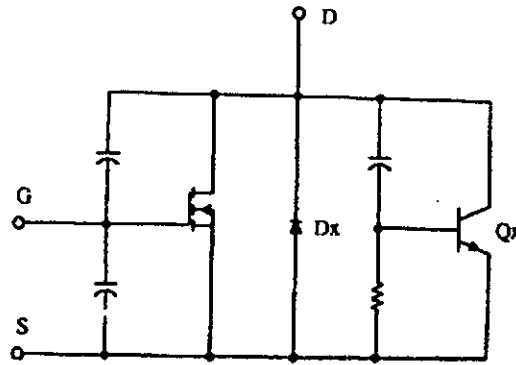
เมื่อป้อนแรงดันให้มอสเฟตที่มีขนาดและแรงดันที่เหมาะสม Polysilicon Gate จะเหนี่ยวนำชั้นตรงกันข้ามของ Diffuse channel region ซึ่งแสดงโดย r_{ch} ในรูปที่ 2.4 จะทำให้กระแสไหลจากเดรนไปยังซอร์สสำหรับแรงดันค่าน้อยๆ ที่ป้อนให้เดรนและซอร์ส กระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น เมื่อแรงดันเดรนเพิ่มขึ้น กระแสเดรนจะอิ่มตัวเป็นสัดส่วนกำลังสองของแรงดันเกตกับซอร์ส



รูปที่ 2.4 แสดงการทำงานของมอสเฟต

2.5.2 วงจรสมมูลของมอสเฟต

จากโครงสร้างของมอสเฟตสามารถสร้างเป็นวงจรสมมูลซึ่งประกอบไปด้วย ไดโอด (D_x), ค่าความจุ, ค่าความต้านทาน (ซึ่งมีค่าน้อยมาก) และทรานซิสเตอร์ชนิด NPN (Q_x) ดังรูปที่ 2.5 การพิจารณาวงจรสมมูลนี้มีความสำคัญมากในการใช้งานมอสเฟตควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบ PWM เพราะในขณะที่มอสเฟตกำลังหยุดนำกระแสไฟฟ้าค่าแรงดันระหว่างเดรนกับซอร์สจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (dv/dt มีค่าสูง) กระแสส่วนหนึ่งจะไหลผ่านค่าความจุที่ต่ออยู่ระหว่างคอลเล็กเตอร์และเบสของทรานซิสเตอร์ Q_x ค่ากระแสนี้ ($i_c = c dv/dt$) จะทำให้เกิดแรงดันที่ความต้านทานของเบสและอิมิตเตอร์ของ Q_x ซึ่งแรงดันนี้อาจทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นได้ จุดนี้ต้องได้รับการป้องกันไม่ให้แรงดันระหว่างเดรนและซอร์สเพิ่มขึ้นสูงเกินกว่าพิกัดแรงดันของมอสเฟต

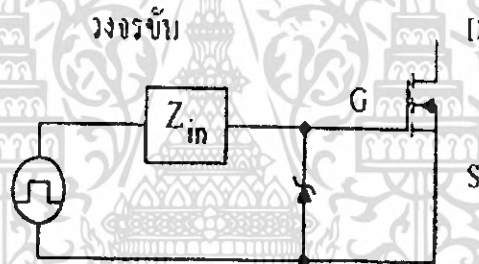


รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของมอสเฟต

2.5.3 แรงดันสไปต์

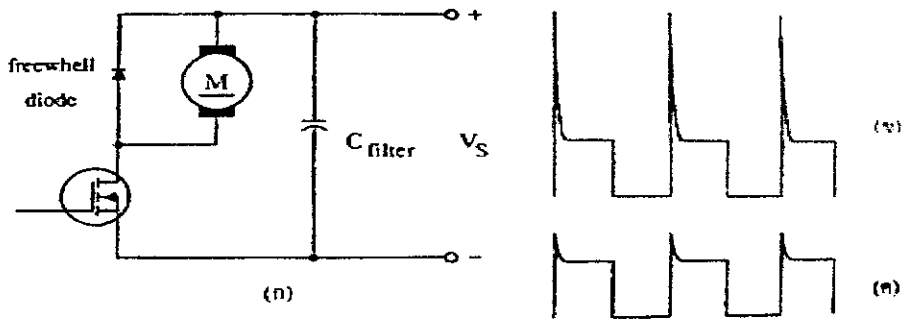
แรงดันสไปต์ (Spike Voltage) ที่เกิดขึ้นส่วนมากจะเกิดมาจากการควายพลังงานของค่าความเหนียวหน้าที่แฝงอยู่ในระบบแรงดันสไปต์ที่ทำให้มอสเฟตเสียหายอย่างถาวร คือ แรงดันสไปต์คร่อมเกต-ซอร์ส และแรงดันสไปต์คร่อมเดรน-ซอร์ส

แรงดันสไปต์ เกต-ซอร์ส สามารถป้องกันได้โดยใช้ซีเนอร์ไดโอดมาต่อคร่อมเกตซอร์ส ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การป้องกันแรงดันสไปต์คร่อมเกต-ซอร์ส

แรงดันสไปต์คร่อมเกต-ซอร์ส เป็นส่วนที่รุนแรงที่สุด เพราะโพลดเป็นมอดูร์ นั้นคือเป็นพวกค่าความเหนียวนำในเวลาที่มีมอสเฟสตัดต่อทำงานจากต่อมาเป็นตัด ทำให้แรงดันตกคร่อมขั้วของมอสเฟตเพิ่มจากศูนย์ (หรือเกือบศูนย์) ไปเป็นแรงดันระดับไฟเลี้ยงในทันที (จากรูป 2.7 ก) แม้ว่าแรงดันไฟเลี้ยงจะมีค่าต่ำกว่าอัตราทนแรงดันมอสเฟตก็ตาม แต่ด้วยแรงดันที่เกิดจากการเหนียวนำของขดลวดทำให้แรงดันตกคร่อมมอสเฟตสูงขึ้นอย่างมากเป็นแรงดันสไปต์ ถ้ามอสเฟตทำงานตัดต่อเร็วเท่าใด แรงดันนี้ก็ยิ่งสูงขึ้นเท่านั้นวิธีแก้ปัญหานี้โดยทั่วไปจะใช้ฟิรวิลไดโอด (Freewheel diode) ต่อคร่อมโพลด และไดโอดนี้จะต้องมีคุณสมบัติของการรีฟเวอร์รี่ (Recovery) ที่ดีพอ นั่นคือเป็นไดโอดประเภทฟาสต์รีฟเวอร์รี่ (Fast recovery) แต่การใช้ไดโอดอาจแก้แรงดันส่วนนี้ได้ไม่ดีพอ จึงต้องมีคาปาซิเตอร์ (Capacitor) ต่อคร่อม แหล่งจ่ายไฟอีกส่วนหนึ่ง



รูปที่ 2.7 ก. การป้องกันแรงดันสไปต์คร่อม เทรน-ชอร์ส
 ข. ไม่ได้ต่อคาปาซิเตอร์
 ค. เมื่อต่อคาปาซิเตอร์และไดโอด

2.5.4 ข้อดีของการใช้มอสเฟต

1. ความเร็ว

มอสเฟตมีความสามารถในการสวิตช์ซึ่งด้วยความเร็วโดยปราศจากการสะสมประจุอย่างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ดังนั้นจึงไม่คิดช่วงเวลาสะสมจึงทำให้มอสเฟตมีความเร็วกว่าทรานซิสเตอร์ในการสวิตช์ซึ่งความเร็วของมอสเฟตขึ้นอยู่กับการอัดและคายประจุของตัวเก็บประจุภายใน

2. อินพุต

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

3. ย่านความปลอดภัย

ของเขตย่านปลอดภัยของมอสเฟตได้ถูกกำหนดด้วยพิกัดกระแสสูงสุดแรงดันเบรกดาวน์ ขอบเขตของย่านความปลอดภัยจะกว้างเนื่องจากไม่เกิดการเบรกดาวน์ทางด้าน (Breakdown Secondary) ซึ่งบางทีอาจจะไม่จำเป็นต้องใช้วงจรสับเบอร์ก็ได้

4. อุณหภูมิ

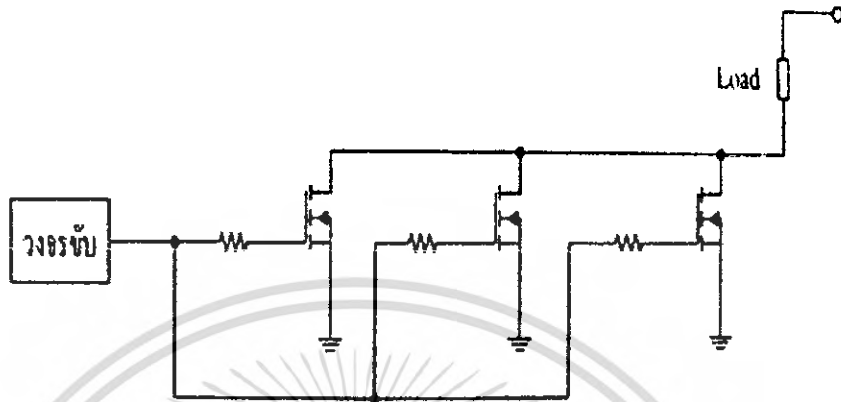
สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของมอสเฟตมีค่าตรงข้ามกับทรานซิสเตอร์ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิ ในตัวมอสเฟตสูงขึ้นกระแสทรานจะมิต่ำน้อยลง ดังนั้นการทำงานของมอสเฟตจึงไม่มีเหตุเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มหนีของอุณหภูมิ

5. แรงดัน

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

2.5.5 การขนานมอสเฟต

เนื่องจากสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทานระหว่าง เกรน-ซอร์ส $R_{gs(on)}$ มีค่าเป็นบวก นั่นคือค่าความต้านทาน $R_{gs(on)}$ จะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ตัวมันมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตที่ต่อขนานกัน จึงมีปริมาณใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิเดียวกัน

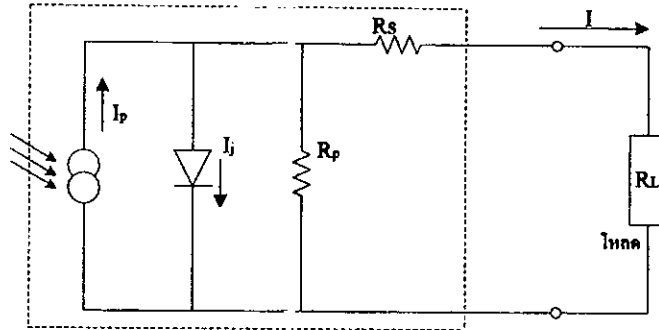


รูปที่ 2.8 การขนานมอสเฟต

นั่นคือ ต้องติดตั้งไว้บนแผ่นระบายความร้อนเดียวกับแต่การต่อขนานมอสเฟตในการทำงานช่วงแรกอาจจะ on และ off ไม่พร้อมกันทำให้มอสเฟตตัวที่อ่อนกว่าอาจรับกระแสมากกว่าพิกัดของตัวมันเอง ดังนั้นต้องมีวงจรป้องกันกระแสเกิน (Over Current Protection) ดังที่จะได้กล่าวถึงในส่วนต่อไป

2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)

“เซลล์แสงอาทิตย์” เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน ซึ่งมีราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลก นำมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ และในทันทีที่มีแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบ ที่เรียกว่า Photon จะถ่ายเทพลังงานให้กับ Electron ในสารกึ่งตัวนำ จนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของ Atom และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่อ Electron มีการเคลื่อนที่ครบวงจร ก็จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

โดยที่

- I_p คือ กระแสเนื่องจากแสง
- I_j คือ กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ pn ขณะไม่มีแสง
- I คือ กระแสรวมที่ไหลผ่านโหลดในวงจร
- R_L คือ โหลด
- R_s คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์
- R_p คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

2.6.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ รอยต่อพี-เอ็น

(1) ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมาก และกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอกโปแนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ และจากกราฟแสดงให้เห็นคุณลักษณะในการเรกติไฟร์ของรอยต่อพี-เอ็น ดังนี้

กรณีที่รอยต่อไม่ได้รับแสง (dark)
$$I = I_0 (e^{qVA/KT} - 1)$$

(2) ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง (illumination)

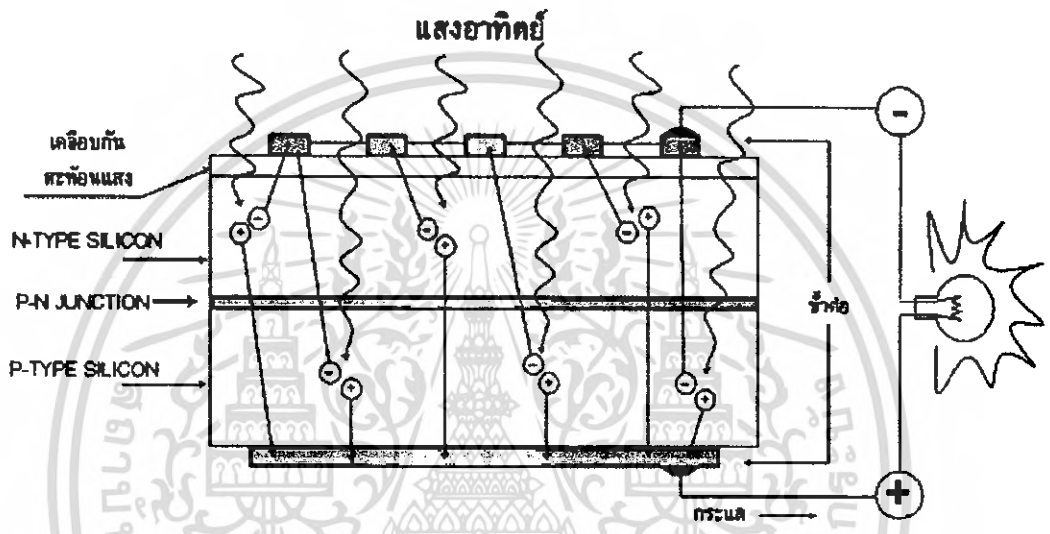
ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับแสง จะพิจารณาว่าในลำแสงประกอบด้วยกลุ่มของโฟตอน (Photon) ซึ่งมีพลังงานแสดงดังสมการด้านล่างนี้

$$E_{\text{Photon}} = h\nu \tag{2.7}$$

โดย

- E_{Photon} คือ พลังงานของโฟตอน
- h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ = 6.624×10^{-34} joule-sec
- ν คือ ค่าความถี่ของคลื่นแสง

เมื่อแสงตกกระทบบนรอยต่อพีเอ็นซึ่งเป็นเนื้อของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ซึ่งอยู่ในแถบวาเลนซ์สามารถออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) อยู่ในแถบความนำ (Conduction band) ได้ และทั้งให้เกิดโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกไว้ที่แถบวาเลนซ์ ประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล อิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้เป็นผลมาจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง อิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อหรือใกล้ ๆ กับรอยต่อ จะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำแพงศักย์ภายใน ทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสในขณะที่รอยต่อได้รับไบอัสตรง



รูปที่ 2.10 แสดงการผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์

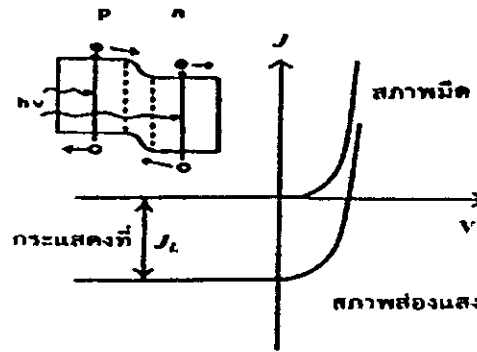
⊖ อิเล็กตรอนอิสระ ไปรอยที่ขั้ว - และ +โฮลอิสระ ไปรอยที่ขั้ว +



โฟตอนจากแสงอาทิตย์ถ่ายพลังงาน ให้อะตอมของซิลิกอนทำให้เกิดอิเล็กตรอน และโฮลอิสระ

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า "กระแสแสง" (Photo Current) หรือเขียนย่อ ๆ ว่า I_p ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแสง
กรณีที่รอยต่อได้รับแสง (illumination) $I = I_0(e^{qVA/KT} - 1) - I_p$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น
ขณะที่ไม่ได้รับแสงและได้รับแสง

2.6.2 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นคุณสมบัติทางไฟฟ้าจึงเหมือนกับคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นทุกประการ และโดยที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสง เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือก็คือเซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งจะต้องให้ทั้งแรงดันไฟฟ้าออกมาจากตัวเซลล์

ในขณะที่เซลล์ถูกลัดวงจร เมื่อเซลล์ได้รับแสง จะทำให้เกิดกระแสเนื่องจากแสงไหลออกมาจากเซลล์ผ่านวงจรในภาวะนี้กระแสจะมีค่าสูงสุด และถูกเรียกว่า “กระแสลัดวงจร” (Shot circuit current) เขียนย่อ ๆ ว่า I_{sc} ค่าของกระแสลัดวงจรนี้ หาได้จากสมการ เมื่อกำหนดให้ขั้วลัดวงจร, $V_A = 0$ ดังนั้นเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$I = -I_p = I_{sc} \quad (2.8)$$

ในขณะที่เซลล์ถูกเปิดวงจรออก (Open circuit) และที่รอยต่อได้รับแสง จะพบว่า กระแสที่ไหลในวงจรจะเป็นศูนย์ เนื่องจากวงจรถูกเปิด แรงดันที่ปรากฏคร่อมรอยต่อพี-เอ็น ขณะนี้ถูกเรียกว่า “แรงดันวงจรเปิด” (Open circuit Voltage) เขียนย่อ ๆ ว่า V_{oc} ค่า V_{oc} หาได้โดยพิจารณาว่า

เมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจร, $I = 0$ สามารถเขียนสมการได้ใหม่ว่า

$$0 = I_0 (e^{qV_A/KT} - 1) - I_p \quad (2.9)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad V_A = V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_p}{I_0} + 1\right) \quad (2.10)$$

$$\text{หรือ} \quad V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (2.11)$$

กระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสงที่เกิด จะมีขนาดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ คือขนาดของพื้นที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแสง , สัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสง เพื่อเกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน -โฮล, ระยะเวลาพักของรอยต่อพีเอ็น, ขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ, ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความเร็วในการรวมตัวของประจุพาหะที่ผิวและค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ โดยทั่วไป ๆ กระแสลัดวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิกอน จะมีค่าประมาณ $35-40 \text{ mA/cm}^2$ และกรณีของแกลเลียมอาเซนายด์ค่า I_{sc} จะอยู่ในราว 20 mA/cm^2

ส่วนค่าของแรงดันวงจรเปิด (Open circuit voltage) V_{oc} จะมีค่ามากน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap) E_g ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเป็นเซลล์ อย่างไรก็ตาม V_{oc} นี้จะมีขนาดจำกัด คือสูงสุดไม่เกิดค่าของความกว้างของช่องว่างพลังงานและปกติ ค่าของ V_{oc} ในเซลล์แบบซิลิกอนมีค่าประมาณ 0.5-0.6 โวลต์ และในกรณีของสารแกลเลียมอาเซนายด์ V_{oc} จะมีค่าราว 0.9 โวลต์

อย่างไรก็ดีขณะที่นำเซลล์ไปใช้งาน เซลล์จะไม่อยู่ในภาวะลัดวงจร หรือเปิดวงจร ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์จะต้องถูกต่อเข้ากับโหลด (load) ซึ่งมีค่าความต้านทานค่าหนึ่ง ดังนั้นแรงดันและกระแสที่เซลล์จ่ายออกมาให้แก่โหลดจะมีค่าน้อยกว่าค่า V_{oc} และ I_{sc} โหลดซึ่งนำมาต่อเมื่อมีค่าความต้านทานที่เหมาะสมค่าหนึ่ง จะทำให้ผลคูณของแรงดันและกระแสที่เซลล์จ่ายออกมามีค่าสูงสุด หรือที่เรียกว่า "ค่ากำลังงานสูงสุด" (maximum power) ที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลดได้ เขียนย่อ ๆ ได้ว่า P_m ค่าของกระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเขียนอักษรย่อแทนเป็น I_m และ V_m

$$\text{นั่นคือ} \quad P_m = I_m \times V_m \quad (2.12)$$

และค่าความต้านทานของโหลดที่เหมาะสมหาได้โดยสมการ

$$R_{LOAD} = V_m / I_m \quad (2.13)$$

คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ก็คือค่าฟิลแฟคเตอร์ (Fill factor) เขียนอักษรย่อเป็น F.F ค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์ ถูกนิยามไว้ว่า คือ อัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานสูงสุดที่เซลล์จะจ่ายให้แก่โหลดได้จริง กับค่าพลังงานสูงสุดในทางอุดมคติที่เซลล์จ่ายได้ นั่นก็คือ

$$F.F = P_m / P_0 = I_m V_m / I_{sc} V_{oc} \quad (2.14)$$

ค่าของฟิลแฟคเตอร์นี้จะไม่เกิน 1 ถ้าฟิลแฟคเตอร์มีค่าใกล้ 1 แสดงว่าเซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ใกล้เคียงกับเซลล์ในทางอุดมคติมาก เซลล์ที่ใช้งาน โดยทั่ว ๆ ไปค่าฟิลแฟคเตอร์จะมีค่าระหว่าง 0.6 ~ 0.8

นอกจากนี้คุณสมบัติประการสำคัญยิ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ก็คือ ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (Energy conversion efficiency) เขียนตัวย่อเป็น η ประสิทธิภาพของเซลล์ถูกนิยามว่าคืออัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์ กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์

$$\eta = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์}}{\text{พลังงานแสงที่เซลล์ได้รับ}} \times 100\% \quad (2.15)$$

$$= (I_m V_m / P_{in}) \times 100\%$$

โดยที่ P_m คือพลังงานรวมของแสงที่ตกกระทบบนเซลล์

ในปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของผลึกรูปเดี่ยวของซิลิกอนที่ใช้งานกันโดยทั่วไปจะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานในช่วง 12 ~ 14%

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น I_{sc} , V_{oc} , P_m , F.F และ η ซึ่งมีค่าสูง ๆ อย่างไม่รู้จักพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ก็ถูกจำกัดด้วยแฟคเตอร์อื่น ๆ มากมาย ซึ่งบางแฟคเตอร์ก็ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่บางแฟคเตอร์ก็สามารถที่จะปรับปรุงแก้ไขและพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นได้

2.6.3 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำงานจำเป็นต้องมีแสงมากระตุ้นให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงานสูงพอที่จะเป็นอิสระและทิ้งโฮลให้เกิดขึ้น ดังนั้นถ้าหากแสงที่มาตกกระทบบน มีความเข้มสูงมากหรือก็คือ ปริมาณความหนาแน่นของโฟตอนมีค่าสูง ก็จะทำให้เกิดคู่ประจุพาหะอิเล็กตรอนโฮล เป็นจำนวนมาก ผลที่ได้จะทำให้ปริมาณกระแสเนื่องจากแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มแสง

2.6.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริง ๆ นั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วยซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็จะมีผลต่อกระแสและแรงดันที่ได้จากเซลล์ด้วย เมื่อได้พิจารณาสมการของกระแส I_R ที่ไหลผ่านมายังโหลด R_L ในวงจรสมมูลจะพบว่า กระแส I_R นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร จะขึ้นอยู่กับกระแสเนื่องจากแสง I_L และกระแส I_j ที่ไหลผ่านรอยต่อ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมาพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อ I_L และ I_j

2.6.5 ผลของอุณหภูมิต่อ I_L

กระแส I_L ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแสงจะมีค่าตามสมการต่อไปนี้

$$I_L = qgA(L_n + L_p) \quad (2.16)$$

โดยที่ g คือ อัตราเกิดกระแสเนื่องมาจากแสง (Generation rate)

L_n, L_p คือ ระยะการแพร่ (Diffusion length) ของอิเล็กตรอนและโฮล

เนื่องจาก I_L แปรผันตาม g และ L จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อ g และ L

จากสมการ $L = \sqrt{D\tau}$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมของสาร (Diffusion coefficient หรือ Diffusion constant) สำหรับที่อุณหภูมิต่ำ ๆ นั้น จะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึม น้อยมาก จากสมการของ L จึงเหลืออยู่แต่ค่าอายุของพาหะ, (Carrier lifetime) ที่ต้องพิจารณา ซึ่งก็พบว่าที่อุณหภูมิต่ำ ๆ นั้นจะมีผลต่ออายุของพาหะ น้อยมากเช่นกัน (สำหรับอายุพาหะนี้จะขึ้นอยู่กับระดับการแพร่ซึมและระดับของการแทรกเป็นส่วนใหญ่)

องค์ประกอบอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อ I_L ก็คือ ค่าอัตราการเกิดของกระแส, g โดยพบว่าค่า g โดยพบว่าค่า g จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากช่องว่างพลังงานของสารจะลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานโฟตอนจากแสงสามารถไปกระตุ้นให้เกิดพาหะได้มากขึ้นกว่าเดิม แต่ผลอันนี้เมื่อพิจารณาการนำไปใช้งานจริง ๆ ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ และมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย (ในช่วง 20-70 °C) อุณหภูมิจะมีผลต่อค่า g น้อยมาก จึงสรุปได้ว่า I_L จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อยมากกับอุณหภูมิ

2.6.6 ผลของอุณหภูมิต่อ I_0

เมื่อพิจารณาค่าของ I_j ซึ่ง I_j มีค่าดังนี้

$$I_j = I_0 \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right) \quad (2.17)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า I_0 จะมีผลต่อกระแส I_j มากที่สุด จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อ I_0 ดังนี้

$$I_0 = Aq n_i^2 \left[\frac{1}{N_a} \frac{\sqrt{D_n}}{\tau_n} + \frac{1}{N_d} \frac{\sqrt{D_p}}{\tau_p} \right] \quad (2.18)$$

จากสมการของ I_0 พบว่า n_i^2 ของซิลิกอนจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิต่างสมการต่อไปนี้

$$n_i^2 = 15 \times 10^{32} T^3 \exp \left(\frac{-1.21}{kT} \right) \quad (2.19)$$

จากสมการจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น n_i^2 จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม โยธาเอกโพเนนเชียลเป็นผลให้ I_0 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิด้วย จากผลอันนี้แสดงว่า I_j จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2.6.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ (V_{oc})

สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันที่ได้จากเซลล์ เพื่อความสะดวกพิจารณาค่าแรงดันขณะวงจรเปิด (V_{oc}) ตามสมการที่ซึ่งได้แสดงไว้ดังนี้

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right] \quad (2.20)$$

จากสมการนี้ค่า kT/q จะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ V_{oc} เนื่องจากค่า k/q มีค่าต่ำมาก, ค่าที่มีผลต่อ V_{oc} ก็คือ I_0 ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลให้ V_{oc} มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2.7 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells)

"Fuel Cells" เซลล์เชื้อเพลิง คือ อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี-ไฟฟ้า ระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจนซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานของเชื้อเพลิง ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ไม่ต้องผ่านการเผาไหม้ ทำให้เครื่องยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงนี้ไม่ก่อมลภาวะทางอากาศ ทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงกว่า เครื่องยนต์เผาไหม้ 1-3 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง และชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายแบบขึ้นอยู่กับสารที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเช่น เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน-ออกซิเจน ไฮโดรเจน-ไฮโดรคาร์บอน โพรเพน-ออกซิเจน เป็นต้น และชนิดที่เป็นที่นิยมใช้คือ เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน-ออกซิเจน เพราะเมื่อปฏิกิริยาในเซลล์เกิดขึ้นแล้ว นอกจากพลังงานจะได้น้ำบริสุทธิ์ และความร้อนไว้ใช้ตามความเหมาะสมด้วย นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ยังไม่ขึ้นบรรยากาศโอโซนเพราะไม่ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เช่นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ

เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะคล้ายกับเซลล์สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่วหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าแบตเตอรี่มากในด้านที่สามารถอัดประจุใหม่ได้เรื่อยๆ เซลล์เชื้อเพลิงยังไม่เป็นที่นิยมใช้ทั่วไปอย่างแบตเตอรี่เพราะต้นทุนการผลิตอุปกรณ์ในครั้งแรกสูงและยังมีอันตรายที่ต้องใช้ความรู้เฉพาะ ควบคุมหลายประการ แต่ในปัจจุบันได้นำมาใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิดเช่น โทรศัพท์มือถือ ปาล์ม Notebook

2.7.1 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

Fuel Cells มีหลายชนิด แต่ทุกชนิดจะให้กระแสไฟฟ้าออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่สามารถนำไปขับมอเตอร์ หลอดไฟ หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆได้ โดยชนิดของตัว Fuel Cells จะแบ่งโดยสารเคมีที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเป็นหลักโดยมีชนิดดังต่อไปนี้

72935

1. Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) เป็นชนิดที่ได้รับความนิยมและจะถูกนำไปใช้ในรถยนต์ในอนาคต

2. Alkaline fuel cell (AFC) เป็นชนิดแรกที่มีการสร้างขึ้นมา เคยถูกใช้ในโครงการอวกาศของสหรัฐในช่วงปี 1960 แต่เนื่องระบบไวต่อการปนเปื้อนมาก จึงต้องใช้ไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์เท่านั้นทำให้ระบบมีราคาสูงมากไม่สามารถนำมาขายในท้องตลาดได้

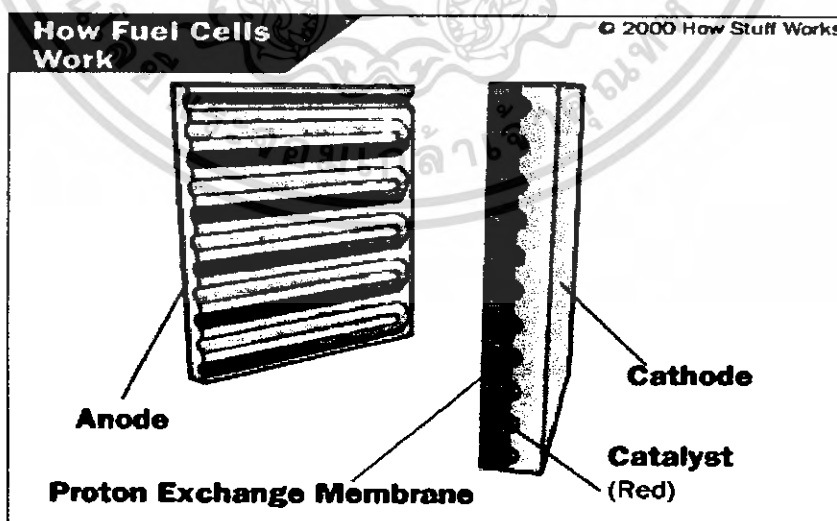
3. Phosphoric-acid fuel cell (PAFC) เป็นระบบที่มีแนวโน้มที่จะถูกนำไปใช้ในสถานีไฟฟ้าขนาดเล็ก เนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าแบบ PEMFC ทำให้ต้องใช้เวลานานในการอุ่นระบบที่นานกว่าทำให้มันไม่เสถียรในการนำมาใช้ในรถยนต์

4. Solid oxide fuel cell (SOFC) เป็นระบบที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่เนื่องจากสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มาก แต่เซลล์ไฟฟ้านิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิที่สูงมาก (ประมาณ 1,832 F, 1,000 C) ทำให้มีปัญหาเรื่องเสถียรภาพ แต่ก็มียข้อดีตรงที่ว่า ไอ้แต่อุณหภูมิสูงที่เป็นผลผลิตจากกระบวนการนี้ สามารถนำไปใช้ป้อนกังหันก๊าซต่อได้ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก

5. Molten carbonate fuel cell (MCFC) เป็นอีกประเภทหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่ แต่ชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าคือที่ประมาณ 1,112 F หรือ 600 C และยังสามารถให้อิโาน้ำความดันสูงเพื่อมาช่วยผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วย และเนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า SOFC ทำให้ไม่ต้องใช้วัสดุพิเศษ จึงทำให้ระบบนี้ใช้งบประมาณที่น้อยกว่า

2.7.2 องค์ประกอบหลักของ Fuel Cell

Fuel Cell มีอยู่ด้วยกันหลายประเภท โดยแบ่งตามประเภทของสารพาประจุ (Electrolyte) โดยจะกล่าวถึงการทำงานโดยละเอียดของเซลล์ประเภท Proton exchange membrane เซลล์เชื้อเพลิงจะแบ่งโครงสร้างออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่



รูปที่ 2.12 องค์ประกอบหลักของ Fuel Cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3. สารพาประจุ (Electrolyte) เป็นส่วนที่มากมีความสำคัญ เพราะ เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนชนิดต่างๆ และเป็นส่วนที่เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภทแตกต่างกัน โดยประเภทที่เรากล่าวถึงอยู่นี้ สารพาประจุ จะเป็นเพียงเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane) เท่านั้น ซึ่งมีลักษณะเหมือนแผ่นพลาสติก โดยจะให้โปรตอนผ่านได้ แต่จะไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน

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

2.7.3 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

หลักการการทำงาน คือ H_2 จะถูกปล่อยไปในขั้วแอโนดโดยใช้ความดัน เมื่อก๊าซไปสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา ก็จะทำให้เกิดการแตกตัวออกเป็น โปรตอนและอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยังวงจรภายนอก ส่วนโปรตอนนั้น จะผ่านช่องของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนไปยังขั้วแคโทด ซึ่งจะไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่รับมาจากวงจรภายนอก รวมไปถึงอะตอมของออกซิเจนซึ่งแตกตัวโดยการเร่งของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นโมเลกุลของน้ำขึ้นมา ซึ่งการไหลของอิเล็กตรอนนี้ จะนำไปใช้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้เพื่อประโยชน์ในงานด้านต่างๆ

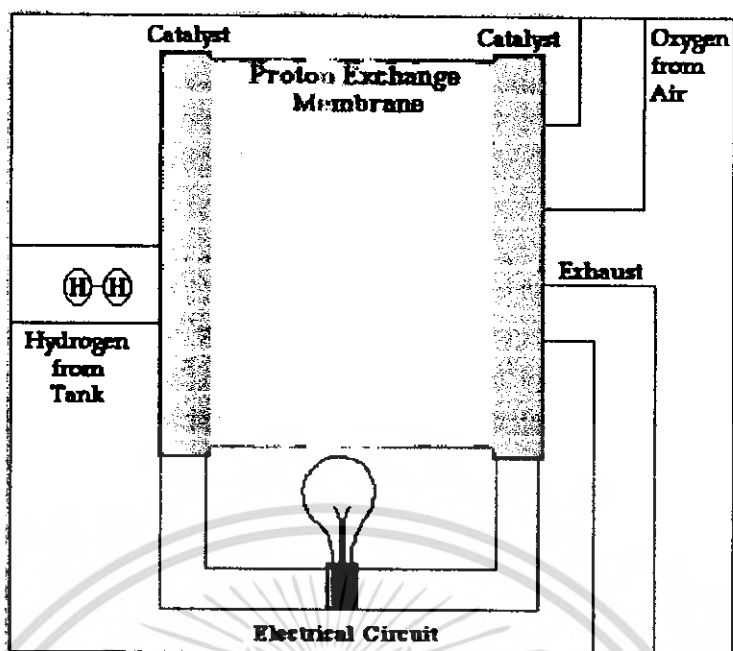
แต่เนื่องจาก H_2 เป็นก๊าซที่อันตราย เนื่องจากติดไฟได้ จึงไม่เหมาะสมในการบรรจุ หรือเคลื่อนย้ายไปมาและทำให้จึงมีการพัฒนา Fuel Processor ซึ่งมีหลักการคือ

1. ใช้เครื่อง Reformer เปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ, H_2O และ O_2 ให้กลายเป็น H_2 , CO , CO_2

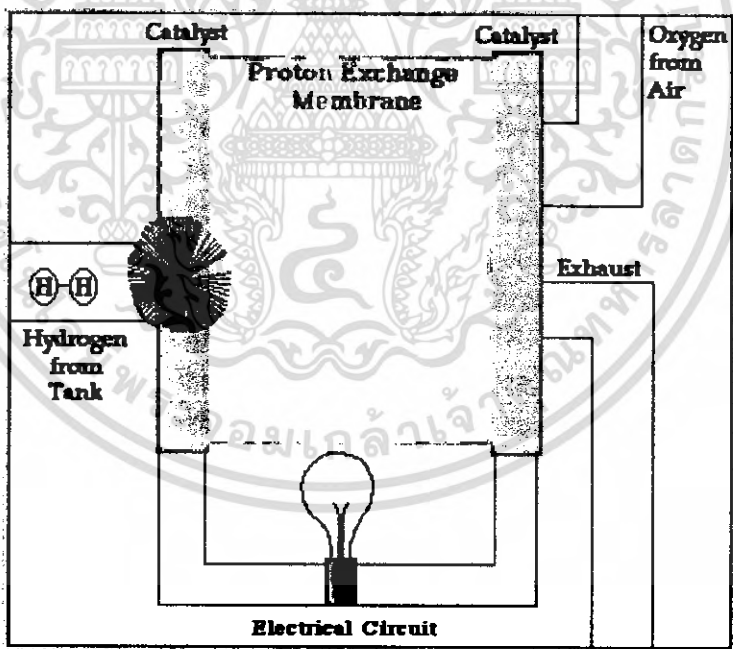
2. ใช้เครื่อง Catalytic Converter เปลี่ยน CO ให้กลายเป็น CO_2

3. จากนั้น ก็นำ H_2 มาใช้ได้ตามต้องการ ส่วน CO_2 ก็ถูกปล่อยสู่อากาศต่อไป

วิธีนี้ นอกจากจะเพิ่มความปลอดภัยแล้ว ยังเป็นการประหยัดอีกด้วย เนื่องจากสามารถเปลี่ยนสารอื่นๆมาเป็น H_2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง Fuel cell อธิบายได้ดังรูปตามขั้นตอนต่างๆเพื่อให้เข้าใจหลักการการทำงานอย่างชัดเจนตั้งขั้นตอนต่อไป

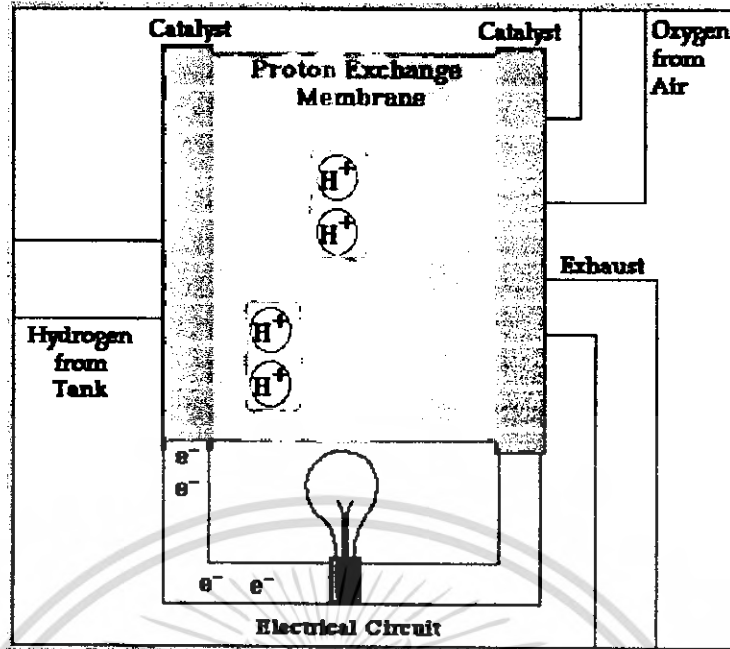


รูปที่ 2.13 เมื่อส่งผ่านก๊าซไฮโดรเจน เข้ามา

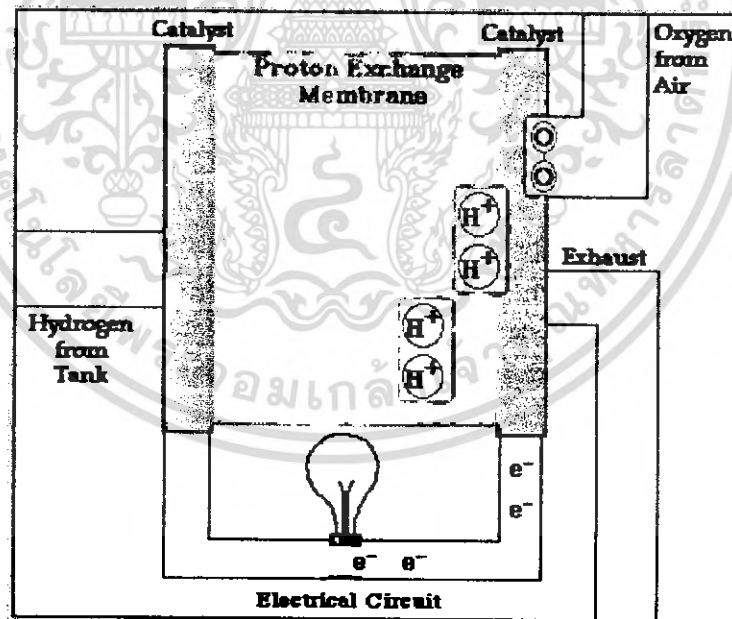


รูปที่ 2.14 H_2 จะถูกปล่อยไปทางด้านแอโนดโดยใช้ความดันจาก Tank โดยชนแล้วเกิดการแตกตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

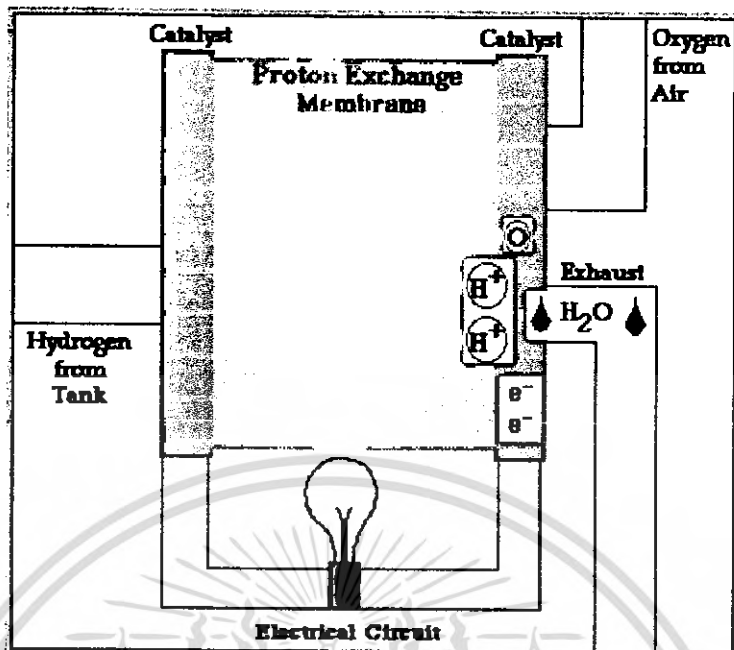


รูปที่ 2.15 เมื่อก๊าซไปสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา ก็จะมีการแตกตัวออกเป็น โปรตอน และอิเล็กตรอน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้โปรตอนผ่านได้ แต่จะไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน

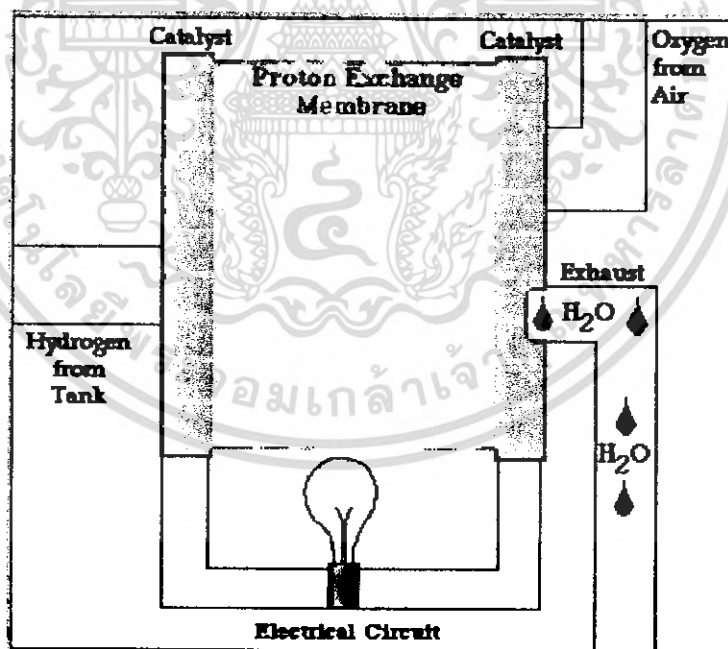


รูปที่ 2.16 โดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยังวงจรภายนอก ส่วนโปรตอนนั้น จะผ่านช่องของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนไปยังขั้วแคโทดซึ่งจะไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่รับมาจากวงจรภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 อะตอมของออกซิเจนซึ่งแตกตัวโดยการเร่งของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นโมเลกุลของน้ำขึ้นมา



รูปที่ 2.18 โมเลกุลของน้ำ และจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 (MPPT) Maximum Power Point Tracking

ความหมายของ Maximum Power Point Tracking หรือ MPPT หมายถึงขั้นตอนวิธี (algorithm) ที่ถูกรวบรวมเข้าไว้ในอุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งใช้ในการทำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้สูงสุด ทั้งนี้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความเข้มของแสงอาทิตย์ (Solar radiation) อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (Ambient temperature) และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell temperature) ระบบ MPPT ได้รับการออกแบบให้ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์สำหรับการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดเวลา เพื่อให้ได้ค่ากำลังผลิตสูงสุดในแต่ละเวลาตามค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ได้รับ ในรูปของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

2.8.1 หลักการของ Maximum Power Point Tracking

หลักการสำคัญของระบบ MPPT คือ ดึงกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด โดยการทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด กล่าวคือ MPPT ทำงานโดยการตรวจสอบที่เอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในระบบ จากนั้นกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายออกเพื่อทำการประจุในแบตเตอรี่ และทำการแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการประจุแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ฟ้ากระแสตรง (DC load) ที่ต่อโดยตรงกับแบตเตอรี่ได้อีกด้วย

2.8.2 ระบบ MPPT มีประสิทธิภาพสูงหากทำงานภายใต้สภาวะเหล่านี้

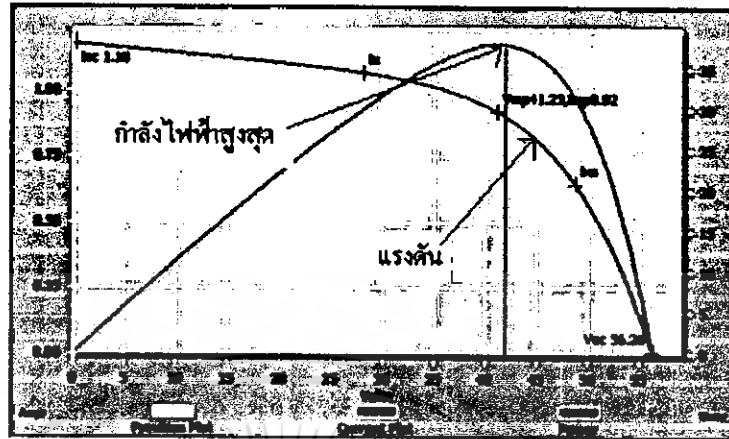
1. สภาวะอากาศเย็นหรือฤดูหนาว โดยปกติแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ถึงแม้ในช่วงฤดูหนาวที่มีอากาศเย็น จะมีช่วงเวลากการตกกระทบของแสงอาทิตย์ (Sun hour) น้อย หากที่การติดตั้งอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยระบบ MPPT จะทำให้เกิดการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดมากยิ่งขึ้นไปอีก แต่จะมีการสูญเสียพลังงานน้อยมาก
2. สภาวะที่มีการประจุแบตเตอรี่ต่ำ เนื่องจากยังมีอัตราการประจุแบตเตอรี่ต่ำ จะทำให้กระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ MPPT มากขึ้น

2.8.3 เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าพร้อมด้วย MPPT

เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าพร้อมด้วย MPPT ทำหน้าที่เป็นตัวปรับระดับแรงดันไฟฟ้า DC-DC โดยการไประโยชน์จากคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุดและประจุแบตเตอรี่อย่างปลอดภัย ตัวปรับระดับแรงดันไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

1. Boot regulator, แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในระบบ

2. Buck regulator; แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในระบบ

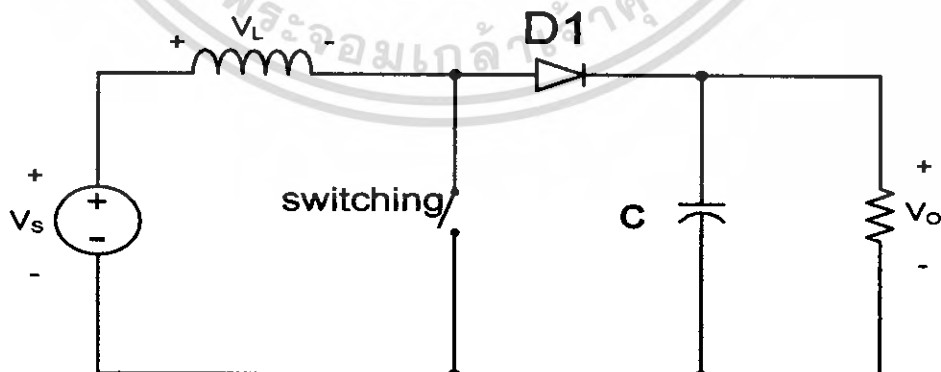


รูปที่ 2.19 กำลังผลิตสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสง 1,000 วัตต์/ตารางเมตร แสดงโดยใช้ I-V curve

ระบบ สามารถนำไปใช้ได้กับตัวปรับระดับแรงดันไฟทั้ง 2 ชนิด ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบ โดยทั่วไป ระบบที่ใช้แบตเตอรี่ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าหรือเท่ากับ 48 โวลต์ จะใช้ Buck regulator สำหรับระบบที่ใช้แบตเตอรี่ที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 48 โวลต์จะใช้ Boost regulator ซึ่งในโครงการนี้ใช้ Boost

2.9 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter)

วงจรทบระดับหรือวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ คือวงจรที่ทำการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า ที่เรียกวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) ก็เพราะด้านออกสูงกว่าแรงดันด้านเข้านั่นเอง



รูปที่ 2.20 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจรจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน โดยแบ่งตามการทำงานของมอสเฟตโดยแบ่งได้ดังนี้

2.9.1 กรณีสวิตช์ปิด (มอสเฟตนำกระแส)

เมื่อมอสเฟตนำกระแสทำให้ไดโอดได้รับการรีเวอร์สไบอัส จากกฎของเคอร์ชอฟท์สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$V_L = V_i = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.21)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_i}{L} \quad (2.22)$$

$$(\Delta i_L)_{closed} = \frac{V_i DT}{L} \quad (2.23)$$

2.9.2 กรณีสวิตช์เปิด (มอสเฟตหยุดนำกระแส)

เมื่อมอสเฟตหยุดนำกระแส กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i₂) ไม่สามารถเปลี่ยนทิศการไหลอย่างทันทีทันใดได้ ดังนั้นไดโอดจึงได้รับฟอร์เวอร์สไบอัส จึงทำให้

$$V_L = V_i - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.24)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad (2.25)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad (2.26)$$

$$\Delta i_{L(open)} = \frac{(V_i - V_o)(1-D)T}{L} \quad (2.27)$$

ในการทำงานที่สภาวะคงตัว กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น จากสมการ (2.17) กับ (2.22)

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

$$\frac{V_i DT}{L} + \frac{(V_i - V_o)(1-D)T}{L} = 0$$

$$V_i(D + 1 - D) - V_o(1 - D) = 0$$

$$\therefore V_o = \frac{V_i}{1-D} \quad (2.28)$$

จาก $P_o = \frac{V_o^2}{R}$

และกำลังขาเข้า $V_i I_i = V_i I_L = P_o$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{จะได้} \quad V_i I_L &= \frac{V_o^2}{R} \\
 V_i I_L &= \frac{\left(\frac{V_i}{1-D}\right)^2}{R} = \frac{V_i^2}{(1-D)^2 R} \\
 \therefore I_L &= \frac{V_i}{(1-D)^2 R} \quad (2.29)
 \end{aligned}$$

กระแสสูงสุดและต่ำสุดของตัวเหนี่ยวนำ หาได้โดยใช้จากสมการ (2.2)

$$I_{\max} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_i^2}{(1-D)^2 R} + \frac{V_i D T}{2L} \quad (2.30)$$

$$I_{\min} = I_L - \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_i^2}{(1-D)^2 R} - \frac{V_i D T}{2L} \quad (2.31)$$

จากสมการ (2.24) จะพิจารณากระแสของตัวเหนี่ยวนำในโหมดกระแสต่อเนื่อง ซึ่งก็หมายความว่า กระแสจะเป็นบวกตลอด ดังนั้น I_{\min} ต้องเป็นบวกด้วย ขอบเขตระหว่างโหมดกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องหาได้จาก

$$\begin{aligned}
 I_{\min} = 0 &= \frac{V_i}{(1-D)^2 R} - \frac{V_i D T}{2L} \\
 \frac{V_i}{(1-D)^2 R} &= \frac{V_i D T}{2L} = \frac{V_i D}{2L f}
 \end{aligned}$$

ค่าตัวเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุดและความถี่ของการสวิตช์สำหรับโหมดกระแสต่อเนื่องของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

$$(L F)_{\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2} \quad (2.32)$$

$$\therefore L_{\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (2.33)$$

หากระแสระเหิม (ΔI)

$$T = t_{on} + t_{off}$$

$$\text{จากสมการ(2.17)} \quad t_{on} = \frac{L \Delta I}{V_i}$$

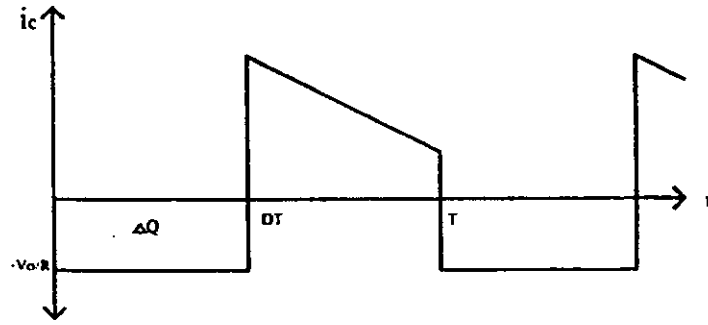
$$\text{จากสมการ(2.22)} \quad t_{off} = \frac{L \Delta I}{(V_i - V_o)}$$

$$T = \frac{L \Delta I}{V_i} + \frac{L \Delta I}{(V_i - V_o)}$$

$$\text{แทน} \quad \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(1-D)}$$

$$\text{จะได้} \quad \Delta I = \frac{V_i D}{L f} \quad (2.34)$$

หาแรงดันกระเพื่อม (ΔV_o)



รูปที่ 2.21 แสดงกระแสของคาปาซิเตอร์

$$\begin{aligned}
 |\Delta Q| &= \left(\frac{V_o}{R}\right)DT = C\Delta V_o \\
 \Delta V_o &= \frac{V_o DT}{RC} = \frac{V_o D}{RCf} \\
 \frac{\Delta V_o}{V_o} &= \frac{D}{RCf} \quad (2.35)
 \end{aligned}$$

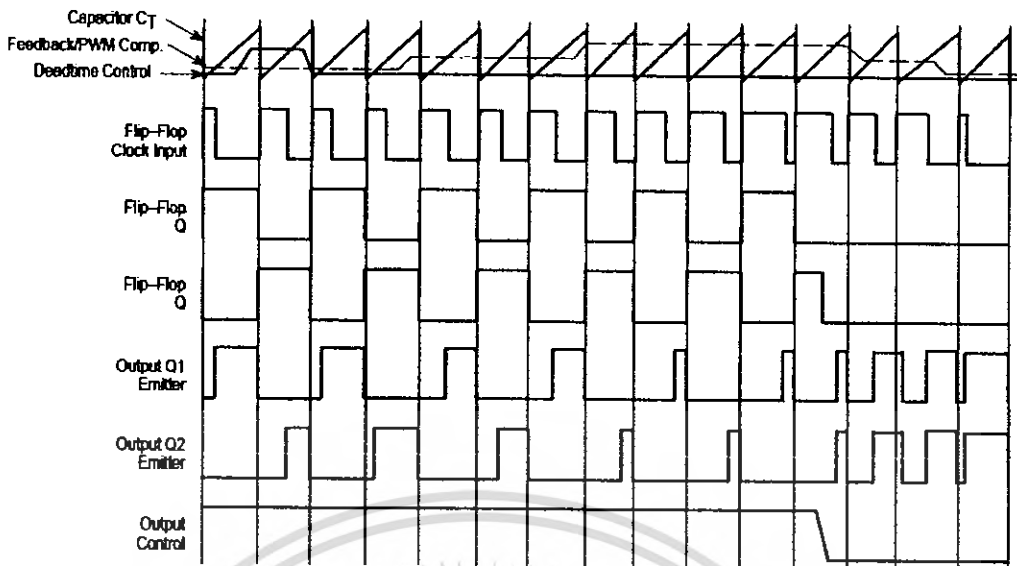
2.10 TL-494

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

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T C_T} \quad (2.36)$$

และสามารถปรับค่าการ On Duty มากน้อยโดยขึ้นอยู่กับ แรงดันไฟฟ้าที่นำไปตัดผ่าน Sawtooth โดยใช้หลักการของ PWM ภายในของ TL 494 นั้นมี Flip Flop อยู่ 1 ตัว และมี $V_{Referent}$ จำนวน 1 ตัว คือ ขา 14 สามารถนำแรงดันออกไปเปรียบเทียบกับได้ 5 V DC โดยการทำงานของ TL 494 ดังรูป

โดย Sawtooth ลुकคลื่นจะอยู่ในทิศทางบวก และนอกจากนั้นยังมีอุปกรณ์ NOR Gates ซึ่งเอาไว้ขับ Output ของ Transistor Q1 และ Q2 ซึ่งจะมีทิศทางเป็นบวกเสมอ

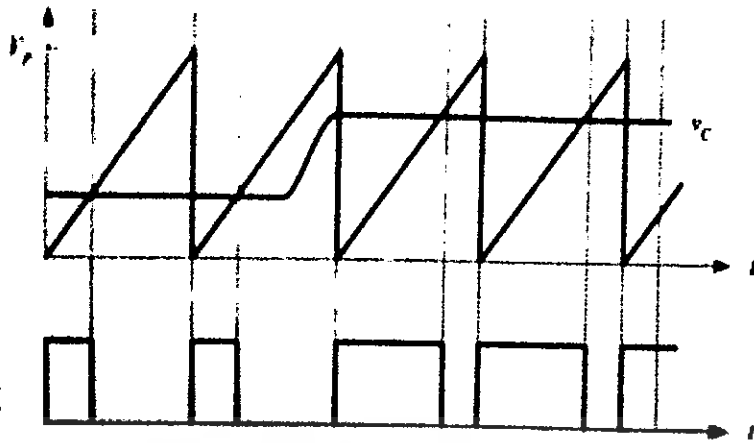


รูปที่ 2.22 แสดงแบบการทำงานของ TL-494

2.11 ฟังก์ชันถ่ายโอนของ PWM

หน้าที่ของวงจร Pulse width modulation (PWM) ก็คือทำการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรขยายความคลาดเคลื่อนที่ถูกชดเชย (วงจรขยายความผิดพลาดที่ได้ชดเชยแล้ว) ให้กลายเป็นค่าตัวดิไซเคิลเพื่อไปขับขาเกตของสวิตช์ แรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจร (V_c) จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย (Sawtooth waveform) ที่มีขนาดเท่ากับ V_p ดังแสดงในรูปที่ 2.15 แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีวงจร PWM เมื่อแรงดันไฟฟ้า V_c มีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย และจะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อแรงดันไฟฟ้า V_c มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย

ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์ มีค่าลดต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงแรงดันไฟฟ้าคลาดเคลื่อนที่ฟ้าจากการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าทั้งสองค่าจะมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้แรงดันไฟฟ้า V_c มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ได้ค่าตัวดิไซเคิลมีค่าเพิ่มขึ้น และด้วยค่าตัวดิไซเคิลที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งได้ค่าแรงดันคลาดเคลื่อนเท่ากับที่ออกแบบและในทำนองกลับกัน กรณีที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น จะเป็นผลทำให้ค่าตัวดิไซเคิลจะมีค่าลดลง สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร PWM จะหาได้จากความสัมพันธ์เชิงเส้น (linear relation) ดังนี้



รูปที่ 2.23 กระบวนการ PWM จะมีค่าแรงดันด้านออกก็ต่อเมื่อ แรงดัน V_c ที่ออกจาก วงจรขยายความคลาดเคลื่อนที่ถูกชดเชย มีค่าสูงกว่าค่าของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

$$d = \frac{V_c}{V_p} \quad (2.37)$$

ฟังก์ชันโอนของวงจร PWM จะเท่ากับ

$$\frac{d(s)}{V_s(s)} = \frac{1}{V_p} \quad (2.38)$$

2.11.1 วงจรขยายความผิดพลาดที่มีการชดเชย (Error Amplifier with Compensation)

วงจรขยายความผิดพลาดที่มีการชดเชย หรือ (Error amplifier with compensation) ที่ต้องการความจะมีคุณลักษณะดังนี้

1. ควรจะมีวงจรรวมอินทิเกรต (Integrator) เพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำมีค่าสูง
2. ควรจะมีซีโรสองตัวที่ความถี่ต่ำกว่าจุดตัดเปลี่ยนความถี่ f เพื่อชดเชยเฟสที่มีค่าล้าหลังมากเกินไปเนื่องจากผลของวงจรรวมอินทิเกรตและคูโพลเชิงซ้อน (Complex pole pair) ของวงจรถอนเวอร์เตอร์
3. ควรจะมีโพลสองตัวที่ความถี่สูง เพื่อให้ขนาดของวงรอบอัตราขยาย (Loop Gain) มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความถี่มีค่าสูงกว่า f และลดผลของสัญญาณรบกวนความถี่สวิตซิง (Switching frequency noise)

โดยวงจร Error amplifier จะทำการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าด้านออกของคอนเวอร์เตอร์กับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงผลลัพธ์ที่ได้คือผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าทั้งสองค่า ซึ่งนิยามว่า หมายถึง ค่าแรงดันไฟฟ้าคลาดเคลื่อน ซึ่งจะนำไปใช้ในการปรับเปลี่ยนดิวิตีไซเคิลในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ นอกจากนี้ การรวมวงจร Compensated ร่วมกับวงจร Error Amplifier จะมีผลทำให้ระบบมีเสถียรภาพ สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนสัญญาณขนาดเล็ก (กำหนดให้องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสเท่ากับศูนย์) ของวงจร Amplifier จะหาได้จากอิมพีแดนซ์

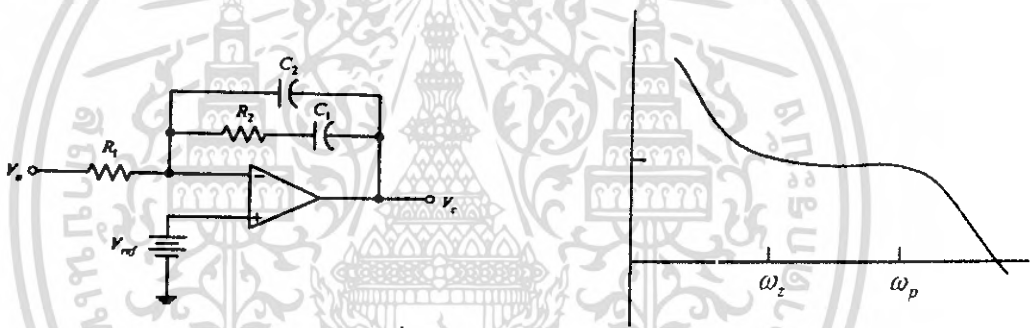
ด้านเข้า Z_i และอิมพีแดนซ์ป้อนกลับ (Feedback impedance) Z_f อย่างไรก็ตามสำหรับ วงจรขยายความผิดพลาดที่ได้ชดเชยแล้วที่นิยมใช้สำหรับวงจรมักจะได้แก่ วงจร Type 2 วงจรขยายความผิดพลาดที่ได้ชดเชยแล้ว ซึ่งสามารถค่า

$$Z_i = R_1 \quad (2.39)$$

$$Z_f = \left(R_2 + \frac{1}{sC_1} \right) // \frac{1}{sC_2} \quad (2.40)$$

จะได้ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนเท่ากับ

$$\frac{\bar{v}_c(s)}{\bar{v}_o(s)} = -\frac{Z_f}{Z_i} = -\frac{\left(R_2 + \frac{1}{sC_1} \right) \frac{1}{sC_2}}{R_1 \left(R_2 + \frac{1}{sC_1} + \frac{1}{sC_2} \right)} \quad (2.41)$$



(ก) Type2 วงจรขยายความผิดพลาดที่ได้ชดเชยแล้ว

(ข) ผลตอบสนองเชิงความถี่

รูปที่ 2.24 (ก) Type 2 วงจรขยายความผิดพลาดที่ได้ชดเชยแล้ว (ข) ผลตอบสนองเชิงความถี่จุดเทอมใหม่โดยกำหนดให้ $C_2 \ll C_1$

$$\frac{\bar{V}_c(s)}{\bar{V}_e(s)} = -\frac{s + \frac{1}{R_2C_2}}{sR_1C_2 \left(s + \frac{C_1 + C_2}{R_2C_1C_2} \right)} \approx -\frac{s + \frac{1}{R_2C_2}}{sR_1C_2 \left(s + \frac{1}{R_2C_2} \right)} \quad (2.42)$$

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

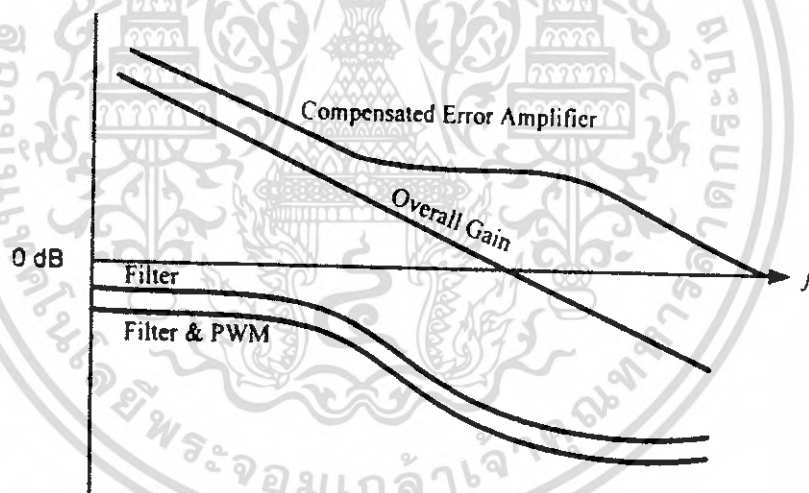
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_r = \frac{1}{R_2 C_1} \quad (2.43)$$

$$\omega_p = \frac{C_1 + C_2}{R_2 C_1 C_2} \approx \frac{1}{R_2 C_2} \quad (2.44)$$

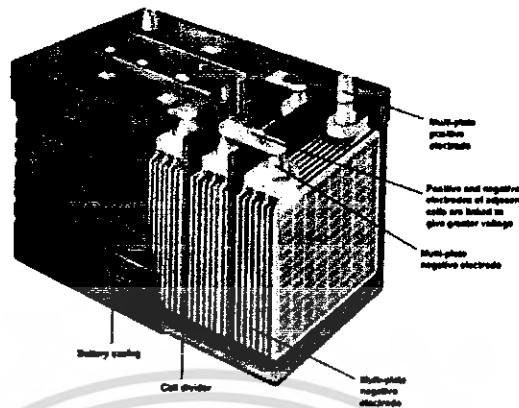
รูปที่ 2.24 (ข) แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency response) ของวงจร วงจรขยายความผิดพลาดที่ได้ชดเชยแล้ว ผลตอบสนองความถี่รวมของระบบที่ต้องการ (Overall control system) จะสามารถกำหนดได้ด้วยการเลือกค่าพารามิเตอร์ R_1 , R_2 , C_1 และ C_2 ให้เหมาะสม

รูปที่ 2.17 ตัวอย่างผลรวมผลตอบสนองความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร PWM สวิตช์และวงจรกรองด้านออก สำหรับวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ โดยผลกระทบที่เกิดจากตัวต้านทานแม่เหล็กในตัวเก็บประจุ (ESR) จะทำให้เกิดจุดซีโรที่ความถี่ ($\omega = 1/r_c C$) นอกจากนี้ในการหาผลตอบสนองเชิงความถี่จะสามารถหาได้ด้วยการใช้โปรแกรม Pspice หรืออาจจะหาได้จากการคำนวณด้วยการแทนค่า $s = j\omega$ ในฟังก์ชันถ่ายโอนที่ต้องการทราบผลตอบสนองเชิงความถี่



รูปที่ 2.25 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุม

2.12 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ (Battery Charger)

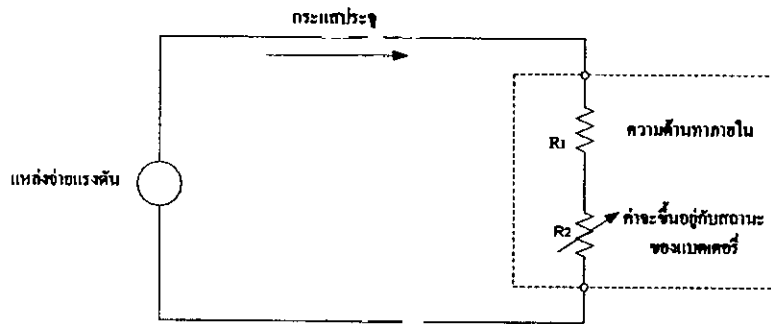


2.12.1 พารามิเตอร์ในการอัดประจุ

1. การชดเชยทางอุณหภูมิของการอัดประจุ โดยการอัดประจุจะปรับแต่งค่าแรงดันที่อัดประจุ ซึ่งต้องมีการชดเชยอุณหภูมิ โดยการตรวจจับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม
2. เวลาที่อัดประจุเสร็จ เวลาที่แบตเตอรี่จะถูกอัดประจุเต็มขึ้นอยู่กับสภาวะการดิสชาร์จ และลักษณะการอัดประจุ รวมทั้งอุณหภูมิด้วย
3. อุณหภูมิในขณะที่อัดประจุควรทำการอัดประจุที่อุณหภูมิในช่วง 0 ถึง 40 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิในการอัดประจุจะมีประสิทธิภาพที่ดี ก็คือในช่วง 5 -30 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า หรืออุณหภูมิสูงกว่าที่กำหนด อาจทำให้การอัดประจุได้ไม่มาก หรือร้อนเกินไป
4. การชาร์จประจุเกิน การอัดประจุเพิ่มขึ้นอีกหลังจากแบตเตอรี่อัดประจุเต็มแล้ว เรียกว่าโอเวอร์ชาร์จ (Overcharge) ซึ่งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่สั้นลง

2.12.2 หลักการประจุไฟฟ้าของเครื่องประจุแบตเตอรี่

เครื่องประจุแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะให้ระดับแรงดันสูงกว่าระดับแรงดันของแบตเตอรี่ในขณะที่มีการเก็บประจุ ในการประจุแบตเตอรี่จะให้ขั้วบวกของเครื่องเก็บประจุต่อเข้ากับขั้วแบตเตอรี่ โดยกระแสที่ทำการประจุจะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของกระแสที่แบตเตอรี่จ่ายออกมา ดังแสดงในรูป 2.18 จากรูปวงจรที่ใช้ประจุแบตเตอรี่แสดงให้เห็นว่าการประจุเราต้องพิจารณาถึงตัวต้านทาน 2 ตัวภายในแบตเตอรี่คือ R_1 จะเป็นความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เอง จะมีอยู่มนแบตเตอรี่เสมอไม่ว่าแบตเตอรี่นั้นกำลังประจุหรือคายประจุอยู่โดยจะมีค่ามากน้อยก็ขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ ซึ่งจะมีค่ามากเมื่อเป็นแบตเตอรี่ชนิด Low Rated charge – Discharge เมื่อเราใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้ในอัตรากระแสที่สูงจะให้ความสูญเสียมากเนื่องจาก $Loss = I^2 \times R$ แต่ถ้าเป็นแบตเตอรี่ชนิด High rate ค่าความต้านทานตัวนี้จะมีค่าน้อยมากทำให้สามารถใช้กระแสสูงๆได้โดยกำลังสูญเสียไม่มาก ส่วน R_2 นั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.26 ทิศทางการไหลของกระแสประจุแบตเตอรี่

โดยขึ้นอยู่กับสถานการณ์หมดประจุของแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่คายประจุหมดเต็มที่ ค่าความต้านทานตัวนี้จะมีค่าต่ำลง ดังนั้นกระแสที่ใช้ในการประจุจึงมีค่าสูง อย่างไรก็ตามเป็นแบตเตอรี่ใกล้หรือประจุจนเต็มที่แล้วค่าความต้านทาน R_2 ทำให้กระแสที่ใช้ในการประจุมีค่าลดลง

นอกจากนี้สิ่งที่ควรทราบอย่างยิ่งในการประจุแบตเตอรี่มีดังต่อไปนี้

1. ระดับแรงดันที่ใช้ประจุ

Float Charge คือการประจุแบตเตอรี่ด้วยระดับแรงดันธรรมดาที่มีค่าไม่สูงอยู่ที่ค่าประมาณ 2.13 -2.25 V/Cell ในสภาวะปกติของการประจุจะใช้ระดับแรงดันดังนี้

Equalizing Charge ในบางครั้งแบตเตอรี่ที่ใช้อยู่ไม่ถูกใช้งานหรือใช้งานอยู่น้อยทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเสื่อมลงจึงควรมีการกระตุ้นแบตเตอรี่บ้างประมาณ 72 ชม. ต่อปี โดยระดับแรงดันที่ใช้ประจุประมาณ 2.3 -2.55 V/Cell

2. End of cell voltage

คือจุดต่ำสุดของแรงดันในการพิจารณาว่าแบตเตอรี่คายประจุหมดแล้ว มีค่าไม่แน่นอน ประมาณ 1.5 -1.8 V/Cell ถ้าปล่อยให้แบตเตอรี่คายประจุจนต่ำกว่าค่า End of cell แล้วจะทำให้แบตเตอรี่คายไม่สามารถอัดประจุด้วยวิธีธรรมดาได้ ต้องประจุแบบรุนแรงเป็นจังหวะแบบการบีบหัวใจให้แบตเตอรี่ฟื้น

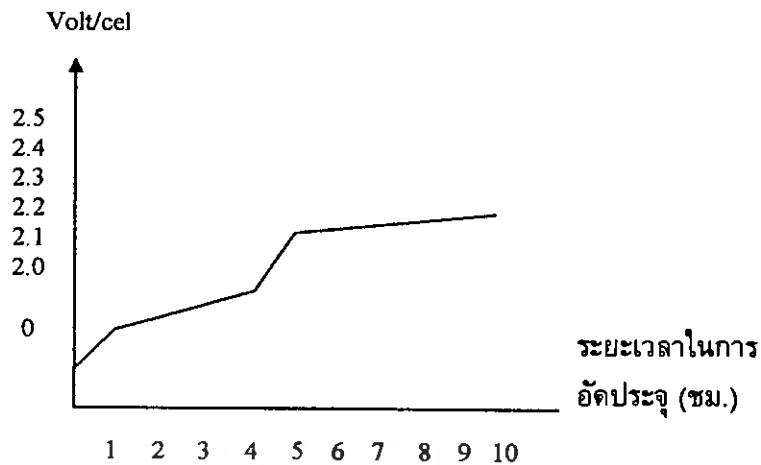
3. ขนาดกระแสสูงสุดที่แบตเตอรี่ทนได้

2.12.3 การอัดประจุของแบตเตอรี่

แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ดังนี้

1. การอัดประจุแบบกระแสตรงคงที่ (Constant Current Charging)

วิธีนี้มีข้อดีตรงที่ว่าไม่จำเป็นต้องมีการชดเชยอุณหภูมิเหมือนกับเครื่องชาร์จแบบแรงดันคงที่ (Constant Voltage Charging) แต่มีข้อเสียตรงที่ต้องระวังเรื่องของเวลาในการอัดประจุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการอัดประจุด้วยกระแสสูงๆ ซึ่งแบตเตอรี่จะเต็มภายในเวลาอันสั้นๆ เท่านั้นการอัดประจุด้วยอัตราสูงมีผลทำให้แรงดันที่แบตเตอรี่สูงเกินไป น้ำแตกตัวและมีความ



รูปที่ 2.27 การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันในการอัดประจุแบบกระแสคงที่

ร้อนเกิดขึ้น การอัดประจุแบบนี้อาจใช้ในการอัดประจุใหม่ให้กับแบตเตอรี่ที่เก็บไว้นานแล้ว ซึ่งสามารถอัดประจุได้ทีเดียวหลายลูก

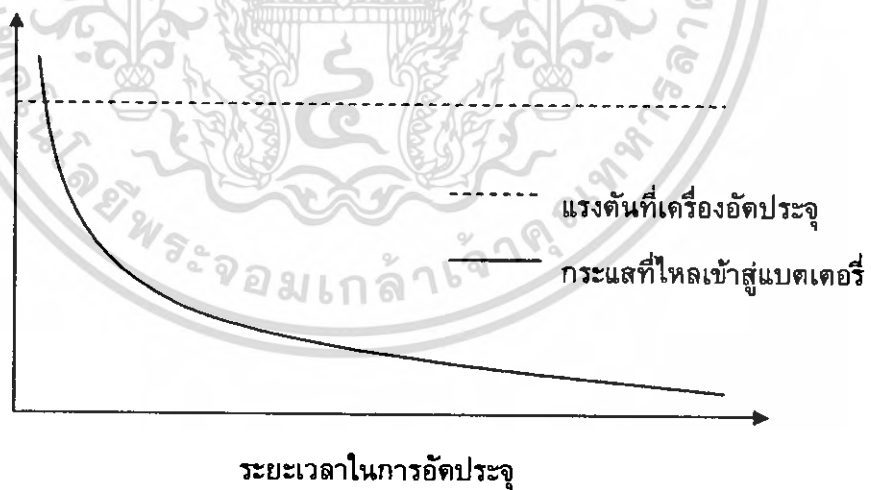
การประจุแบตเตอรี่แบบกระแสคงที่นี้ นับว่าเป็นการอัดประจุที่มีประสิทธิภาพกว่าแบบแรงดันคงที่ แต่การประจุแบบกระแสคงที่นี้ จะใช้เวลาการประจุนานกว่าแบบแรงดันคงที่ ทั้งนี้ การประจุแบบกระแสคงที่นี้ จะถูกจำกัดปริมาณการประจุกระแสจากเครื่องประจุเข้าวงจรแบตเตอรี่เป็นจำนวนแอมแปร์ต่อชั่วโมง ดังนั้นแบตเตอรี่จะได้รับการประจุเป็นไปตามที่กำหนด เมื่อเป็นเช่นนี้อาจเป็นที่สงสัยว่าทำไมไม่ตั้งกระแสประจุสูงขึ้น จะทำให้เวลาในการประจุน้อยลง แต่จะเกิดความเสียหายขึ้นกับแบตเตอรี่คือความร้อนที่เกิดขึ้นในเซลล์แบตเตอรี่จะสูงตามปริมาณของกระแสที่ทำการประจุและในที่สุดแผ่นเพลทของแบตเตอรี่ที่เป็นวัสดุแอคทีฟ (Active material) ของเซลล์แบตเตอรี่จะเกิดการขดงอ แตก หรือ เกิดการร้าวเนื่องจากการความร้อนนี้ ถ้าเซลล์แบตเตอรี่เกิดความร้อนสูงกว่าปกติมากๆ หรือความร้อนในเซลล์สูงกว่ากำหนดจะทำให้เซลล์แบตเตอรี่เกิดระเบิดขึ้นได้

2. การอัดประจุแบบแรงดันคงที่ (Constant Voltage Charging)

อาจจะใช้ในกรณีที่ต้องการให้แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะประจุเต็ม (Fully charge) เสมอ โดยต้องระวังเรื่องอัตราประจุสูงเกินไป ซึ่งการอัดประจุแบบนี้ทำให้แรงดัน Output มีเสถียรภาพ พร้อมทั้งมีความจุกระแสสูง สำหรับในช่วงที่แรงดันแบตเตอรี่มีค่าต่ำ ๆ ความต้านของแบตเตอรี่มีค่าน้อยมาก ฉะนั้นกระแสที่อัดประจุจึงมีค่าสูงมาก เป็นผลทำให้เครื่องอัดประจุต้องมีขนาดใหญ่และราคาแพง อีกทั้งยังทำให้เกิดความร้อนภายในแบตเตอรี่ซึ่งปกติเครื่องอัดประจุแบบแรงดันคงที่นี้ จะมีอุปกรณ์ช่วยในการจำกัดกระแสเริ่มต้นโดยใช้ Constant Current Regulation ซึ่งในช่วงสุดท้ายของการอัดประจุ กระแสจะถูกลดลงอย่างอัตโนมัติ ซึ่งไม่ทำให้เกิดการสลายตัว

จากที่เราได้ทราบมาแล้วว่าการประจุแบบกระแสคงที่ เราจะทำการประจุอย่างรวดเร็วไม่ได้ ต่อไปนี้เราจะได้ศึกษาถึงการประจุแรงดันคงที่ในการประจุแบบนี้จะใช้เวลาในการประจุน้อยกว่าการประจุแบบกระแสคงที่ ระยะเวลาจะใช้น้อยกว่าเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถของการประจุว่าจะจ่ายกระแสออกมาถึงวงจรแบตเตอรี่มากน้อยเพียงไร โดยทั่วไปเครื่องประจุสามารถจ่ายกระแสออกมาได้ 50 % ของความจุแบตเตอรี่ที่นำมาทำการประจุเช่นแบตเตอรี่ขนาด 100 แอมแปร์ต่อชั่วโมง จะใช้เวลาในการประจุเท่ากับ 2 ชั่วโมง

การประจุแบตเตอรี่เกิดจากเมื่อแบตเตอรี่ถูกนำเอาพลังงานออกไปใช้งานจะต้องมีการประจุไฟให้กับแบตเตอรี่มีประจุเต็มดังเดิม การประจุโดยระบบแรงดันคงที่ทำได้โดยการใช้เครื่องประจุหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวกำเนิดโวลต์เตจขึ้นมา แล้วป้อนเข้าแบตเตอรี่ แต่การกำเนิดโวลต์เตจจากเครื่องประจุหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น อาจจะมีโวลต์เตจที่ไม่คงที่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องมีตัวควบคุมโวลต์เตจที่นำมาประจุแบตเตอรี่ ให้คงที่อยู่ตลอดเวลาของการประจุซึ่งตัวนี้เราเรียกกันทั่วไปว่า วงจรเรกกูเลเตอร์ (Voltage Regulator) ดังนั้นวงจรเรกกูเลเตอร์จึงทำหน้าที่ให้แบตเตอรี่ได้รับประจุที่คงที่ และนับเป็นวงจรที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการประจุแบบแรงดันคงที่ และในทำนองเดียวกันถ้าหากแรงดันเรกกูเลเตอร์นี้เสียจะทำให้แบตเตอรี่ได้รับระดับโวลต์เตจที่ไม่ถูกต้องซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่เกิดความเสียหายได้ การใช้วงจรเรกกูเลเตอร์จะมีค่าแรงดันเท่าไรนั้นจะต้องดูที่คู่มือของแบตเตอรี่นั้นๆ เป็นหลัก ในกรณีที่ไม่มีหนังสือคู่มือใช้หลักการดังนี้ คือให้ใช้จำนวนแรงดันในการประจุต่อเซลล์คูณด้วยจำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่ที่ทำการประจุเช่นแบตเตอรี่ 24 เซลล์จะปรับระดับแรงดันของเครื่องประจุเท่ากับ 2.15 คูณ 24 เท่ากับ 51.3 โวลต์ ขณะที่ทำการประจุปกติ



รูปที่ 2.28 ค่าแรงดัน และ กระแสของเครื่องอัดประจุแบบแรงดันคงที่

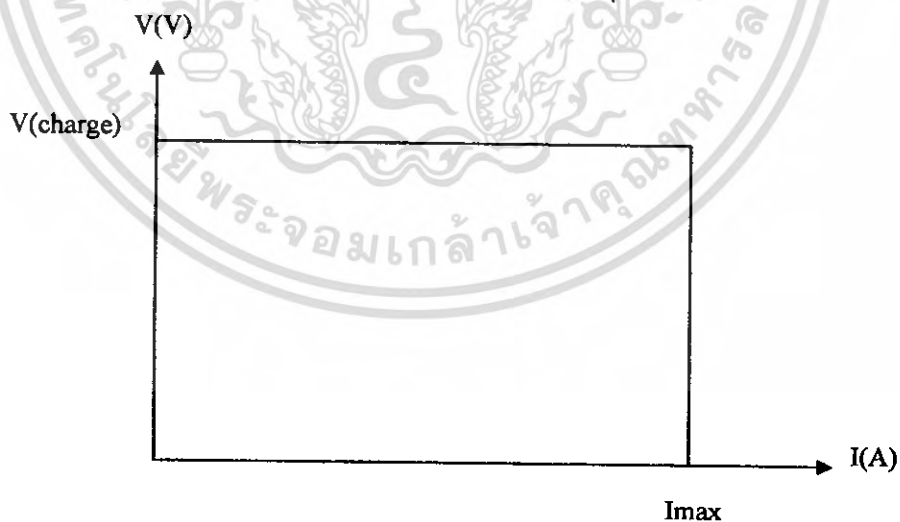
3. การอัดประจุแบบลดกระแส (Tapered Current Charging)

เป็นวิธีอัดประจุแบบเตอรีที่ง่ายไม่ซับซ้อนและราคาถูก วงจรการอัดประจุประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง , วงจรเรกติฟายเออร์ และค่าความต้านทานที่เหมาะสมสำหรับการจำกัดกระแส แต่วิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับการอัดแบบเตอรีแบบตะกั่ว – กรดบีดผนึกเนื่องจากกระแสที่ใช้อัดประจุจะกระเพื่อมตามแรงดันไฟไลน์ (แรงดันไฟฟ้าของระบบ) ซึ่งทำให้แรงดันแบบเตอรีเปลี่ยนแปลงไปด้วยแต่ก็สามารถลดผลอันนี้ได้โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีแรงดันด้านทุติยภูมิสูงกว่าแรงดันแบบเตอรีและเลือกค่าความต้านทานที่เหมาะสมในการจำกัดกระแส โดยที่การอัดประจุแบบนี้สามารถใช้แทนการอัดแบบประจุกระแสคงที่ได้ ไม่เพียงเฉพาะการอัดประจุแบบเตอรีหลายๆ ลูกในครั้งเดียวเท่านั้น ยังสามารถใช้ในระบบ Trickle charge ได้อีกด้วย

4. การอัดประจุแบบรวม (combination Charging or two – step)

วิธีนี้บางทีเรียกว่า “ two – step” หรือ “two – rate ” เกิดจากการรวม 2 วิธี คือ การประจุแบบกระแสคงที่ กับการประจุแบบแรงดันคงที่เข้าด้วยกัน โดยขั้นแรกจะใช้วิธีการอัดประจุแบบกระแสตรงที่คือจะจำกัด และขั้นตอนที่สองเราจะอัดประจุด้วยแรงดันคงที่ การสวิตช์จากขั้นแรกไปยังขั้นที่สองอาจทำได้หลายวิธีเช่น ตรวจสอบแรงดันแบบเตอรี หรือ ควบคุมเวลาในการอัดประจุหรือตรวจสอบกระแสในการอัดประจุเป็นต้น โดยลักษณะการอัดประจุแสดงได้ดังรูปที่ 2.27

จากกราฟในช่วงแรกจะควบคุมให้กระแสคงที่โดยไม่เกินค่ากระแสสูงสุดที่แบบเตอรีจะทนได้เพราะค่าความต้านทานในแบบเตอรีเมื่อคายประจุหมดจะมีค่าต่ำมากทำให้กระแสสูง ในช่วงนี้สังเกตเห็นว่าแรงดันจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามค่าความต้านทานของแบบเตอรีที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งแรงดันเพิ่มถึงระดับที่กำหนดในการชาร์จก็จะเปลี่ยนมารักษาให้แรงดันคงที่แทน ในช่วงนี้กระแสจะค่อยๆ ลดลงจนใกล้เป็นศูนย์แสดงว่าการประจุแบบเตอรีใกล้เต็มแล้ว



รูปที่ 2.29 กราฟกระแสและแรงดันเมื่อทำการชาร์จประจุแบบวิธีรวม

2.12.4 การอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรดโดยทั่วไป

ในการอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดนี้ จะมีการจำกัดกระแสที่ใช้อัดประจุและแรงดันต้องพยายามให้คงที่มากที่สุด ปริมาณกระแสที่ใช้อัดประจุโดยปกติจะจำกัดอยู่ที่ 0.1 C สำหรับ Lead – antimony battery และ 0.3 C สำหรับ Lead – calcium battery เมื่อ C คือความจุแบตเตอรี่ (หน่วย Ampere – hour (Ah)) ถ้าหากการอัดประจุโดยใช้กระแสมากเกินไป จะทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่สูงและทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง และถ้าหากอัดประจุที่กระแสน้อยเกินไปจะทำให้มี Lead – sulfate เกาะหลงเหลืออยู่ในเพลท (plate) ของแบตเตอรี่ ซึ่งจะทำให้การจ่าย Ampere – hour ไม่ได้เท่ากับพิกัดของแบตเตอรี่ และถ้าต้องการให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานยาวนาน แรงดันพีคทูพีค (Peak to Peak) ซึ่งเป็นแรงดัน Output ของอุปกรณ์อัดประจุแบตเตอรี่ควรจะมีค่าไม่เกิน 0.5 % ของแรงดันดีซี ฟิงระลึกเสมอว่า การอัดประจุแบตเตอรี่ที่ค่าพิกัดของแบตเตอรี่ จะสามารถยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้ยาวนานขึ้น

2.13 ระบบหาพิกัดบนพื้นโลก GPS (Global Positioning System)

จีพีเอส (GPS) เป็นระบบหาพิกัดบนพื้นโลกโดยการอ้างอิงจากดาวเทียมที่มีความแม่นยำสูงสามารถใช้หาพิกัดใดๆ บนพื้นโลก ได้ ทุกเวลา ทุกสภาพอากาศ ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีที่เริ่มเข้ามาพบมากในชีวิตประจำวันมากขึ้น มีการนำไปใช้ในกิจกรรมต่างๆ มากมาย เช่น การช่วยวางแผนเดินทางด้วยแผนที่ (โดยรถยนต์) ระบบติดตามตำแหน่งบนพื้นผิวโลก เป็นต้น เนคเทคได้เล็งเห็นความสำคัญจึงให้มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพื้นฐานของจีพีเอส (Core technology) ซึ่งมุ่งเน้นในการพัฒนาออกแบบวงจรรวมพื้นฐานที่ใช้ในระบบจีพีเอส ทั้งในรูปแบบทรัพย์สินทางปัญญา (Intellectual Property) หรือ IP core และการทำเป็นชิปในขั้นสุดท้ายด้วย

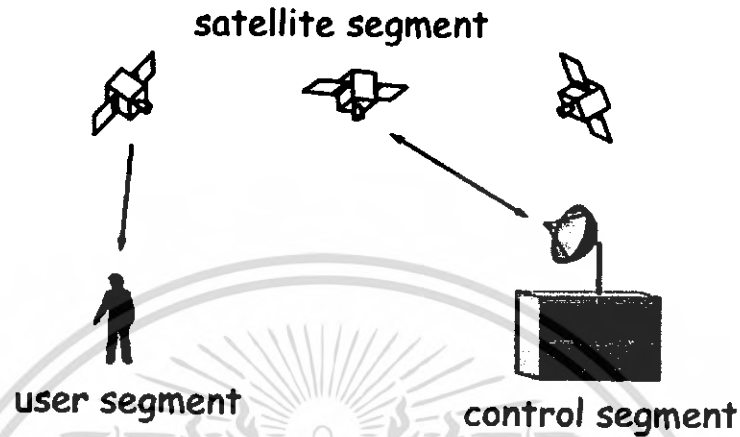
2.13.1 ลักษณะการทำงานของระบบ GPS

ลักษณะทั่วไปของระบบจีพีเอสประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่

1. ส่วนอวกาศ ประกอบด้วยดาวเทียมทั้งหมด 24 ดวง โดยดาวเทียมจำนวน 21 ดวง จะใช้ในการบอกค่าพิกัด ส่วนที่เหลือ 3 ดวง จะสำรองเอาไว้ ดาวเทียมทั้ง 24 ดวงนี้จะมียวงโคจรอยู่ 6 วงโคจรด้วยกัน โดยแบ่งจำนวนดาวเทียมวงโคจรละ 4 ดวง และมีรัศมีวงโคจรสูงจากพื้นโลกประมาณ 20,200 กิโลเมตร (12,600 ไมล์) วงโคจรทั้ง 6 จะเอียงทำมุมกับเส้นศูนย์สูตร (Equator) เป็นมุม 55 องศา

2. สถานีควบคุม ประกอบด้วย 5 สถานีย่อย ทำหน้าที่คอยติดต่อสื่อสาร (Tracking) กับดาวเทียม ทำการคำนวณผล (Computation) เพื่อบอกตำแหน่งของดาวเทียมแต่ละดวง และส่งข้อมูลที่ไต่ไปยังดาวเทียมอยู่ตลอดเวลา ทำให้ข้อมูลที่ไต่เป็นข้อมูลที่ทันสมัยอยู่เสมอ

3. ผู้ใช้ ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนที่ใช้งานด้านพลเรือน (Civilian) และส่วนที่ใช้งานทางการทหาร (Military) ในส่วนของผู้ใช้จะมีหน้าที่พัฒนาเครื่องรับสัญญาณ (Receiver) ให้ทันสมัยและสะดวกแก่การใช้งาน สามารถที่จะใช้ได้ทุกแห่งในโลก และให้ค่าที่มีความถูกต้องสูง



รูปที่ 2.30 ระบบจีพีเอสแบ่งออกเป็นสามส่วน 1. ส่วนอวกาศ 2. ส่วนควบคุม และ 3. ส่วนผู้ใช้

2.13.2 ประโยชน์ส่วนหนึ่งของการใช้งาน GPS

หลักๆ ก็คือสำหรับการค้นหาตำแหน่งที่เราอยู่หรือสิ่งที่เราต้องการตรวจสอบ เราสามารถหาประยุกต์ใช้งานได้แล้วแต่การนำไปใช้ ปัจจุบันที่เรานำไปใช้งานและมีประโยชน์มากมาย ก็คือ เช่นการตรวจสอบรถบรรทุกส่งของ ที่มีการขับไปตามเส้นทางไกล เพื่อให้ทราบว่ารถคันนี้มีปัญหา หรือสูญหายหรือไม่ หรืออาจนำไปใช้งานตอนเข้าไปสำรวจในป่า เพื่อป้องกันการหลงทาง เป็นต้น เราสามารถสรุปการประยุกต์การนำ GPS ไปใช้ ได้ดังนี้

- ระบบนำร่อง (Navigator System)
- ระบบติดตามยานพาหนะ
- สำรวจพื้นที่
- การทำแผนที่

2.13.3 อุปกรณ์ที่นำมาใช้งาน GPS

- PC Navigator
- Pocket PC Navigator
- Tracking

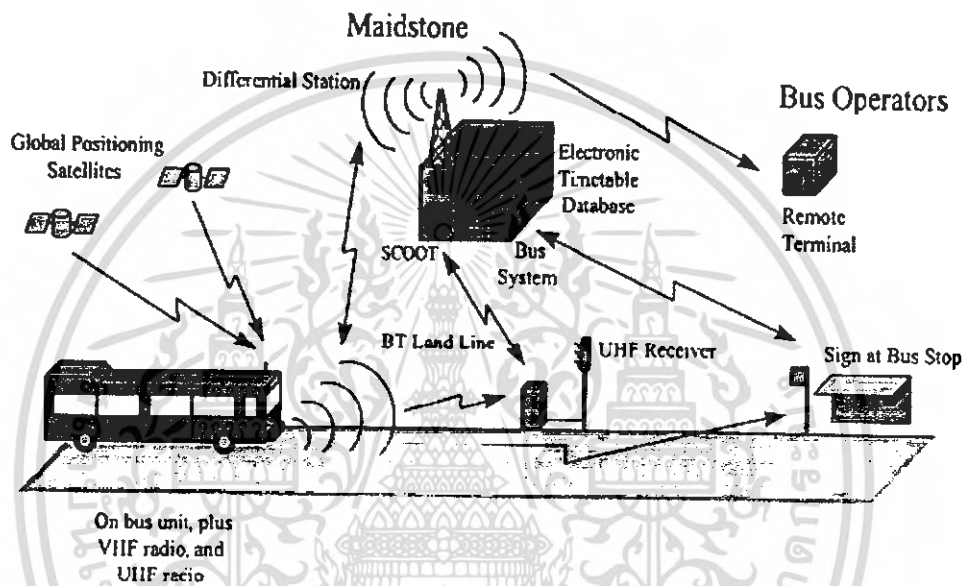
2.13.4 GIS ในงานการติดตามยานพาหนะ

GIS เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการติดตามยานพาหนะหรือ บุคคล (Vehicle or Personal tracking) ปัจจุบันเทคโนโลยีการติดตามตำแหน่งของยานพาหนะ ถูกพัฒนาไปอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวดเร็วทั้งระบบ Wireless และ GPS (Global Positioning System) โดยเฉพาะระบบ GPS มีข้ออย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ส่วนบุคคล เช่น โทรศัพท์พกพา เป็นต้น

GIS ใช้ในการกำหนดตำแหน่งรถประจำทางรถรางไฟฟ้า และ รถขนส่งสาธารณะอื่น ที่ติดตั้งอุปกรณ์ติดตามยานพาหนะ (Automatic Vehicle Locator) โดยเป็นเครื่องมือในการจัดเก็บข้อมูล และ วิเคราะห์ตำแหน่ง เพื่อนำเสนอ ตำแหน่ง เวลาที่รถจะถึงป้าย หรือที่หมายต่างๆ นอกจากนี้ ตำแหน่งของรถแต่ละคันยังใช้ในการจัดการเดินรถอย่างมีประสิทธิภาพ เช่นการให้สิทธิ์แก่รถประจำทาง ถนน ทางแยก การจัดการรถเสริมหรือ การเปลี่ยนแปลงเส้นทางเดินรถแบบทันที เพื่อตอบสนองต่อสภาพการจราจรปัจจุบัน



รูปที่ 2.31 GIS ใช้ร่วมกับ GPS ในการติดตามรถประจำทาง และ รถตุ๊กตุ๊ก

สรุป

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบนั้นต้องใช้ความรู้หลายด้านนำมาประกอบกันเพื่อทำให้เกิดความเข้าใจที่ถูกต้องที่จะนำมาประกอบในการวิจัยซึ่งองค์ความรู้ต่างๆ เหล่านี้ เราสามารถที่จะสืบค้นข้อมูลได้จากหนังสือและปริญญานิพนธ์ต่างๆ และอีกส่วนหนึ่งก็คือการสืบค้นข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต ข้อมูลเหล่านี้จะเป็นพื้นฐานในการดำเนินการเพื่อใช้ในปฏิบัติงานนั้นจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดน้อยที่สุด และจะทำให้การปฏิบัติงานนั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นโดยจะส่งผลต่อความเข้าใจในเรื่องที่ทำอยู่

ในบทนี้ได้กล่าวถึง ทฤษฎีต่างๆ ด้วยกันหลายส่วนได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์เชื้อเพลิง แบตเตอรี่ มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม มอสเฟตกำลัง ระบบหาพิกัดบนพื้นโลก GPS ฟังก์ชันถ่ายโอนของ PWM ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญในการศึกษาวิจัยในบทต่อไป

บทที่ 3

การออกแบบ

ในการคำนวณและการออกแบบนั้นมียุ่ด้วยกัน 2 ส่วนคือ

- การออกแบบคำนวณในวงจรควบคุม Feedback control
- การออกแบบวงจรกำลัง Boost converter

3.1 การออกแบบวงจรควบคุม Voltage and Current Control

3.1.1 สิ่งที่เป็นในการออกแบบวงจรควบคุมกระแส และ แรงดัน

คือ อุปกรณ์ในการขับ Switching หรือ อุปกรณ์ Switch โดยทั่วไปแล้ว การเลือกใช้ อุปกรณ์ ทุกชนิดที่จะนำมาใช้ในวงจรมีความสำคัญมาก เนื่องจากอุปกรณ์ทุกชนิดมีผลต่อการควบคุม กระแสและแรงดันแทบทั้งสิ้น

การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเกตมีให้เราเลือกใช้หลายชนิดหลายแบบ เช่น การใช้ Microcontroller การใช้ IC ที่มีคุณสมบัติในการขับขาเกตต่างๆ ในการออกแบบวงจร Voltage Current Control นี้ใช้ IC เบอร์ TL 494 เนื่องจาก IC TL 494 มีคุณสมบัติสามารถที่จะเปรียบเทียบค่าสัญญาณของแรงดันได้ 2 ชุด โดยมีแรงดันในการเปรียบเทียบ หรือ V_{REF} ที่ขา 14 มีแรงดัน +5 V แล้วเมื่อมีการนำแรงดันต่างๆ มาเปรียบเทียบกับก็จำเป็นที่จะต้องใช้ Voltage Divider ในการลดระดับแรงดันที่จะนำมาใช้ในการเปรียบเทียบ

การกำหนดความถี่ของ TL 494 ก็สามารที่จะหาค่าได้ 2 ลักษณะ คือ จากการคำนวณและจากกราฟ

1. การหาค่าความถี่ของ TL 494 จากการคำนวณโดยใช้สมการ

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

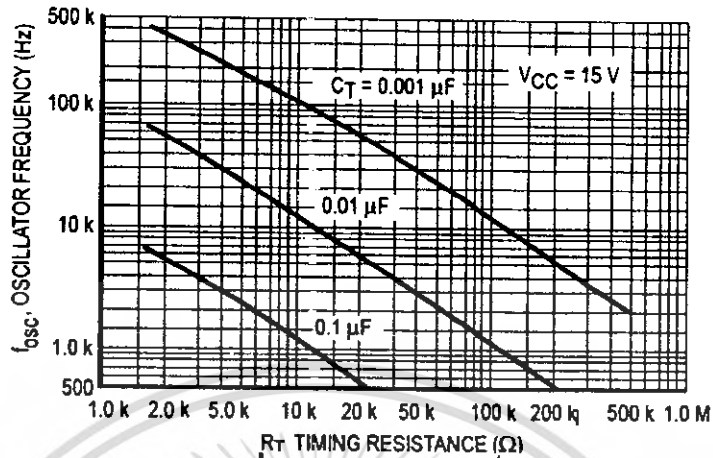
RT = ค่าความต้านทานที่อยู่ที่ขา RT ของ TL 494 เพื่อสร้างความถี่ Oscillator

CT = ค่าของ Capacitor แบบ ไม่มีขั้วใช้เพื่อการสร้างความถี่ Oscillator

F_{osc} = ความถี่ Oscillator ที่จะนำไปใช้สร้างสัญญาณต่างๆ

2. การหาค่าความถี่ของ TL 494 โดยใช้กราฟในการหาสามารถหาได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น

Figure 3. Oscillator Frequency versus Timing Resistance



รูปที่ 3.1 กราฟหาความถี่

3.1.2 การทำงานของ RCD สนับเบอร์

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

ดังนั้นถ้าให้ C มีค่ามากพอ การเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ขาเดรน จะถูกหน่วงออกไป เพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านเพาเวอร์มอสเฟตลดลงจนมีค่าน้อยๆ 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

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

$$= \frac{(20 \times 0.54 \times 10^{-6})}{2 \times 48}$$

$$= 0.125 \mu F$$

เลือกใช้ $0.1 \mu F$ ซึ่งสามารถซื้อได้ในท้องตลาด

$$R = \frac{I_{on(min)}}{2.3C}$$

$$= \frac{(1.6 \times 10^{-6})}{2.3 \times 0.2 \mu F}$$

$$= 3.47 \Omega$$

$$\approx 4 \Omega$$

กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นบน R

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

$$= \frac{(0.2 \mu F \times (2 \times 48))^2}{2 \times 2.5 \times 10^{-5}}$$

$$= 36.8 \text{ W}$$

3.2 การออกแบบ Voltage and Current Control ใช้บูสต์คอนเวอร์เตอร์

บูสต์คอนเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงโซลาร์เซลล์ โดยจะกำหนดแรงดัน input ด้านเข้าเป็น 48 V โดยการนำแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 12 V นำมาอนุกรมกัน 4 ตัว แล้วทำการขนานกัน 4 ตัว ในส่วนของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้จะเป็นชนิด PEMFC ขนาด 1000 W โดยจะให้แรงดันที่ 48 V และกระแสที่ 20 A ในส่วนของทั้ง 2 ส่วนให้ทำการจ่ายแรงดันด้าน Output เป็น 52 V เพื่อให้ได้ค่าแรงดันที่ได้สามารถชาร์จให้กับแบตเตอรี่ได้ โดยในที่จะทำการจ่ายให้กับแบตเตอรี่ ขนาด 6 V จำนวน 16 ลูก และกำหนดให้ค่า Ripple factor น้อยกว่า 1% ในส่วนของตัวรถจะใช้ DC Motor ขนาด 5 kW (6.7 HP) 48 V กำหนดให้ $V_i = 48 \text{ V}$, $R = 5 \Omega$, $f = 40 \text{ kHz}$, $\Delta V_o/V_o < 1\%$
หา Duty ratio

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(1-D)}$$

$$\frac{52V}{48V} = \frac{1}{(1-D)}$$

$$D = 0.08$$

หาตัวเหนี่ยวนำที่ขนาดเล็กที่สุดของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ที่โหมดการทำงานกระแส

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

$$L_{min} = \frac{0.08(1-0.08)^2 \times 5}{(2 \times 40000)}$$

$$L = 4.232 \mu H$$

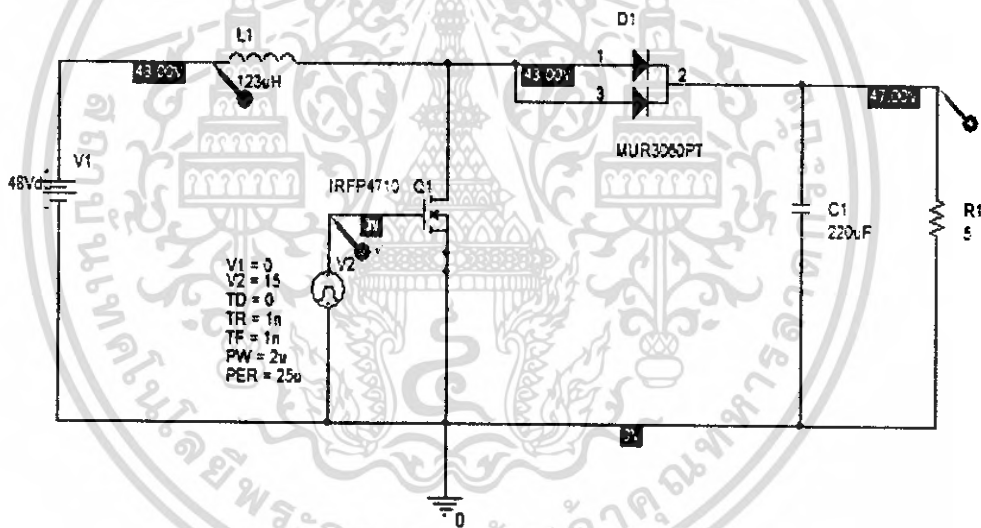
หาตัวเก็บประจุที่ทำให้อัตราลอคคลื่นเท่ากับ 1 %

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf}$$

$$C = \frac{0.08}{(5 \times 40000 \times 0.01)}$$

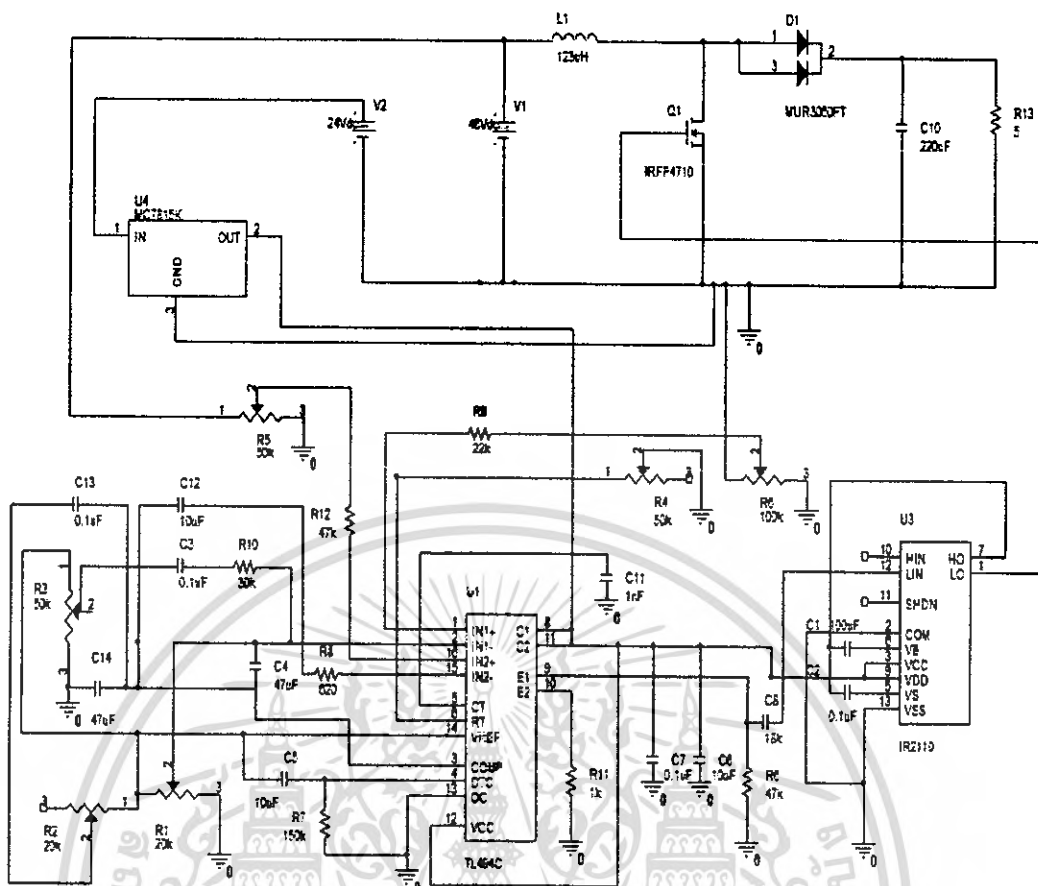
$$C = 40 \mu F$$

วงจรกำลัง

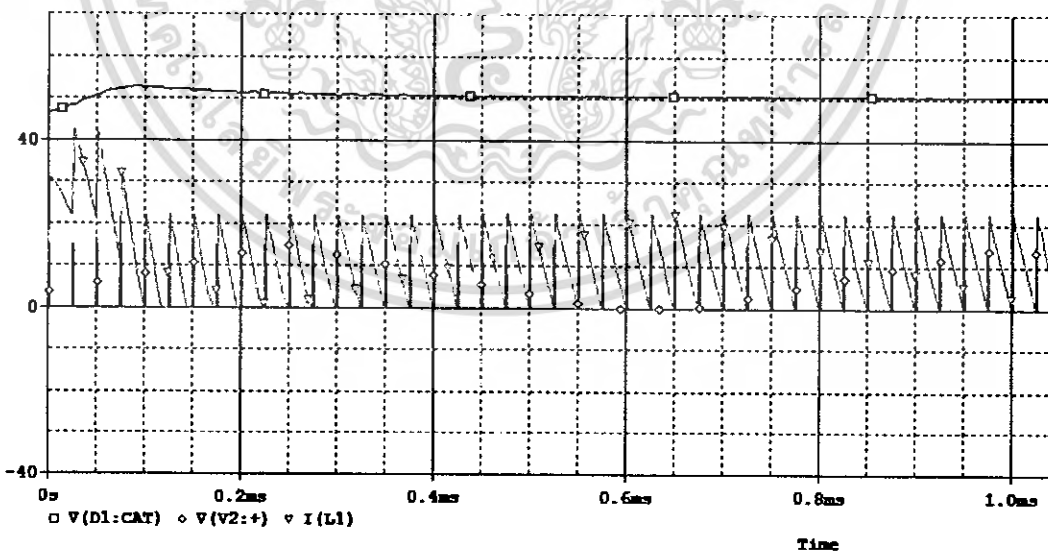


รูปที่ 3.2 รูปวงจร Boost Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

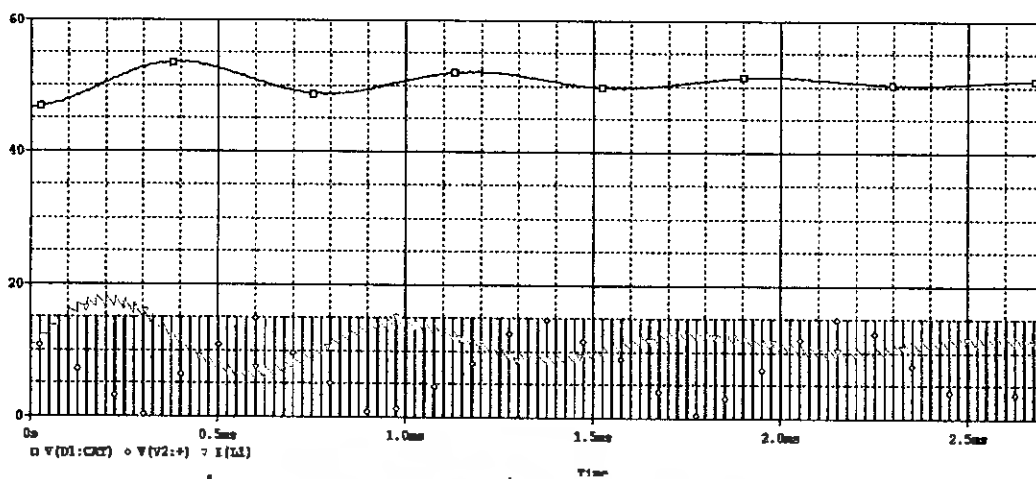


รูปที่ 3.3 วงจรกำลัง Voltage and Current Control โดยใช้ ไอซี TL 494 เป็นตัวควบคุม

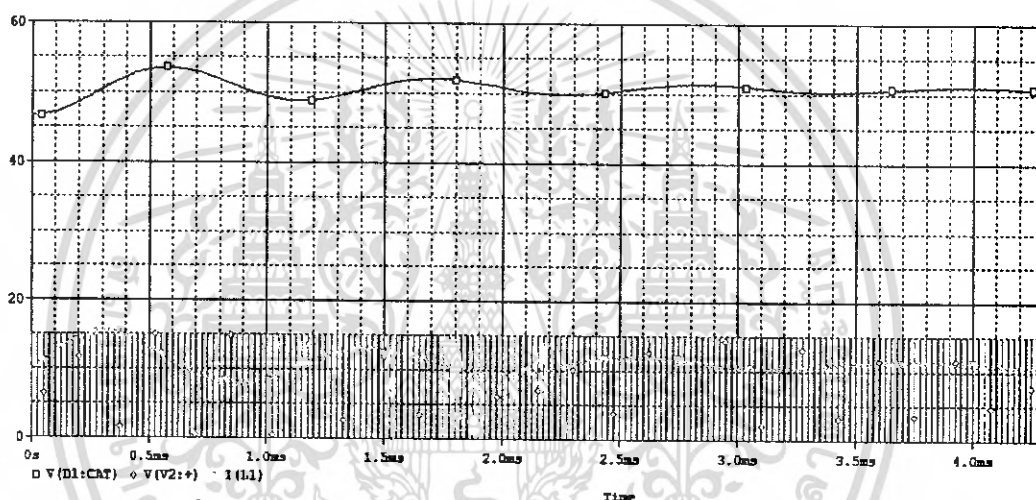


รูปที่ 3.4 ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 4.23\mu\text{H}$ $C = 220\mu\text{F}$

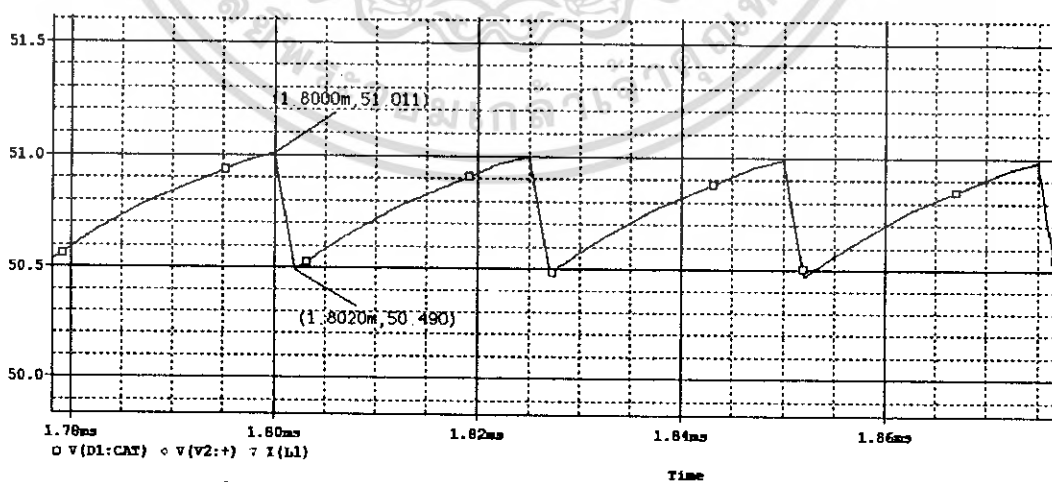
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 60 \mu\text{H}$ $C = 220 \mu\text{F}$

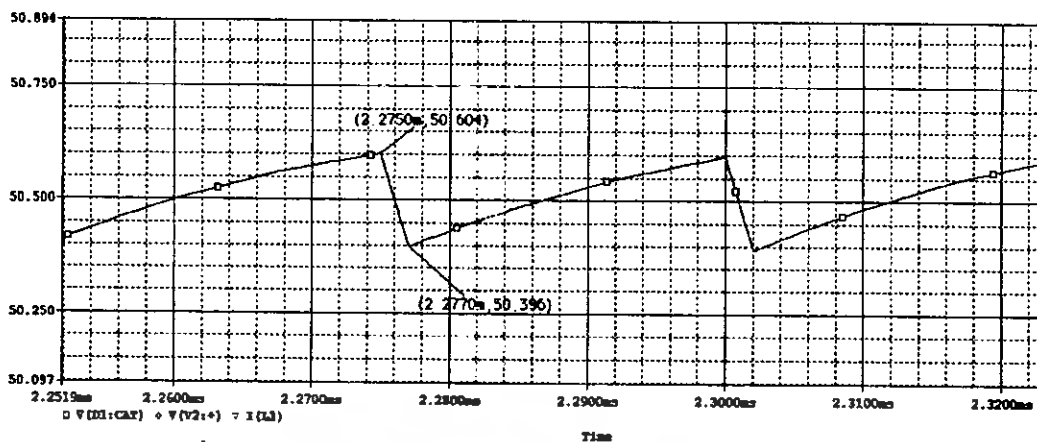


รูปที่ 3.6 ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 123 \mu\text{H}$ $C = 220 \mu\text{F}$

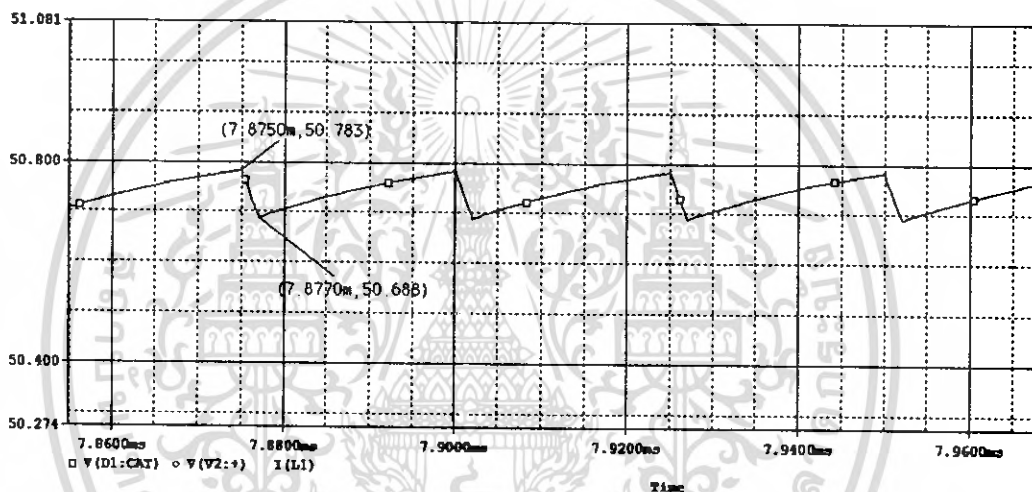


รูปที่ 3.7 ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 123 \mu\text{H}$ $C = 40 \mu\text{F}$

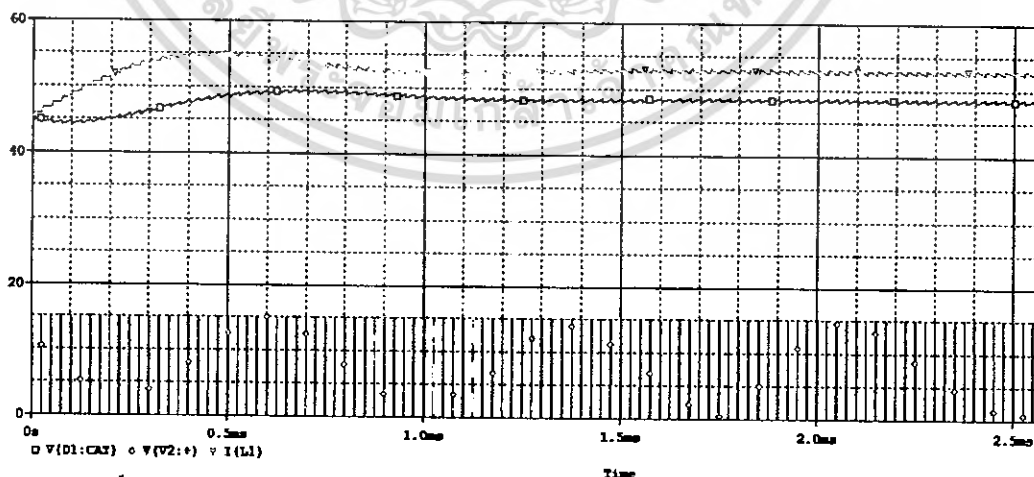
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 123 \mu\text{H}$ $C = 100 \mu\text{F}$

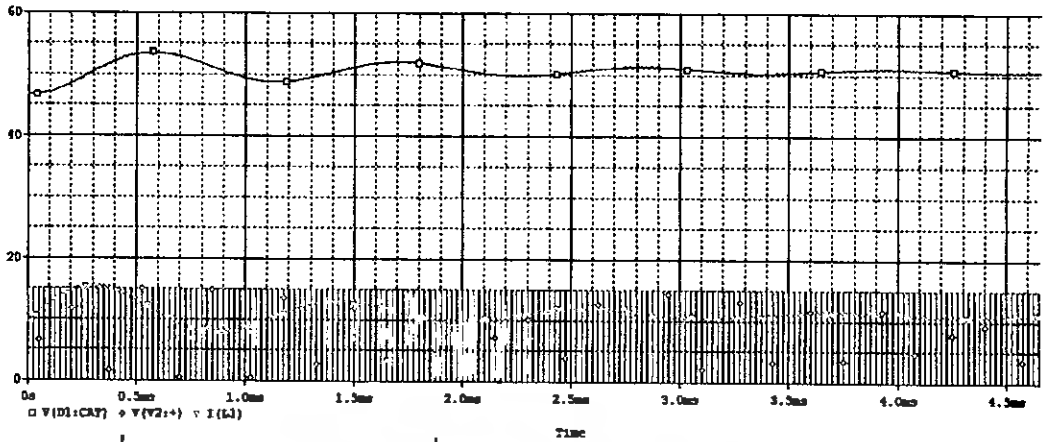


รูปที่ 3.9 ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 123 \mu\text{H}$ $C = 220 \mu\text{F}$

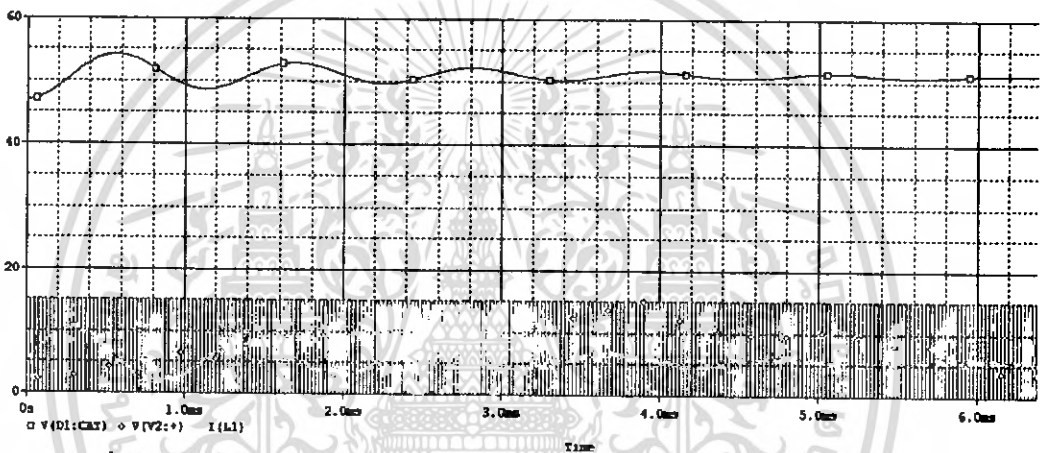


รูปที่ 3.10 ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 123 \mu\text{H}$ $C = 220 \mu\text{F}$ $R = 1 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 123 \mu\text{H}$ $C = 220\mu\text{F}$ $R = 5\Omega$



รูปที่ 3.12 ผลการ Simulation ที่ค่า $L = 123 \mu\text{H}$ $C = 220\mu\text{F}$ $R = 10\Omega$

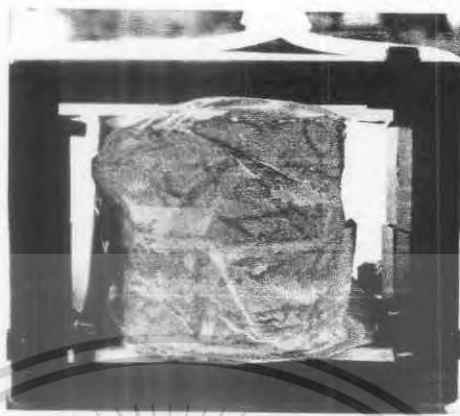
จากการทดลองด้วยโปรแกรม Orcad พบว่าค่า ตัวเก็บประจุที่ได้ควรจะมีค่า $220 \mu\text{F}$ และ L ควรจะมีค่า $123 \mu\text{H}$

จากวงจรวงจรถบัสต์คอนเวอร์เตอร์จึงเลือกใช้ $L = 123 \mu\text{H}$, $C = 220 \mu\text{F}$, $V_i = 48 \text{ V}$, $R = 5 \Omega$

3.2.1 ตัวเหนี่ยวนำ (L) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับโหลด ช่วยและป้องกันการกระชากของกระแส ในช่วงที่ Mosfet off ในที่นี้จึงเลือกใช้ L ขนาด $123 \mu\text{H}$

การเลือกแกนที่เหมาะสมในการใช้งานที่ย่านความถี่สูงๆได้แก่แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite core) เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก การเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์จะมีความหนาแน่นของแกนแม่เหล็กสูงกว่าในแกนอากาศมาก จุดอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็กสูงประมาณช่วง $3000 -$

4000 เกาส์ ค่าการสูญเสีย (core loss) ในแกนมีค่าต่ำสำหรับแกนเฟอร์ไรต์เหมาะจะใช้งานในย่านอุณหภูมิตั้งแต่ -55 ถึง 140 องศาเซลเซียส สำหรับการใช้งานลักษณะงานวงจรกรองสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3.13 รูปตัวเหนี่ยวนำที่ทำกรพันเสร็จแล้ว

ทางแม่เหล็กไฟฟ้านี้ จะเลือกใช้ในรูปแบบวงแหวนเพื่อสร้างตัวเหนี่ยวนำสองตัวร่วมแกนเดียวกันสามารถจะคำนวณเพื่อเลือกใช้แกนตั้งสมการ.....

$$L = A_p N^2$$

เมื่อพิจารณาจากสูตรเมื่อทราบค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการใช้ในวงจรกรองสามารถแทนค่าและได้ A_p และนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลแกนจากผู้ผลิตและเลือกใช้แกนที่เหมาะสม การเลือกใช้ลวดที่จะมาทำการพันตัวเหนี่ยวนำสิ่งที่จะต้องพิจารณาเป็นพิเศษ คือ ขนาดของกระแสที่วงจรกรองรองรับและขนาดหน้าตัดของแกนสำหรับพันลวดได้สูงสุด

การพิจารณาถึงชนิดและย่านความถี่ของตัวเก็บประจุที่ใช้งาน คุณสมบัติของตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ สรุปดังต่อไปนี้

$$L = 123.63 \mu\text{H}$$

$$f = 40 \text{ kHz}$$



รูปที่ 3.14 ค่าที่วัดค่าความเหนี่ยวนำ $L = 123.63 \mu\text{H}$ ที่ความถี่ $f = 40 \text{ kHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ตัวเก็บประจุ (C) เป็นตัวกรองแรงดันขาออกของวงจรกำลังบูสต์คอนเวอร์เตอร์เพื่อช่วยให้ค่า ripple voltage มีค่าน้อย นอกจากนี้ยังทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับโหลดอีกด้วย ในที่นี้ใช้ C ขนาด 220 μ F 100V

ตารางที่ 3.1 พิกัดและชนิดของตัวเก็บประจุที่ใช้โดยทั่วไป

ชนิด	ความจุไฟฟ้า	พิกัดแรงดัน	การประยุกต์ใช้งาน	ย่านความถี่
เซรามิก (Ceramic)	10pF – 1 μ F	50V – 30kV	ราคาไม่แพงและใช้กับงานทั่ว ๆ ไป	500Hz – 500 MHz
สองชั้น (Dubble layer)	0.1 – 1F	1.5 – 6 V	สำรองสำหรับหน่วยเก็บความจำ(memory backup)	ต่ำกว่า 1 kHz
อิเล็กโทรไลติก (Electrolytic)	0.1 μ F – 1.6 μ F	3 – 600 V	วงจรกรองแหล่งจ่ายกำลังสวิตซิ่ง	ต่ำกว่า 1 kHz
แก้ว (glass)	10-1000 pF	100-600 V	วงจรความถี่สูง	1 kHz – 5 GHz
ไมก้า(Mica)	1 pF – 0.01 μ F	100-600V	วงจรความถี่สูง	1 kHz – 5 GHz
ไมลาร์ (Milar)	1nF - 50 μ F	50-600 V	ราคาไม่แพงและใช้กับงานทั่ว ๆ ไป	500 Hz- 500 MHz
น้ำมัน(Oil)	0.1 – 20 μ F	200v – 10 kV	วงจรกรองแรงดันสูง	ต่ำกว่า 1 kHz
โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate)	100pF - 50 μ F	50 – 800V	คุณภาพสูงและขนาดเล็กกะทัดรัด	Dc – 1000MHz
โพลีโพรพิลีน (Polypropylene)	100pF - 50 μ F	100 – 800V	คุณภาพสูงและ dielectric absorption มีค่าต่ำ	Dc – 1000MHz
โพลีสทีรีน	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

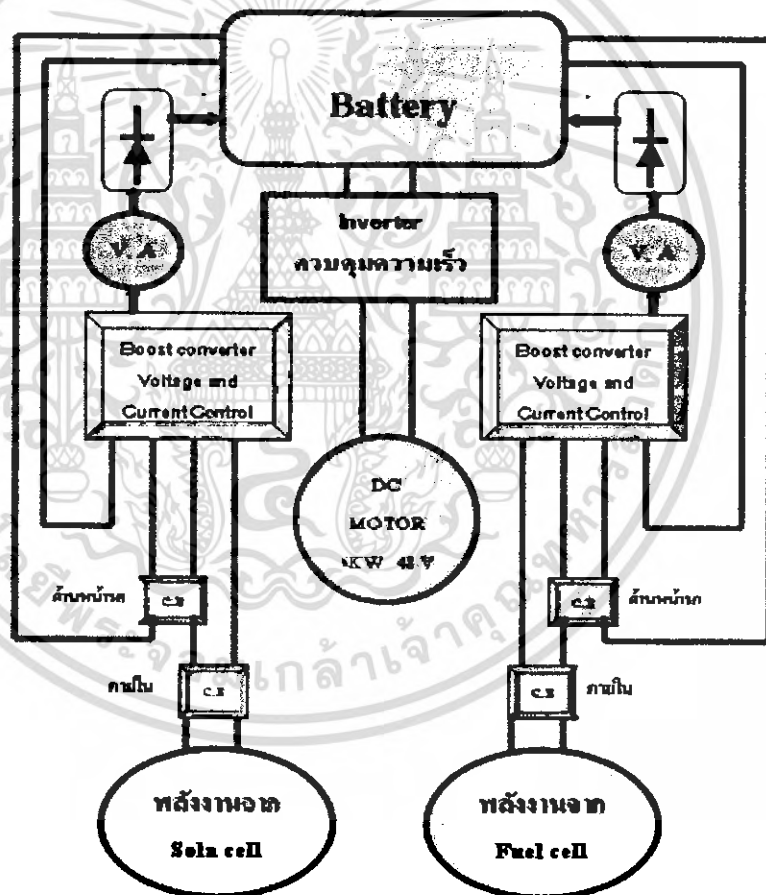
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1(ต่อ) พิกัดและชนิดของตัวเก็บประจุที่ใช้โดยทั่วไป

ชนิด	ความจุไฟฟ้า	พิกัดแรงดัน	การประยุกต์ใช้งาน	ย่านความถี่
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) ทำหน้าที่ในการสวิตซ์ไฟเข้าสู่โหลดโดยได้รับสัญญาณควบคุมจากส่วนขยายสัญญาณ โดยในที่นี้จะเลือกใช้ Power Mosfet เบอร์ IRFP 4710

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



รูปที่ 3.15 วงจรในการผสมผสานพลังงานทั้ง 3 แหล่งพลังงานเข้าด้วยกันในรถไฟฟ้า Hybrid Car

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป

จากการออกแบบในบทนี้ได้มีการออกแบบในหลายส่วนของวงจร โดยแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆได้ดังนี้ คือ

1. ออกแบบวงจรควบคุมเป็นการออกแบบการควบคุม Duty มีหลักการทำงานคือสามารถปรับลดหรือเพิ่ม Duty ได้โดยอัตโนมัติโดยขึ้นอยู่กับ แรงดันและกระแสที่แปรเปลี่ยนไปด้วยในกรณีต่างๆ เช่นแรงดันตกก็จะทำให้ Duty มีช่วง on ที่มากขึ้นทำให้คงที่แรงดันไว้ได้ตามที่ต้องการ หรือ กระแสขาเข้ามามากเกินไป ก็จะทำการคงที่ค่ากระแสไว้ที่ limit ที่ต้องการควบคุมไว้

2. ออกแบบวงจรกำลัง หรือเรียกอีกอย่างว่า Boost converter ออกแบบให้สามารถทนกระแสไฟฟ้าได้ที่ 20 A และสามารถทนแรงดันให้ได้อยู่ที่ 100 V

จากการออกแบบเราต้องใช้ความรู้พื้นฐานในวิชา Power Electronic เข้ามาช่วยในการออกแบบซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องมีความรู้ความเข้าใจเรื่องนี้ โดยเฉพาะวงจร Boost Converter และ PWM

ในการออกแบบนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมากเพื่อเป็นพื้นฐานในการสร้างวงจร Voltage and current control หากไม่มีการคำนวณและการออกแบบที่ถูกต้อง หรือออกแบบผิดการดำเนินงานนั้น ก็จะเกิดอุปสรรคหรือปัญหาตามมาภายหลังหรืออาจแก้ไขได้ยุ่งยาก

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การทดสอบในบทนี้เป็นการนำเอาชุดควบคุม Voltage and Current control มาทำการทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรง โดยมีอยู่ด้วยกันอยู่ 2 ส่วนคือ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และ แบตเตอรี่ (Battery) โดยทดสอบกับโหลดด้วยกัน 2 ครั้งคือ ทดสอบเบื้องต้นกับโหลดที่เป็น R ก่อน แล้วจึงนำไปทดสอบกับโหลดที่เป็นรถไฟฟ้าจริงขณะขับเคลื่อน

โดยแบ่งทำการทดสอบดังตารางดังนี้

ตารางที่ 4.1 ทดสอบเบื้องต้นกับโหลด R

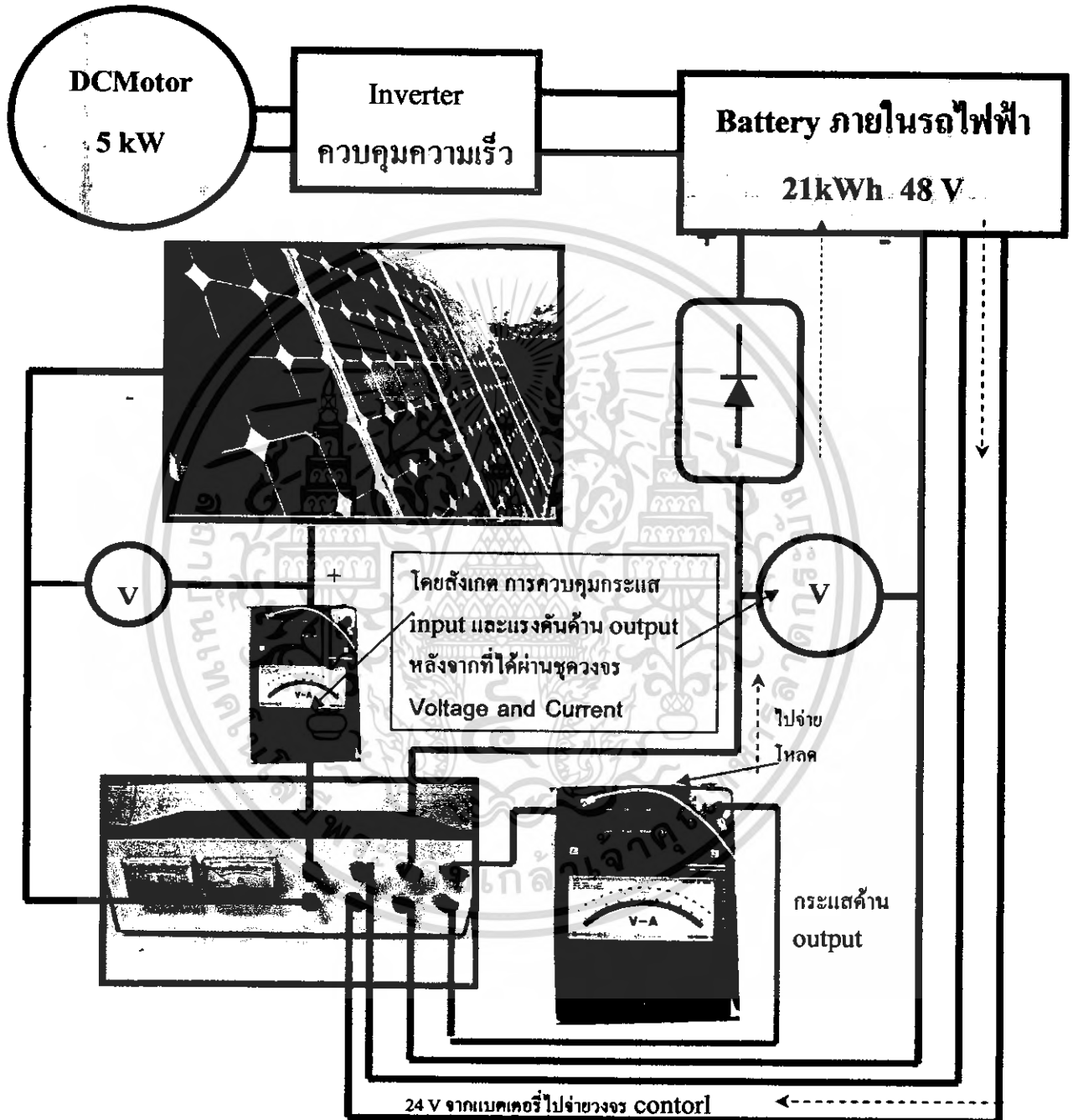
ทดสอบ	แหล่งจ่าย	เงื่อนไข	โหลดR
ครั้งที่1	12V, 24V, 36V	ควบคุมแรงดันขาออกที่ 51V คงที่	เปลี่ยนแปลง
ครั้งที่2	24V, 36V, 48V	ควบคุมกระแสขาเข้าไม่เกิน 15 A	เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.2 ทดสอบกับโหลดที่เป็นรถไฟฟ้าโดยทดสอบขณะรถวิ่ง

ทดสอบ	แหล่งจ่าย	เงื่อนไข	โหลด
แหล่งจ่าย Solar cell จ่ายโดยตรง	48V	ไม่ควบคุม	เปลี่ยนแปลงตามอัตราเร่งโดยเทียบกับเวลา(s)
แหล่งจ่าย Solar cell จ่ายผ่านชุดควบคุม	48 V	ควบคุมกระแสขาเข้าไม่เกิน 18A และแรงดันขาออกคงที่ 51V	เปลี่ยนแปลงตามอัตราเร่งโดยเทียบกับเวลา(s)
แหล่งจ่าย battery จ่ายโดยตรง (ใช้ทดสอบแทน Fuel cell)	48 V	ไม่ควบคุม	เปลี่ยนแปลงตามอัตราเร่งโดยเทียบกับเวลา(s)
แหล่งจ่าย battery จ่ายผ่านชุดควบคุม (ใช้ทดสอบแทน Fuel cell)	48 V	ควบคุมกระแสขาเข้าไม่เกิน 18A และแรงดันขาออกคงที่ 51V	เปลี่ยนแปลงตามอัตราเร่งโดยเทียบกับเวลา(s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) ทดสอบขณะรถวิ่งโดยมีการนำชุด Voltage and Current Control มาต่อ คือ นำพลังงานจาก Solar cell มาต่อผ่านเพื่อควบคุมก่อนเข้าจ่ายโหลดเพื่อจำกัดหรือควบคุมให้ได้แรงดันและกระแสที่ต้องการ โดยการจ่าย solar cell มาจ่ายเข้านั้นจะทดสอบเริ่มที่รถวิ่งขับโหลดเต็มพิกัด โดยอัตราเร่งเต็มที่ตั้งแต่เริ่มวิ่งจนถึงความเร็วสูงสุดที่รถทำได้



รูปที่ 4.15 การต่อวงจรเพื่อทดสอบการจ่ายพลังงานจาก solar cell โดยมีการต่อชุด Voltage and Current Control เข้าไปจ่ายขณะรถวิ่งขับโหลดเต็มพิกัดด้วยความเร็วสูงสุดไปจนถึงที่รถสามารถทำความเร็วได้

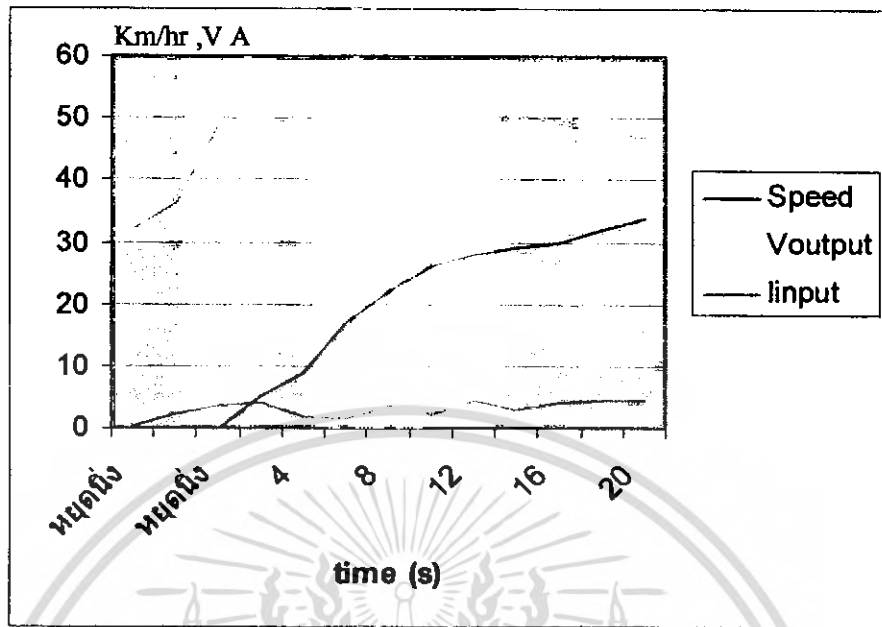
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 การทำการทดสอบโดยการจ่าย Solar cell โดยต่อผ่านชุด Boost converter Voltage and Current Control โดยจ่ายเข้าขณะรถวิ่งขับโหลดเต็มพิกัด โดยอัตราเร่งเต็มที่ ตั้งแต่เริ่มวิ่งจนถึงความเร็วสูงสุดที่รถทำได้

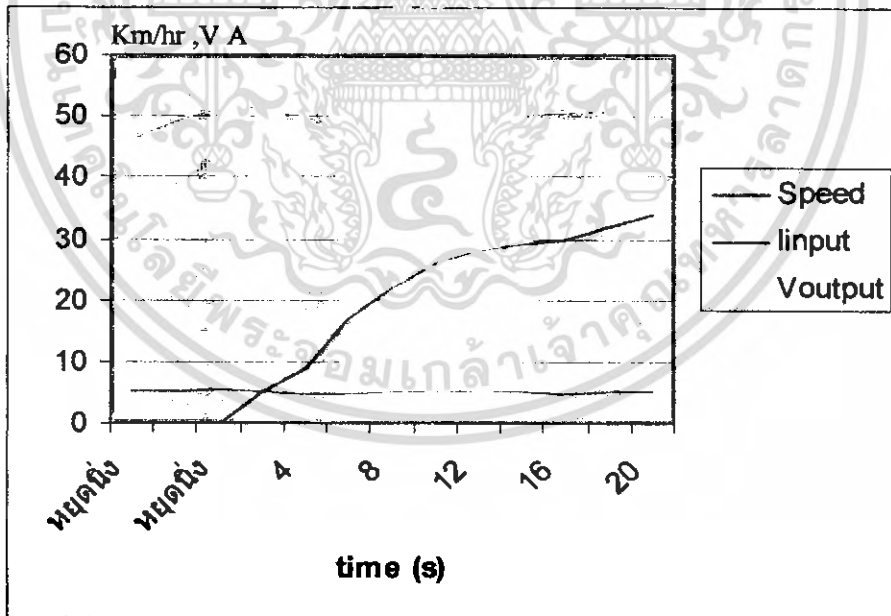
เวลา t ที่เริ่มวิ่ง (s)	speed (km/hr)	V _{input} (V)	I _{input} (A)	V _{output} (V)	I _{output} (A)	Power input (W)	Power Output (W)	η (%) boots convert er
หยุดนิ่ง	0	21.33	5.1	46.4	2.2	108.7	102.18	94
หยุดนิ่ง	0	30.55	5.0	49.5	2.6	152.75	128.7	84
หยุดนิ่ง	0	53.8	5.5	51.7	4.8	269	248.16	92
2	5	48.5	5.0	51.5	4.4	242.5	226.6	93
4	9	49.6	4.8	50.1	4.7	238.2	231.23	96
6	17	49.5	4.9	48.2	4.9	242.5	236.18	96
8	22	50.7	5.0	49.4	5.0	253.5	245	96
10	26	49.1	5.1	49.8	4.8	250.41	239.04	95
12	28	48.2	5.0	50.2	4.7	241.0	235.94	96
14	29	48.1	5.0	50.5	4.66	241.5	235.33	96
16	30	47.7	4.9	50.9	4.5	233.73	229.05	95
18	32	48.0	5.0	51.2	4.45	240	227.84	95
20	34	48.2	5.0	51.6	4.4	241	227.04	93

ประสิทธิภาพของ Boost converter Voltage and Current Control มีค่าเท่ากับ 93.9 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

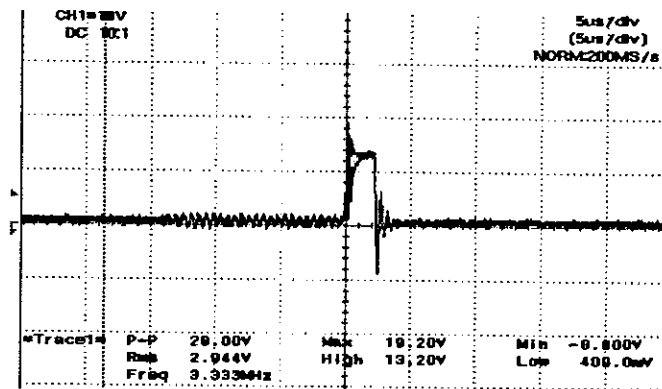


รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสเทียบกับความเร็ว ก่อนผ่านชุด Voltage and Current Control โดยแหล่งจ่ายเป็น Solar cell

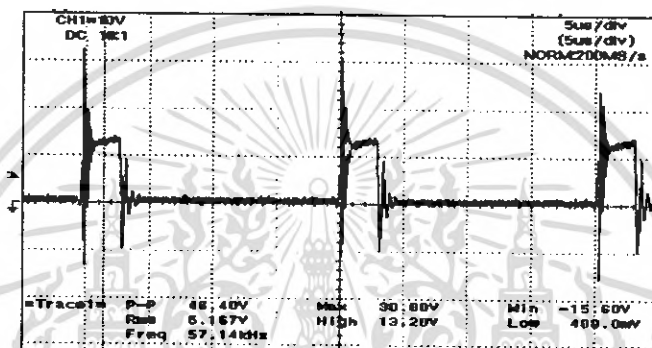


รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสเทียบกับความเร็ว เมื่อผ่านชุด Voltage and Current Control โดยแหล่งจ่ายเป็น Solar cell

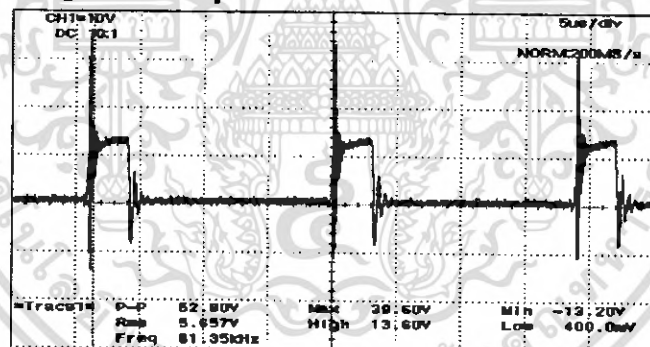
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 รูปสัญญาณพัลส์ขณะรถหยุดนิ่ง



รูปที่ 4.19 รูปสัญญาณพัลส์ขณะรถเริ่มออกตัว



รูปที่ 4.20 รูปสัญญาณพัลส์ขณะรถเริ่มมีความเร็วคงที่

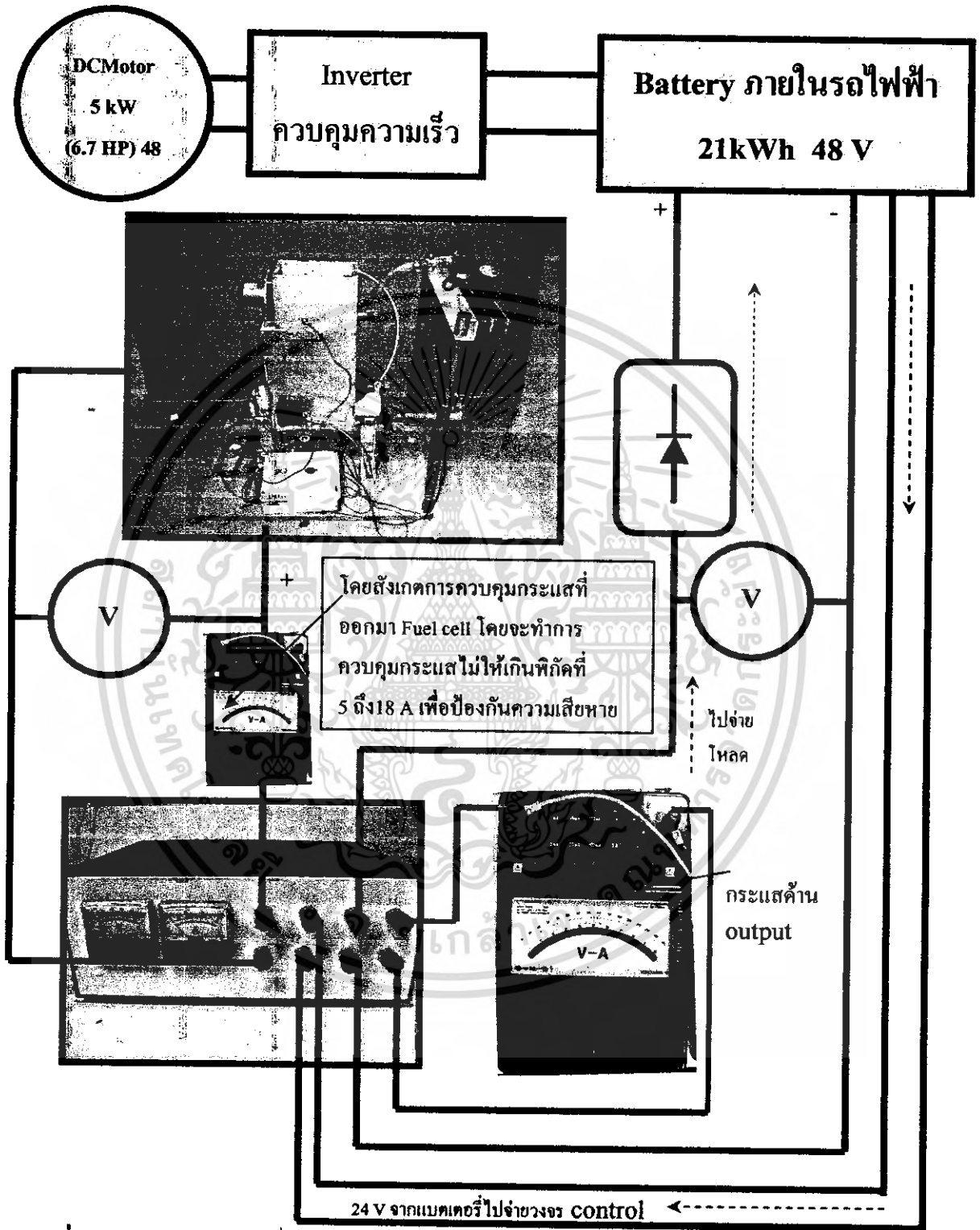
สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบ Solar Cell โดยไม่ผ่านชุด Control จะเห็นได้จากกราฟ 4.16 เป็นกราฟที่ไม่มีความเสถียรภาพ เมื่อรถวิ่งไปในวินาทีต่างๆ ที่ออกสตาร์ท แรงดัน Output ที่จะมาชาร์จเข้า Battery ไม่มีความเสถียรภาพและกระแสที่เข้าสู่ Battery ก็จะไม่มีความเสถียรภาพ โดยจะเป็นรูปคลื่นไม่ตรง

เมื่อทำการทดลองผ่านชุด Voltage and Current Control จะเห็นได้ว่ารูปกราฟที่เห็นได้จากรูปที่ 4.17 จะมีความเสถียรภาพมากกว่าขณะที่ไม่ได้ใส่ชุด Control จึงเป็นข้อดีของชุด Voltage and Current Control ที่สามารถทำให้เกิดความเสถียรภาพขึ้นกับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในการชาร์จ battery ผ่าน Solar Cell

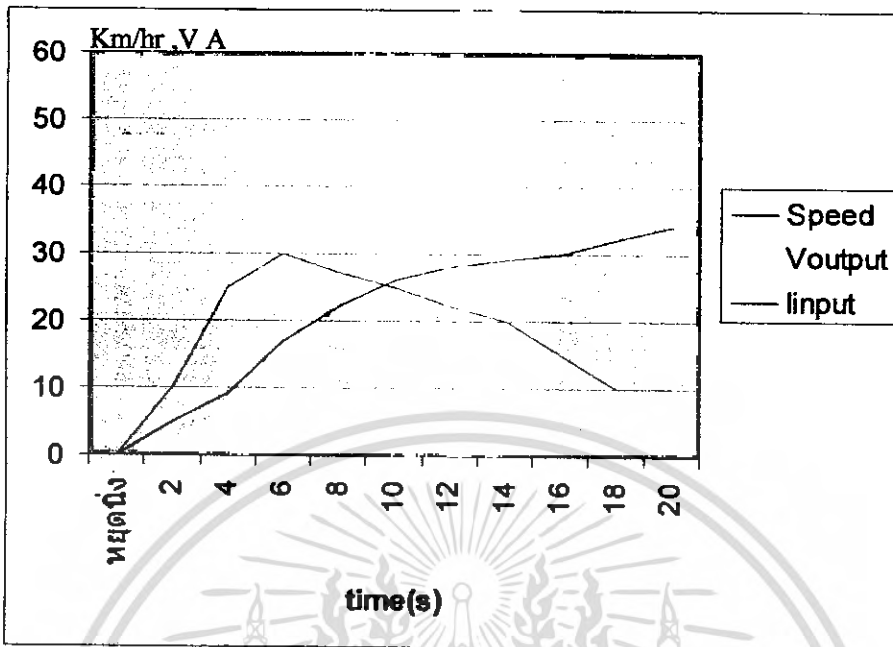
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ทำการทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ในการจ่ายพลังงานให้กับรถไฟฟ้า (ในการทดลองนี้ใช้แบตเตอรี่ 48 V แทนในการทดสอบ)

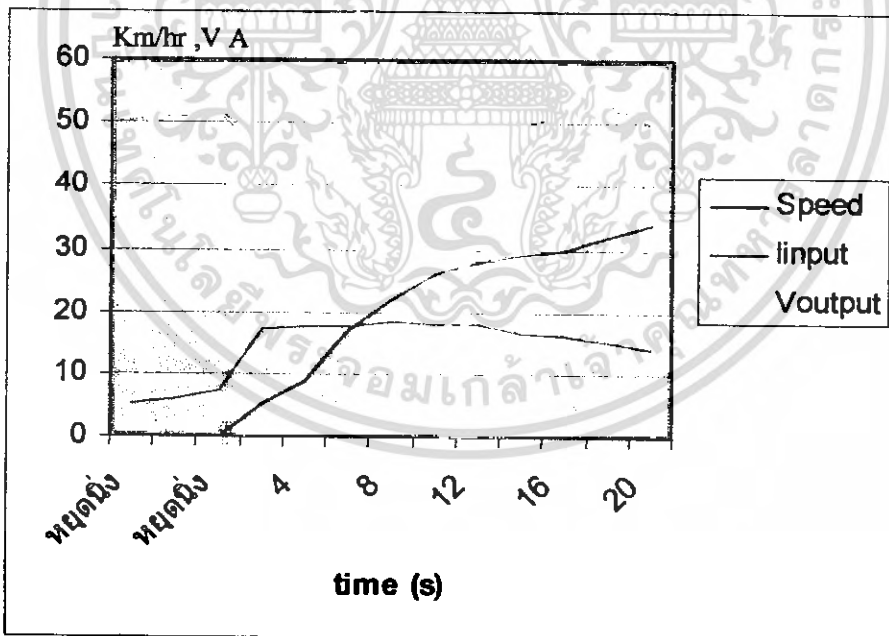


รูปที่ 4.21 การต่อวงจรเพื่อทดสอบการจ่ายพลังงานจาก Fuel cell โดยมีการต่อชุด Voltage and Current Control เข้าไปจ่ายขณะรถวิ่งขับโหลดเต็มพิกัดด้วยความเร็วสูงสุดไปจนที่รถสามารถทำความเร็วได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

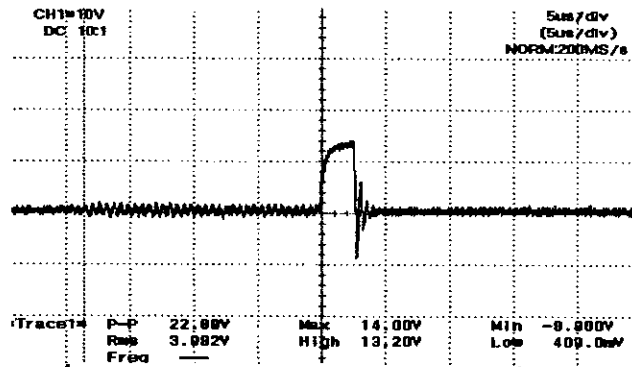


รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสเทียบกับความเร็ว ก่อนผ่านชุด Voltage and Current Control โดยแหล่งจ่ายเป็น Battery

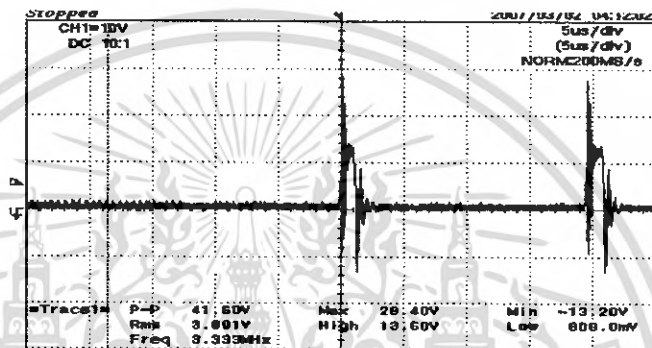


รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสเทียบกับความเร็ว เมื่อผ่านชุด Voltage and Current Control โดยแหล่งจ่ายเป็น Battery

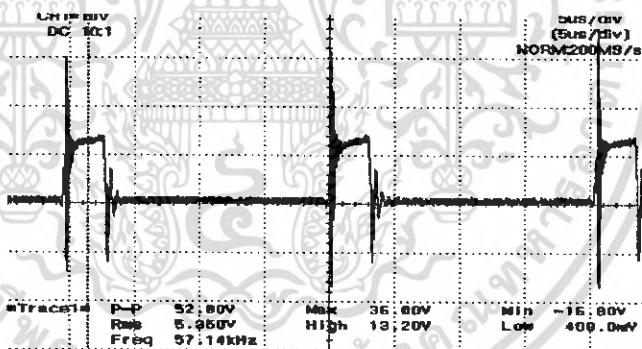
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 รูปสัญญาณพัลส์ขณะรถหยุดนิ่ง



รูปที่ 4.25 รูปสัญญาณพัลส์ขณะรถเริ่มออกตัว



รูปที่ 4.26 รูปสัญญาณพัลส์ขณะรถเริ่มมีความเร็วคงที่

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลอง เป็นการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจาก Battery 48 V และจะชาร์จ Battery บน รถไฟฟ้า 48 V โดยมี 2 การทดลองคือ

1. การทดลองผ่าน ชุด Voltage and Current Control
2. การทดลองแบบไม่ผ่าน ชุด Voltage and Current Control

จากกราฟที่ 4.22 จะเห็นได้ว่ากระแสไม่มีการควบคุมเมื่อเวลาที่ออกรถกระแสสูงมาก ประมาณ 30 A จากกราฟที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าการควบคุมกระแสไม่ให้เป็น 17 A แต่แรงดันจะไม่คงที่ เนื่องจากมีการควบคุมกระแสช่วง Duty On จะน้อยลงทำให้แรงดันไฟฟ้าตกลงไปเรื่อยๆ จน กระทั่งผ่านพ้นช่วง Start ไปแล้ว จะมีค่าแรงดันกลับมากครั้งที่อีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

ในการดำเนินงานพัฒนารถยนต์ไฮบริดอัจฉริยะนั้นได้มีขั้นตอนในการดำเนินงานมากมายหลายประการในส่วนที่ได้พัฒนาไปแล้วคือ

1. ส่วนของระบบอัจฉริยะภายในรถยนต์ซึ่งได้รับความช่วยเหลือจาก ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการติดตั้งระบบนำทางของรถคันนี้และมีระบบที่สามารถเชื่อมต่อกับป้ายรถเมล์ได้ระบุตำแหน่งของรถไม่ว่าจะอยู่ที่ไหนก็ตามมีระยะของความคาดเคลื่อนเพียง 5 เมตรเท่านั้น

2. การทำการติดตั้ง Solar cell เพื่อใช้เป็นพลังงานในการเก็บประจุไฟฟ้าให้กับตัวรถไฟฟ้าเองได้ทำการติดตั้งตัวควบคุม Voltage and Current Control สำหรับป้องกันแรงดันที่ตกลงมาแล้วไม่สามารถที่จะชาร์จแบตเตอรี่ได้ Voltage and Current Control จะช่วยเพิ่มระดับแรงดันให้มีแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นเพื่อนำไปชาร์จแบตเตอรี่ได้

ประสิทธิภาพในการทำงานของวงจร Voltage and Current Control ทำงานโดยอาศัยการ switching ของ มอสเฟตกำลังในการควบคุมและจำกัดการไหลของกระแสและแรงดันซึ่งประสิทธิภาพนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกำลังที่เข้ามาสู่วงจรและขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของโหลด โดยประสิทธิภาพนั้นจะมีค่ามากก็ต่อเมื่อโหนดนั้นมีค่าน้อยทำให้กินกระแสน้อยและประสิทธิภาพจะน้อยลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหนดมาก และเมื่อเราทำการเปรียบเทียบผลการวัดค่าระหว่าง ค่ากระแสที่สามารถชาร์จแบตเตอรี่ของการชาร์จแบตเตอรี่แบบตรง ๆ และระหว่างการชาร์จแบตเตอรี่ผ่านวงจร control จะได้ว่าค่าที่มาจากผลการทดลองครั้งนี้ว่าค่ากระแสที่ได้จากการต่อตรงที่ชาร์จเข้าแบตเตอรี่นั้นจะมีค่า น้อยกว่าค่ากระแสที่ชาร์จเข้าสู่แบตเตอรี่แบบผ่านวงจร control อันเนื่องมาจากค่าความต่างศักย์ของแรงดันไฟฟ้ามีความแตกต่างกันไม่มากพอ วงจร control นี้จึงเป็นวงจรที่กระแสที่ชาร์จเข้าสู่แบตเตอรี่มีค่ามากขึ้นทำให้ระยะเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่มีค่าสั้นลง

การควบคุมกระแสของวงจร Control เป็นการควบคุมกระแสต่อเมื่อกระแสด้าน input มีค่าไม่ให้มากเกินไปกว่าค่าค่าหนึ่งซึ่งเราสามารถที่จะปรับตั้งได้ โดยปกติแล้วการควบคุมกระแสนี้จะนำไปใช้ควบคุมกับ Fuel Cell แต่เนื่องจากว่า Fuel Cell เป็นพลังงานเชื้อเพลิงชนิดใหม่ที่มีความ sensitive สูงจึงยังไม่พร้อมที่จะทำการติดตั้งหลังจากนั้นได้นำการควบคุมนี้มาใช้กับแผง Solar cell พบว่าการทำงานเป็นไปได้ตามต้องการโดยมีการควบคุมทั้งแรงดันขาออกกับกระแสขาเข้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการใช้งานควรรักษาการทำงานของวงจร Voltage and Current Control ให้เข้าใจเสียก่อนอย่าปรับแรงดันอ้างอิงตามความชอบใจเพราะจะทำให้เกิดความเสียหายกับวงจรได้อย่างรวดเร็ว

เมื่อนำเอาชุดวงจร Voltage and Current Control ไปติดตั้งแล้ว จะสามารถรักษาแรงดันและกระแสไม่ให้เกิดพิกัดที่ตั้งไว้ได้ โดยสามารถนำเอารถไปใช้ในงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งในอนาคตควรมีการนำเอามาใช้ให้มากยิ่งขึ้น เพื่อต้องการให้มีการลดใช้พลังงานจากน้ำมัน รวมไปถึงการลดมลพิษทางอากาศและทางเสียง

5.3 สิ่งที่ต้องดำเนินการต่อ

1. ทำการออกแบบวงจร MPPT เพื่อให้สามารถที่จะใช้ประสิทธิภาพของ Solar cell ได้แบบเต็มที่โดยการใช้ Microcontroller ไปใช้ในการควบคุม

2. ทำการติดตั้ง Fuel cell เพื่อเป็นรถพลังงานเชื้อเพลิงคันแรกของประเทศไทยที่ทำการวิจัยโดยนักศึกษาสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics**, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง. 2548
- [2] สุวัฒน์ แซ่ตัน, **เทคนิคการออกแบบสวิชชิงเพาเวอร์ซัพพลาย**, บริษัทสำนักพิมพ์วิชา จำกัด. 2538
- [3] นายเชิงชาญ แก้วอนุชิต, น.ส. ทศน์วรรณ ณ บางช้าง และ นายธงชัย สัจจคงพันธ์, "รถมอเตอร์ไซด์ไฟฟ้า" **ปริญญาพันธวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540.
- [4] Mohan , Undeland and Robins, **Power Electronic** .New York .John Wiley and Son. Inc . 2nd Edition .1995
- [5] N. Mohan, T .M. Underland, and W.P. Robins, **Power Electronics Converter, Application and Design**, John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [6] John A.O' Conner,Unitrode, "**Simple Swith-mode Lead Acid Battery Charger,**" Unitrode data book, 10-260

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

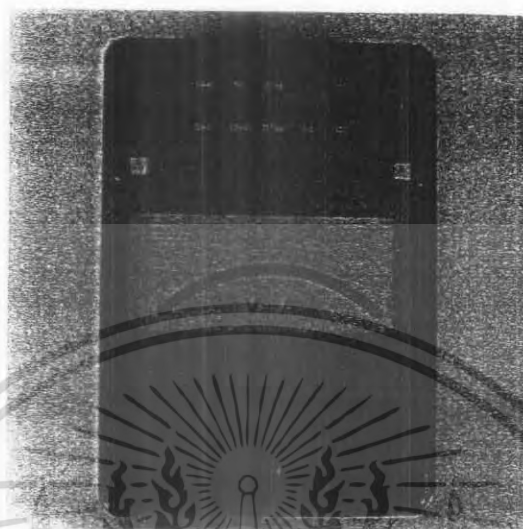
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก



รูปที่ ก-2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-3 โวลต์แอมป์มิเตอร์



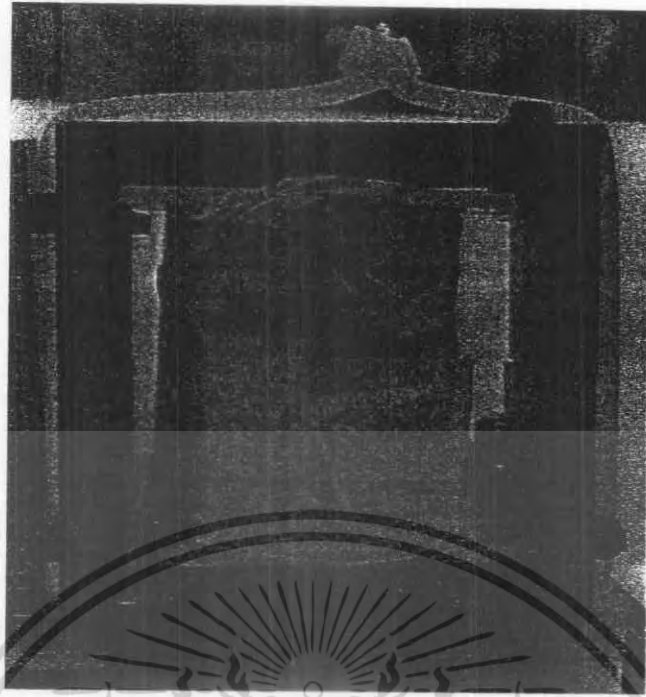
รูปที่ ก-4 ดิจิตอลมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-6 ความต้านทาน 0.003 ohm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-8 MOSFES ที่ใช้ในวงจร

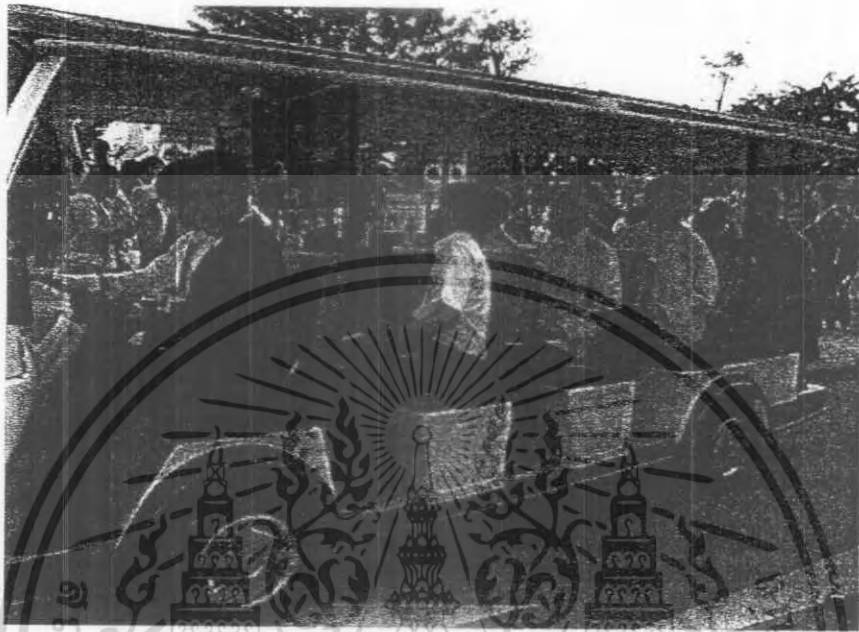
MOSFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-10 Fuel cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-11 รทไฟฟ้าไฮบริดอัจฉริยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ข้อมูลอุปกรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ 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

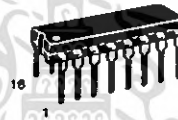
TL494

SWITCHMODE PULSE WIDTH MODULATION CONTROL CIRCUIT

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA



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



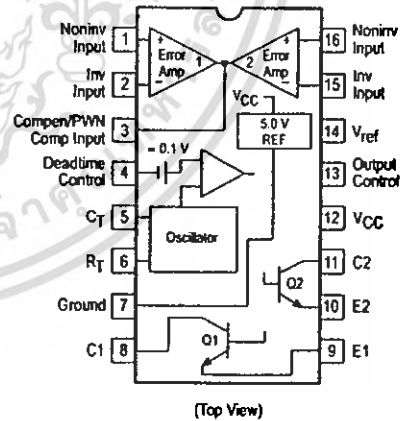
N SUFFIX PLASTIC PACKAGE CASE 648

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.

PIN CONNECTIONS



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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.

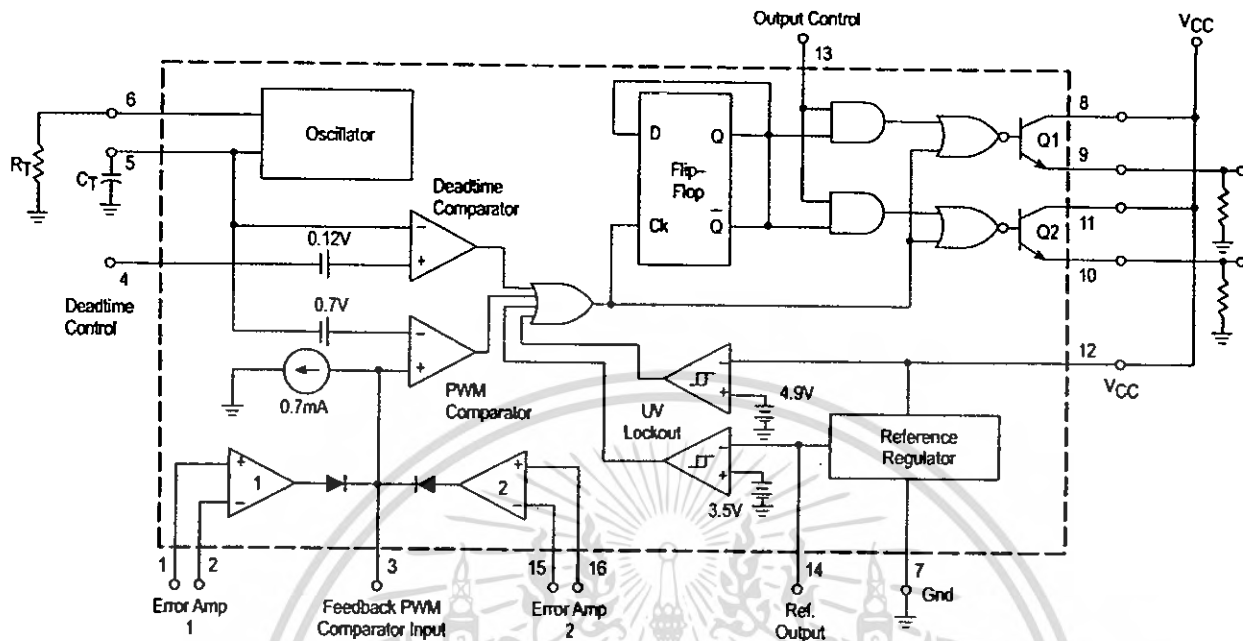
Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
ERROR AMPLIFIER SECTION					
Input Offset Voltage (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	V_{IO}	–	2.0	10	mV
Input Offset Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IO}	–	5.0	250	nA
Input Bias Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IB}	–	–0.1	–1.0	μA
Input Common Mode Voltage Range ($V_{CC} = 40\ \text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	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_{I-}	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* ($C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	σ_{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

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

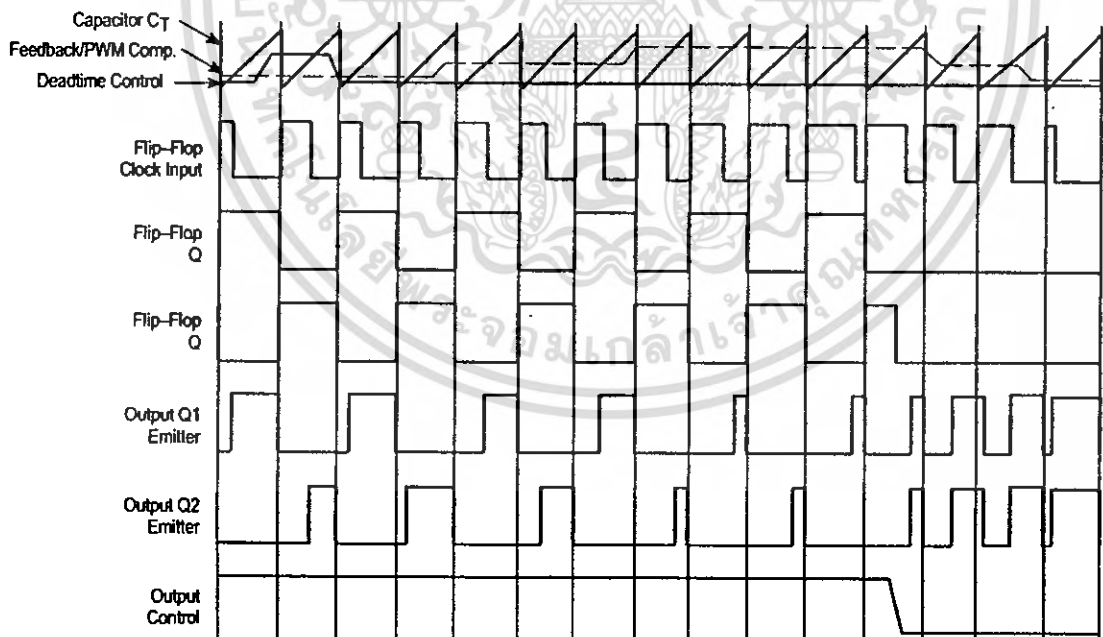
TL494

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

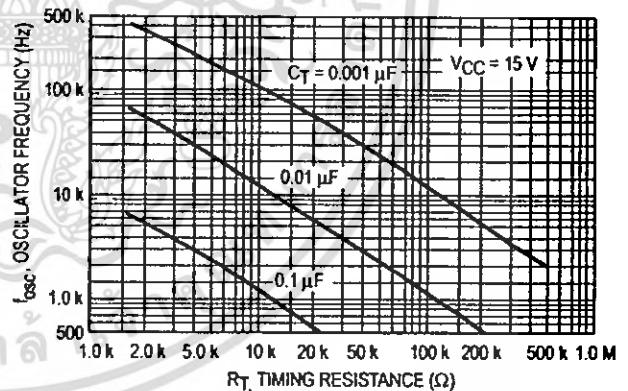


Figure 4. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

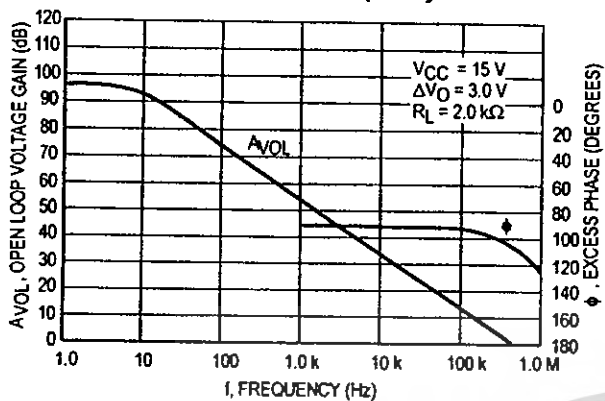


Figure 5. Percent Deadtime versus Oscillator Frequency

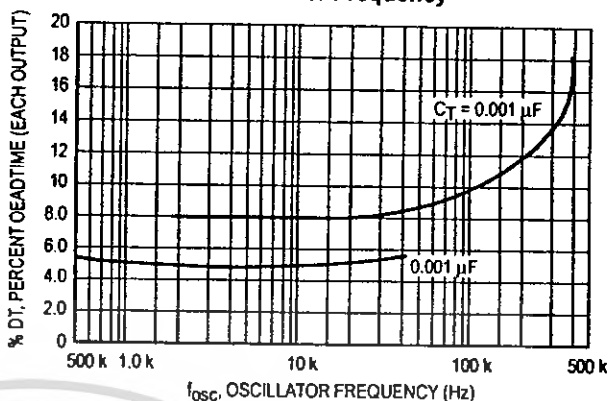


Figure 6. Percent Duty Cycle versus Deadtime Control Voltage

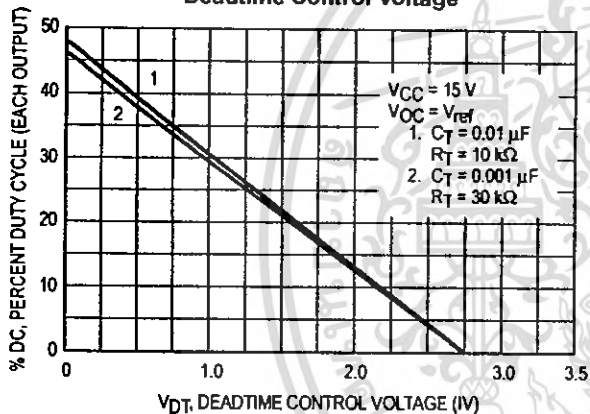


Figure 7. Emitter-Follower Configuration Output Saturation Voltage versus Emitter Current

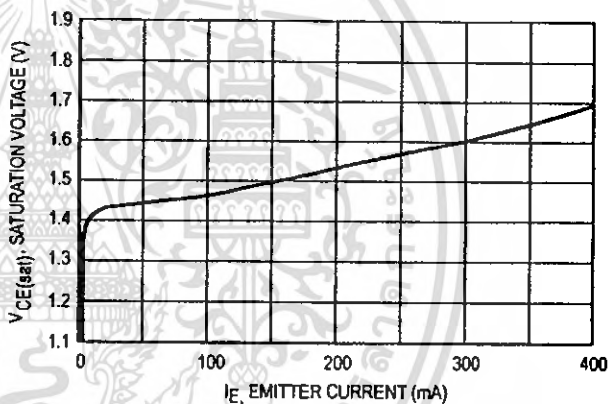


Figure 8. Common-Emitter Configuration Output Saturation Voltage versus Collector Current

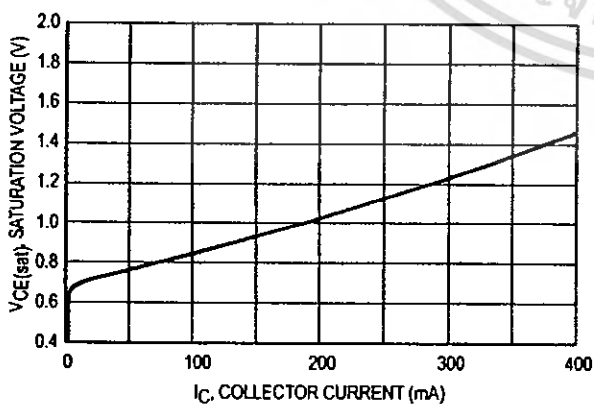


Figure 9. Standby Supply Current versus Supply Voltage

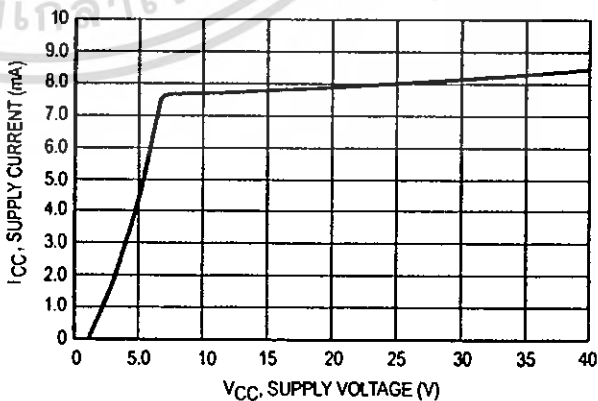


Figure 10. Error-Amplifier Characteristics

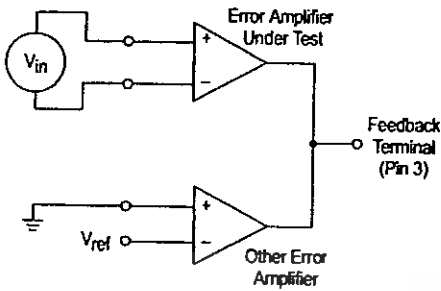


Figure 11. Deadtime and Feedback Control Circuit

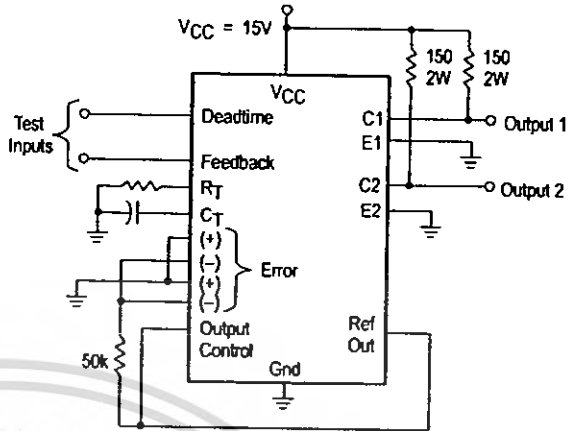


Figure 12. Common-Emitter Configuration Test Circuit and Waveform

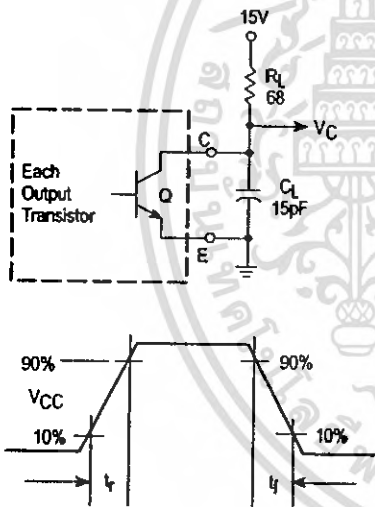
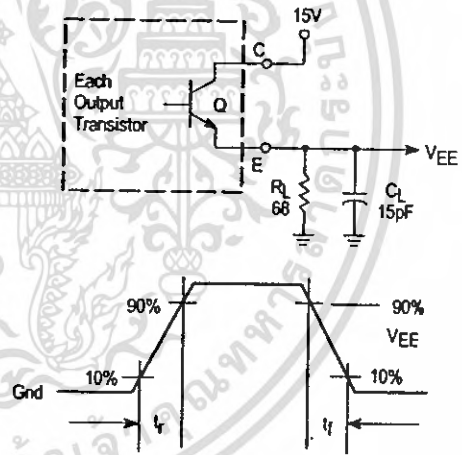


Figure 13. Emitter-Follower Configuration Test Circuit and Waveform



TL494

Figure 14. Error-Amplifier Sensing Techniques

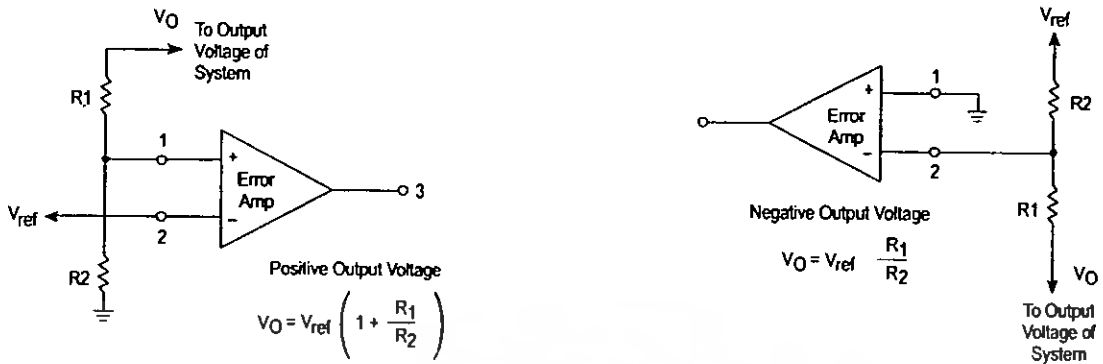


Figure 15. Deadtime Control Circuit

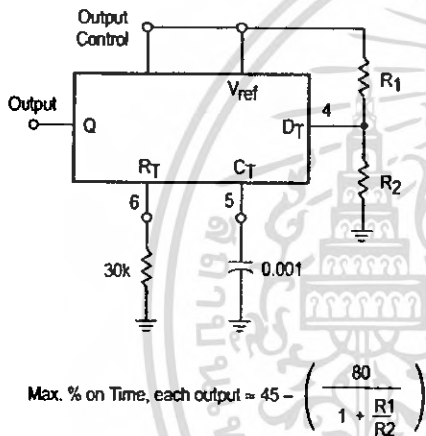


Figure 16. Soft-Start Circuit

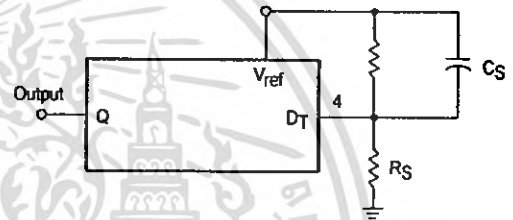
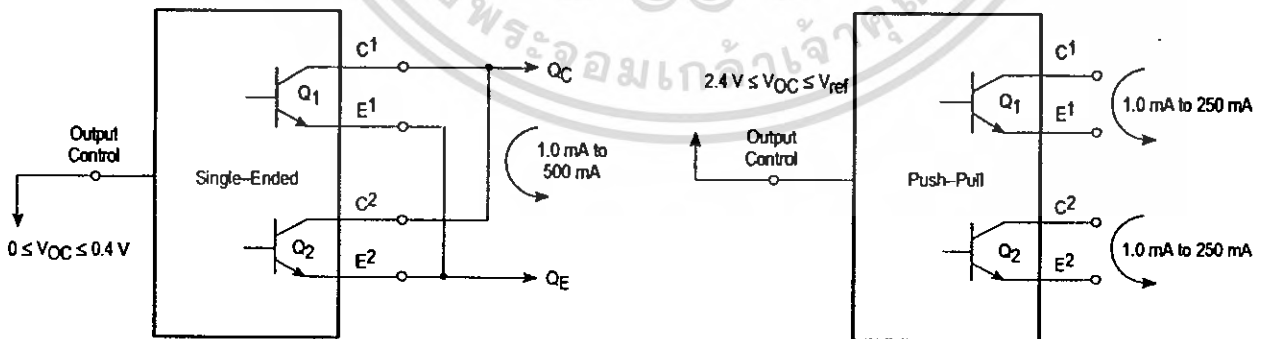


Figure 17. Output Connections for Single-Ended and Push-Pull Configurations



TL494

Figure 18. Slaving Two or More Control Circuits

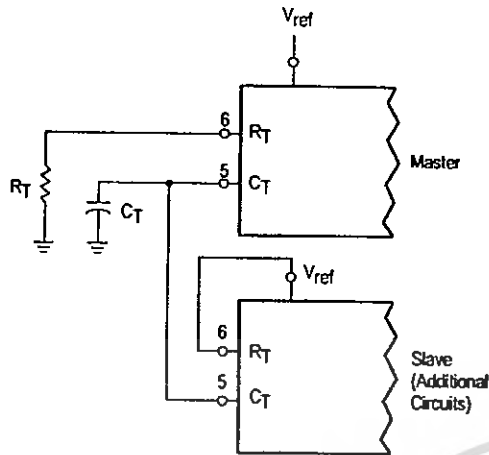


Figure 19. Operation with $V_{in} > 40\text{ V}$ Using External Zener

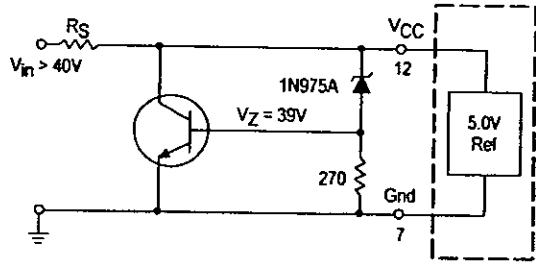
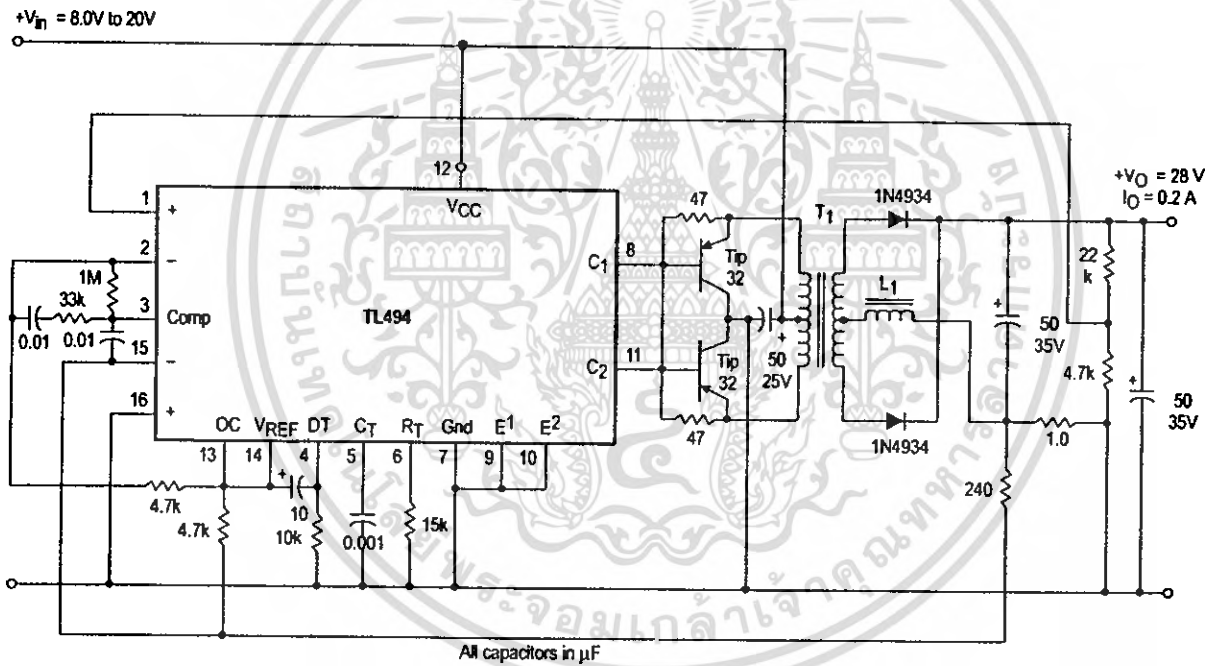


Figure 20. Pulse Width Modulated Push-Pull Converter

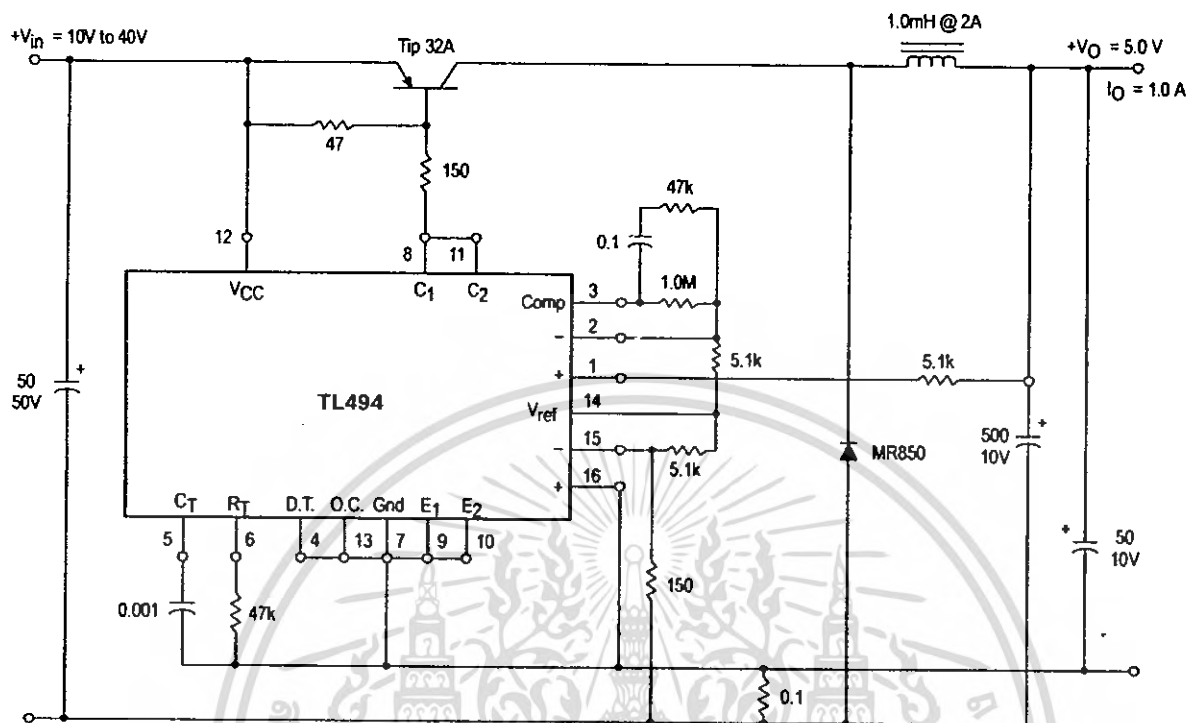


Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 10\text{ V to }40\text{ V}$	14 mV 0.28%
Load Regulation	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ mA to }1.0\text{ A}$	3.0 mV 0.06%
Output Ripple	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ A}$	65 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 28\text{ V}, R_L = 0.1\ \Omega$	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 1406P-L00-3CB

TL494

Figure 21. Pulse Width Modulated Step-Down Converter

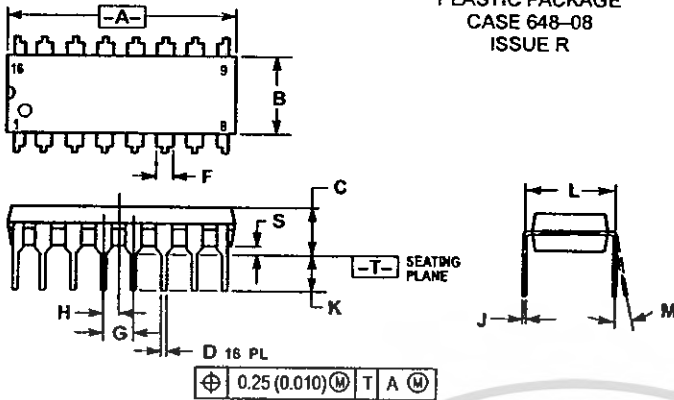


Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 8.0 \text{ V to } 40 \text{ V}$	3.0 mV 0.01%
Load Regulation	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 0.2 \text{ mA to } 200 \text{ mA}$	5.0 mV 0.02%
Output Ripple	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 200 \text{ mA}$	40 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in}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

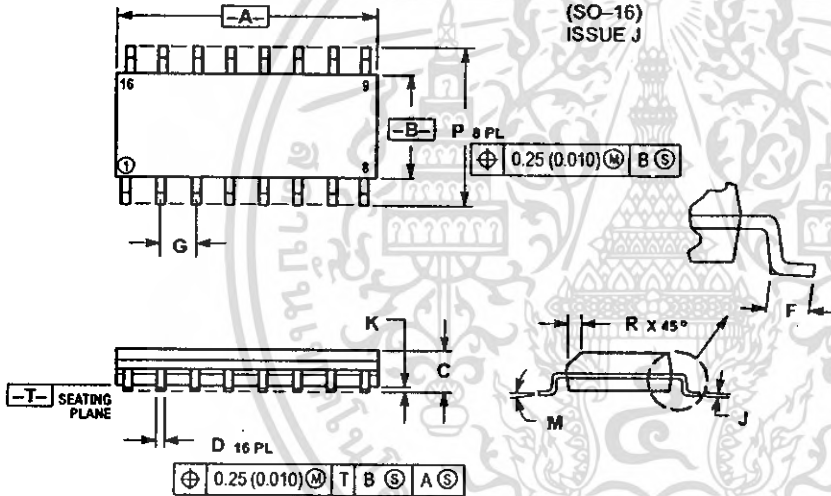


NOTES:

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	0.19	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

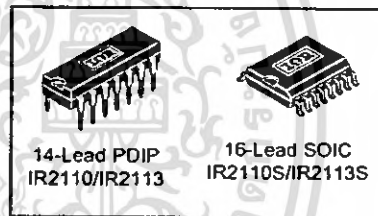
Features

- 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.

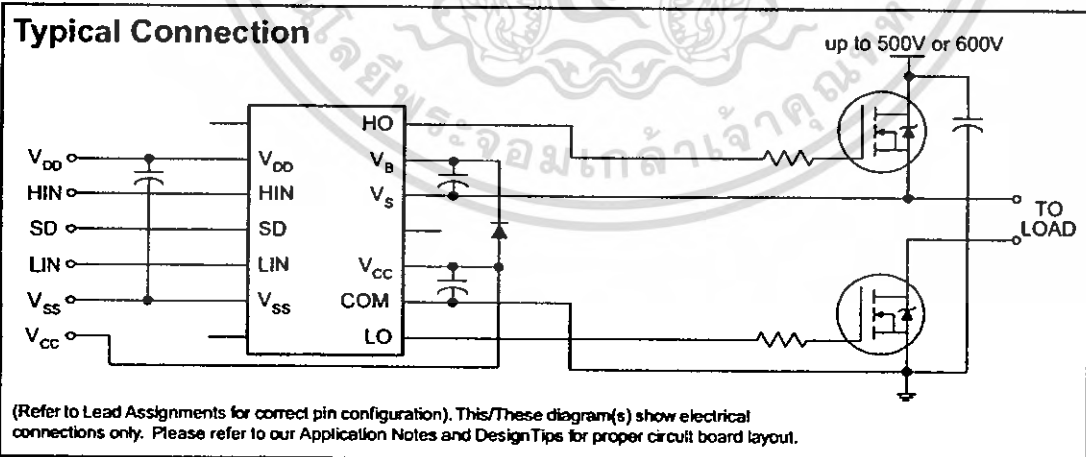
Packages



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.

Typical Connection



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

International
IR 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 _S /dt	Allowable offset supply voltage transient (figure 2)	—	50		V/ns
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	

Note 1: Logic operational for V_S of -4 to +500V. Logic state held for V_S of -4V to -V_{SS}. (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

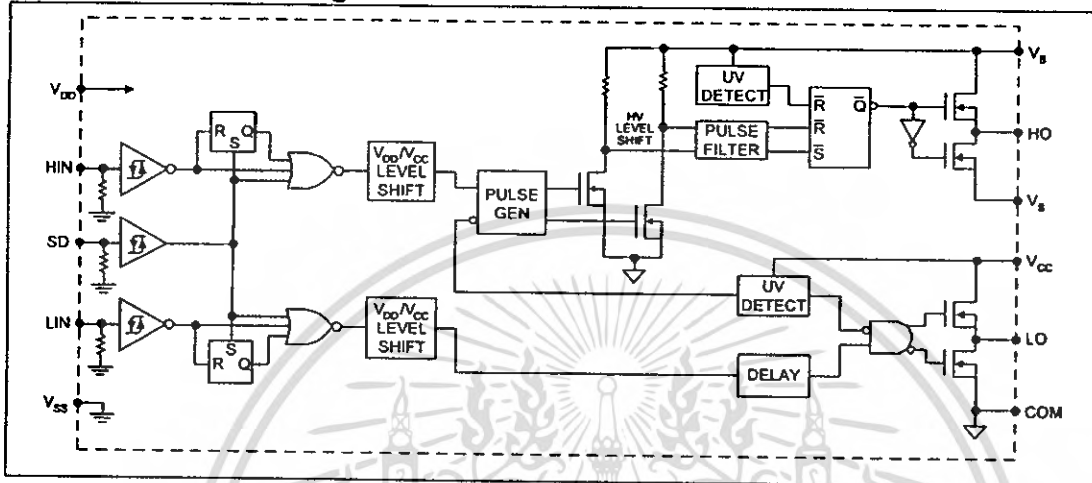
V_{BIAS} (V_{CC}, V_{BS}, V_{DD}) = 15V, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The V_{IN}, V_{TH} and I_{IN} parameters are referenced to V_{SS} and are applicable to all three logic input leads: HIN, LIN and SD. The V_O and I_O parameters are referenced to COM and are applicable to 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	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 ≤ 10 μs
I _{O-}	Output low short circuit pulsed current	27	2.0	2.5	—		V _O = 15V, V _{IN} = 0V PW ≤ 10 μs

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

International
IR Rectifier

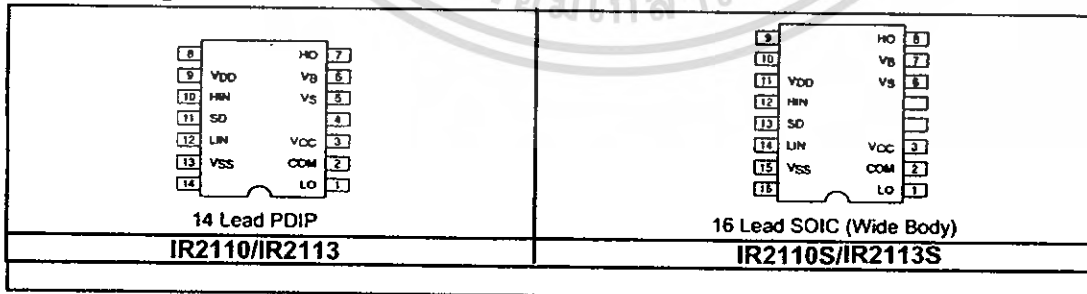
Functional Block Diagram



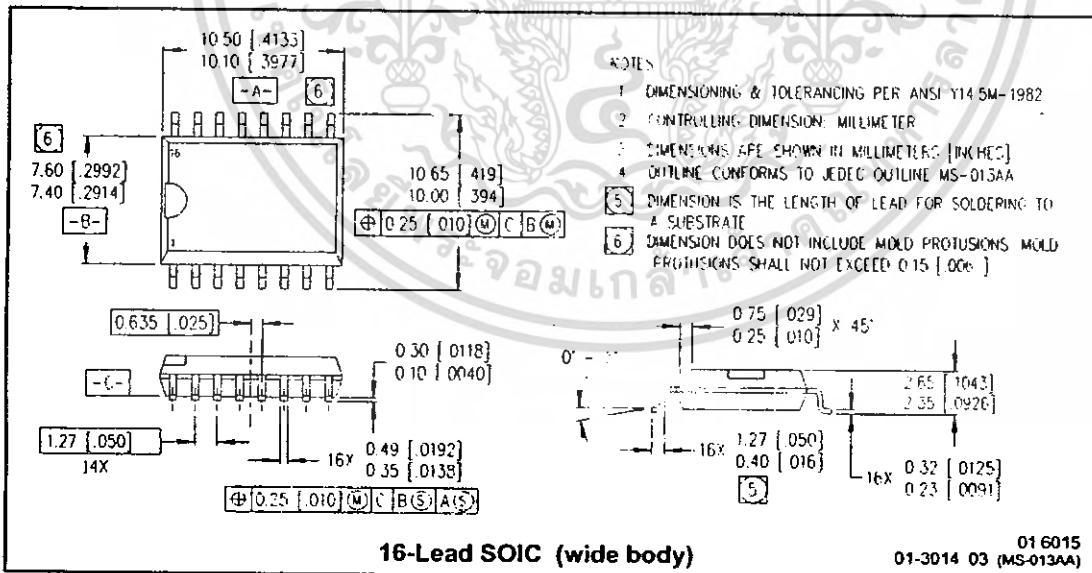
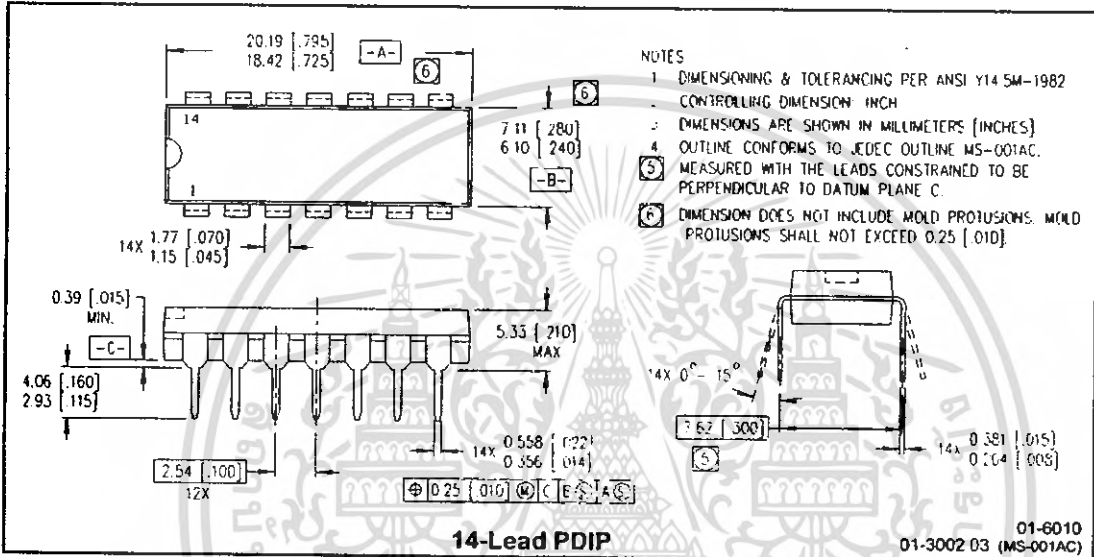
Lead Definitions

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



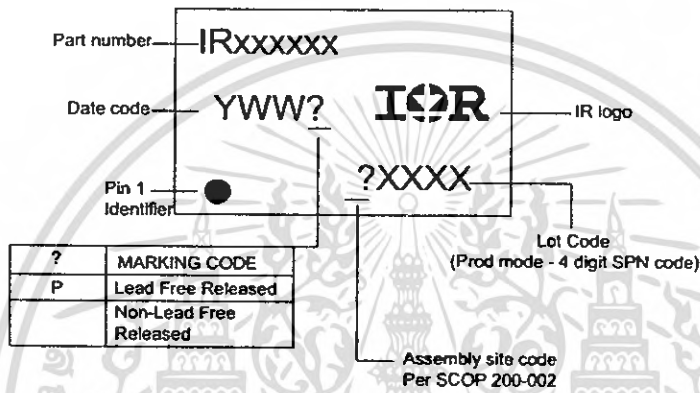
Case Outlines



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

International
IOR Rectifier

LEADFREE PART MARKING INFORMATION



ORDER INFORMATION

Basic Part (Non-Lead Free)

14-Lead IR2110 order IR2110
 14-Lead IR2113 order IR2113
 16-Lead IR2110S order IR2110S
 16-Lead IR2113S order IR2113S

Leadfree Part

14-Lead IR2110 order IR2110PbF
 14-Lead IR2113 order IR2113PbF
 16-Lead IR2110S order IR2110SPbF
 16-Lead IR2113S order IR2113SPbF

International
IOR Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245 Tel: (310) 252-7105
 Data and specifications subject to change without notice. 3/23/2004

IRFP4710

HEXFET® Power MOSFET

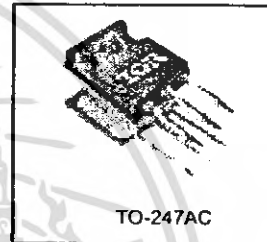
Applications

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

V _{DSS}	R _{DS(on)} max	I _D
100V	0.014Ω	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°C	72	A
I _D @ T _C = 100°C	51	
I _{DM}	300	
P _D @ T _C = 25°C	190	W
	1.2	W/°C
V _{GS}	± 20	V
dv/dt	8.2	V/ns
T _J	-55 to + 175	°C
T _{STG}	300 (1.6mm from case)	
	10 lbf·in (1.1N·m)	

Thermal Resistance

Parameter	Typ.	Max.	Units
R _{θJC}	—	0.81	°C/W
R _{θCS}	0.24	—	
R _{θJA}	—	40	

Notes ① through ⑤ are on page 8

www.irf.com

1

01/08/02

IRFP4710

International
IGOR Rectifier

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	μA	$V_{DS} = 80V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -20V$

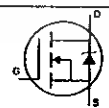
Dynamic @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	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	—	nC	$V_{DS} = 50V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	40	—	nC	$V_{GS} = 10V, V_{DD} = 50V$
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	35	—	ns	$I_D = 45A$
t_r	Rise Time	—	130	—	ns	$R_G = 4.5\Omega$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	41	—	ns	$V_{GS} = 10V$ Ⓞ
t_f	Fall Time	—	38	—	ns	
C_{iss}	Input Capacitance	—	6160	—	pF	$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	440	—	pF	$V_{DS} = 25V$
C_{rSS}	Reverse Transfer Capacitance	—	250	—	pF	$f = 1.0MHz$
C_{oss}	Output Capacitance	—	1580	—	pF	$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 1.0V, f = 1.0MHz$
C_{oss}	Output Capacitance	—	280	—	pF	$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 80V, f = 1.0MHz$
$C_{oss\ eff.}$	Effective Output Capacitance	—	430	—	pF	$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 0V\ to\ 80V$ Ⓞ

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	A	
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 $L_S + L_D$)				

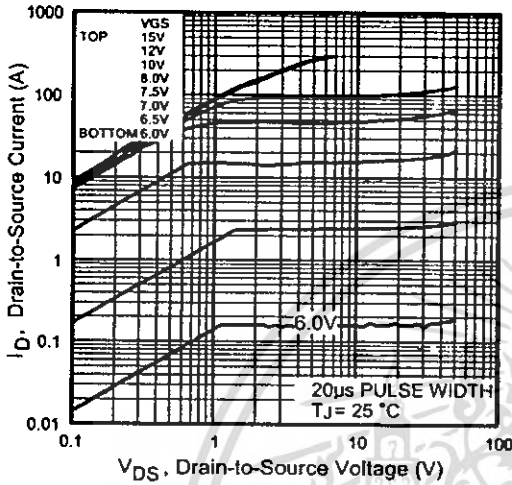


Fig 1. Typical Output Characteristics

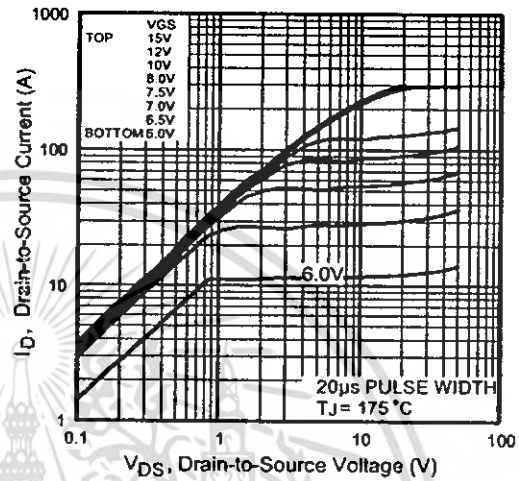


Fig 2. Typical Output Characteristics

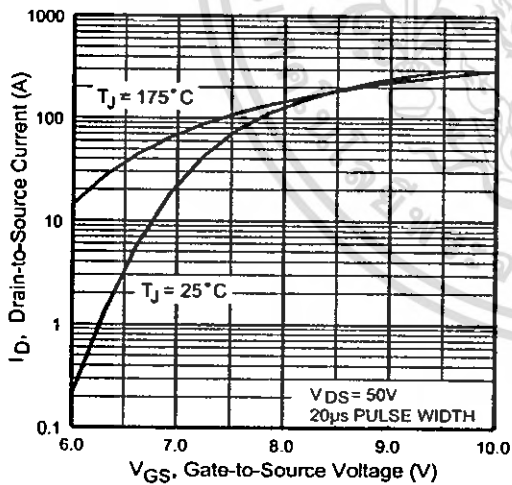


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

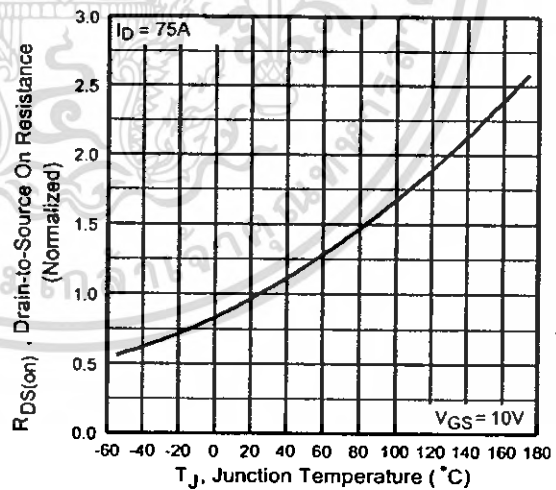


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

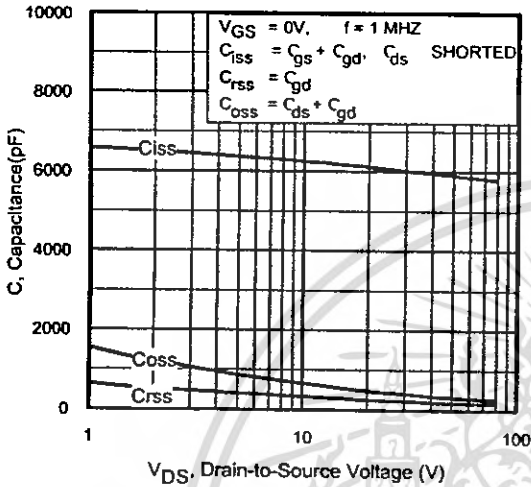


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

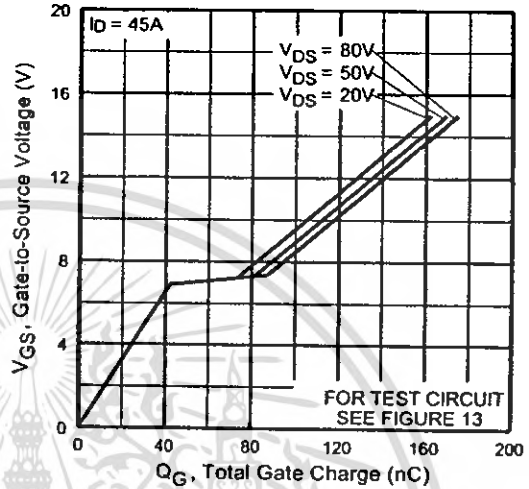


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

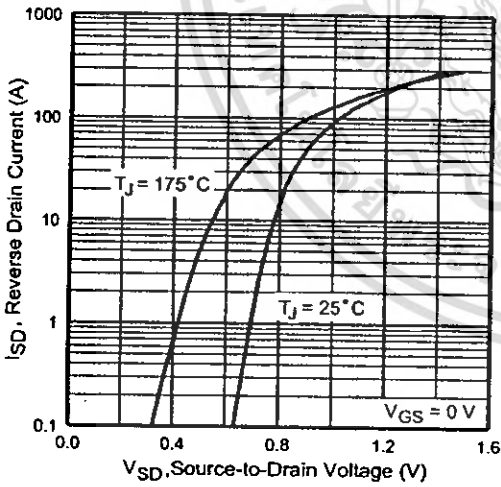


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

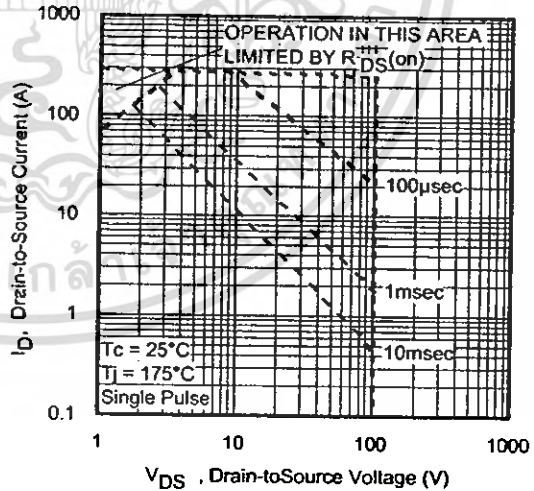


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

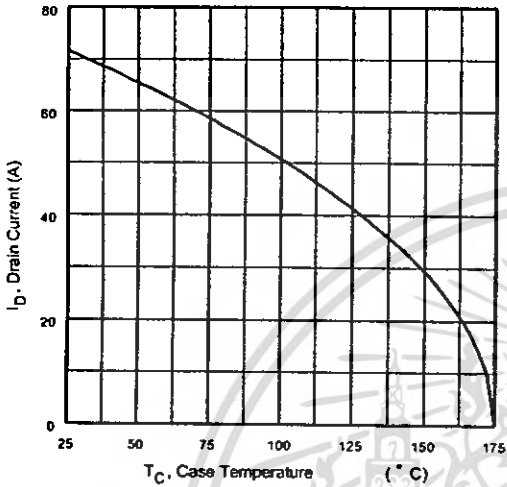


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

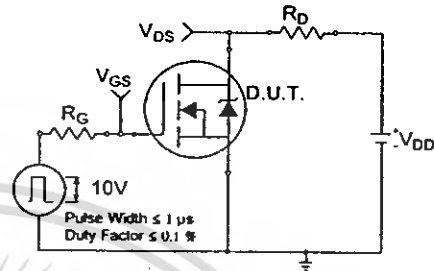


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

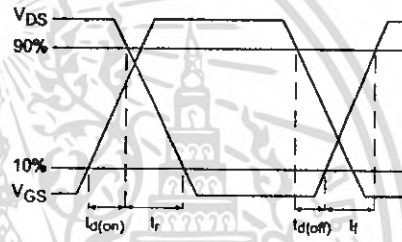


Fig 10b. Switching Time Waveforms

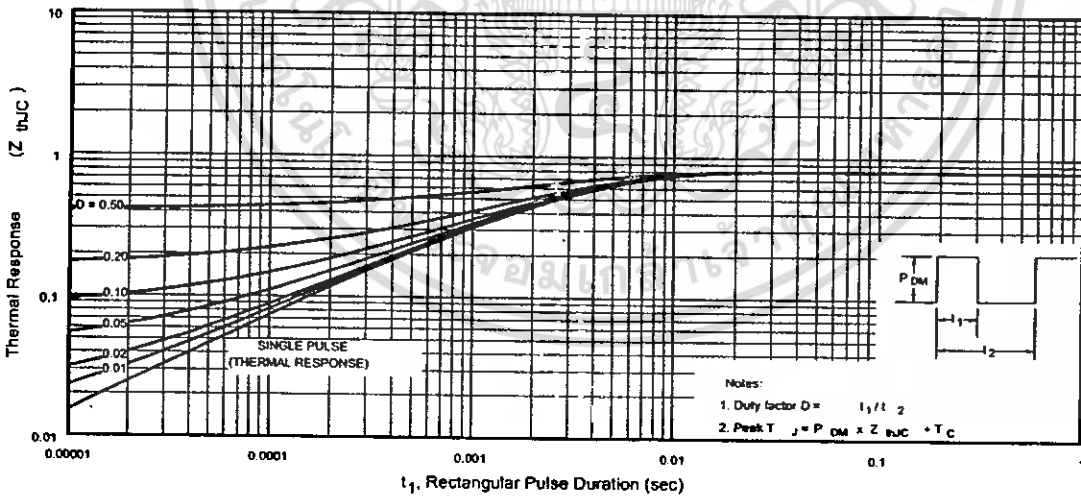


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

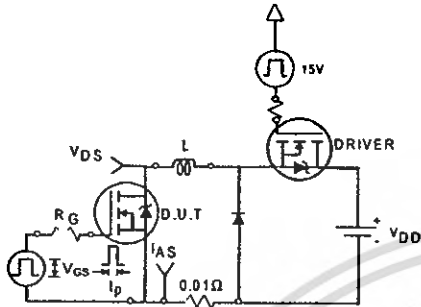


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

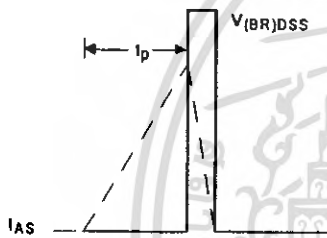


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

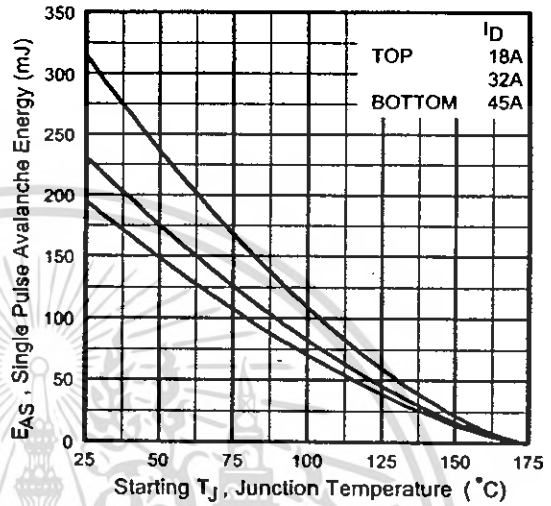


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

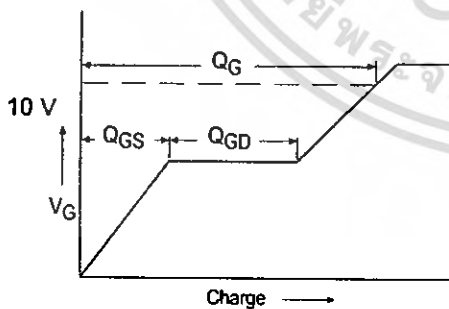


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

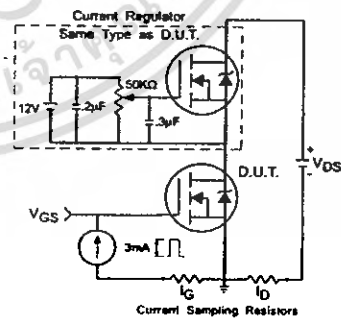


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit

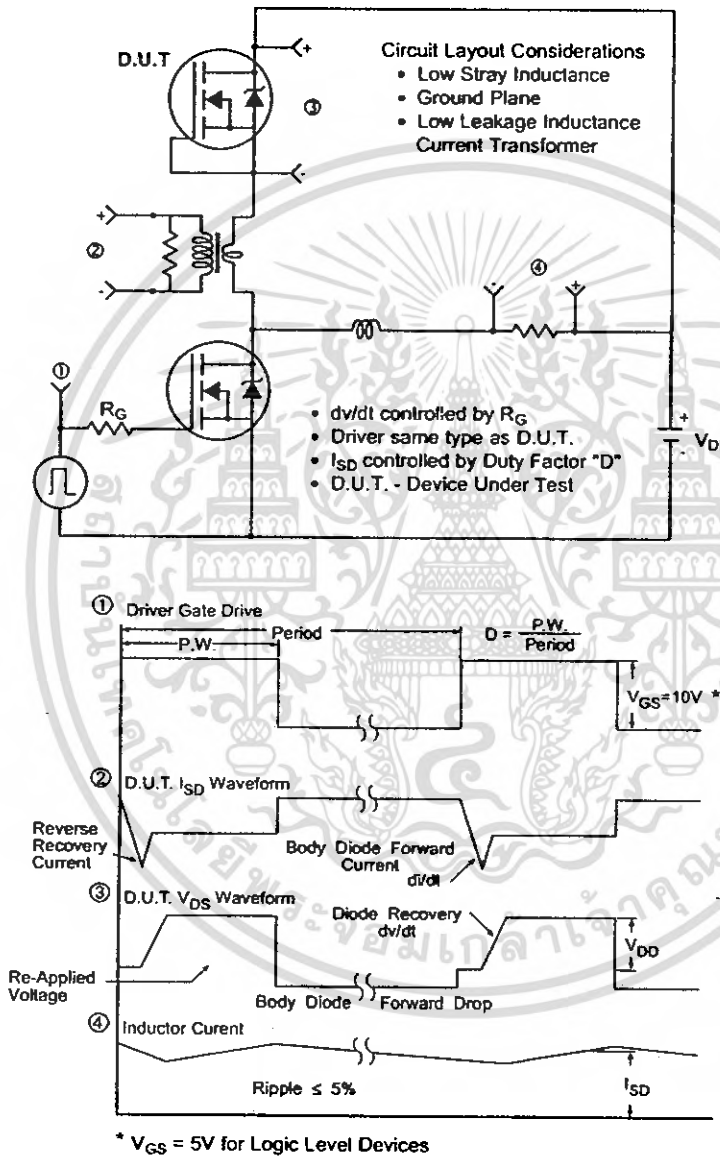


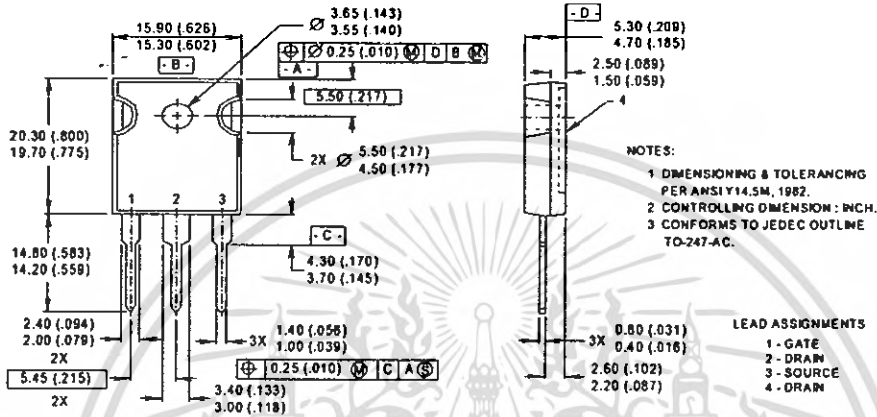
Fig 14. For N-Channel HEXFET® Power MOSFETs

IRFP4710

International
IR Rectifier

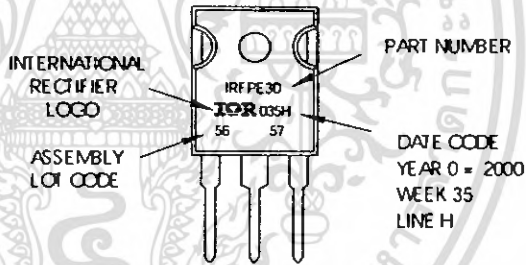
TO-247AC Package Outline

Dimensions are shown in millimeters (inches)



TO-247AC Part Marking Information

EXAMPLE: THIS IS AN IRFPE30 WITH ASSEMBLY LOT CODE 5657 ASSEMBLED ON WW35, 2000 IN THE ASSEMBLY LINE "H"



Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature.
- ② Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 190\mu\text{H}$
 $R_G = 25\Omega$, $I_{AS} = 45\text{A}$, $V_{GS} = 10\text{V}$.
- ③ $I_{SD} \leq 45\text{A}$, $di/dt \leq 420\text{A}/\mu\text{s}$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$, $T_J \leq 175^\circ\text{C}$.
- ④ Pulse width $\leq 400\mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.
- ⑤ C_{oss} eff. is a fixed capacitance that gives the same charging time as C_{oss} while V_{DS} is rising from 0 to 80% V_{DSS} .

Data and specifications subject to change without notice.

This product has been designed and qualified for the Industrial market.

Qualification Standards can be found on IR's Web site.

International
IR Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105

TAC Fax: (310) 252-7903

Visit us at www.irf.com for sales contact information. 01/02

www.irf.com

SWITCHMODE™ Power Rectifiers

... designed for use in switching power supplies, inverters and as free wheeling diodes, these state-of-the-art devices have the following features:

- Ultrafast 35 and 60 Nanosecond Recovery Time
- 175°C Operating Junction Temperature
- Popular TO-220 Package
- High Voltage Capability to 600 Volts
- Low Forward Drop
- Low Leakage Specified @ 150°C Case Temperature
- Current Derating Specified @ Both Case and Ambient Temperatures

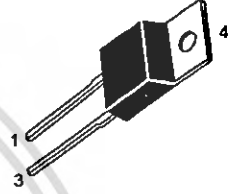
Mechanical Characteristics:

- Case: Epoxy, Molded
- Weight: 1.9 grams (approximately)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead Temperature for Soldering Purposes: 260°C Max. for 10 Seconds
- Shipped 50 units per plastic tube
- Marking: U1520, U1540, U1560

MUR1520
MUR1540
MUR1560

Motorola Preferred Devices

**ULTRAFAST
RECTIFIERS
15 AMPERES
200-400-600 VOLTS**



CASE 221B-03
TO-220AC
PLASTIC

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	MUR			Unit
		1520	1540	1560	
Peak Repetitive Reverse Voltage	V_{RRM}	200	400	600	Volts
Working Peak Reverse Voltage	V_{RWM}				
DC Blocking Voltage	V_R				
Average Rectified Forward Current (Rated V_R)	$I_F(AV)$	15 @ $T_C = 150^\circ C$		15 @ $T_C = 145^\circ C$	Amps
Peak Rectified Forward Current (Rated V_R , Square Wave, 20 kHz)	I_{FRM}	30 @ $T_C = 150^\circ C$		30 @ $T_C = 145^\circ C$	Amps
Nonrepetitive Peak Surge Current (Surge applied at rated load conditions halfwave, single phase, 60 Hz)	I_{FSM}	200	150		Amps
Operating Junction Temperature and Storage Temperature	T_J, T_{stg}	-65 to +175			°C

THERMAL CHARACTERISTICS

Maximum Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	1.5	°C/W
--	-----------------	-----	------

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	MUR1520	MUR1540	MUR1560	Unit
Maximum Instantaneous Forward Voltage (1) ($I_F = 15$ Amps, $T_C = 150^\circ C$) ($I_F = 15$ Amps, $T_C = 25^\circ C$)	V_F	0.85	1.12	1.20	Volts
		1.05	1.25	1.50	
Maximum Instantaneous Reverse Current (1) (Rated dc Voltage, $T_C = 150^\circ C$) (Rated dc Voltage, $T_C = 25^\circ C$)	i_R	500	500	1000	μA
		10	10	10	
Maximum Reverse Recovery Time ($I_F = 1.0$ Amp, $di/dt = 50$ Amps/ μs)	t_{rr}	35	60		ns

(1) Pulse Test: Pulse Width = 300 μs , Duty Cycle $\leq 2.0\%$.

SWITCHMODE is a trademark of Motorola, Inc.

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

Rev 1

© Motorola, Inc. 1996



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MUR1560

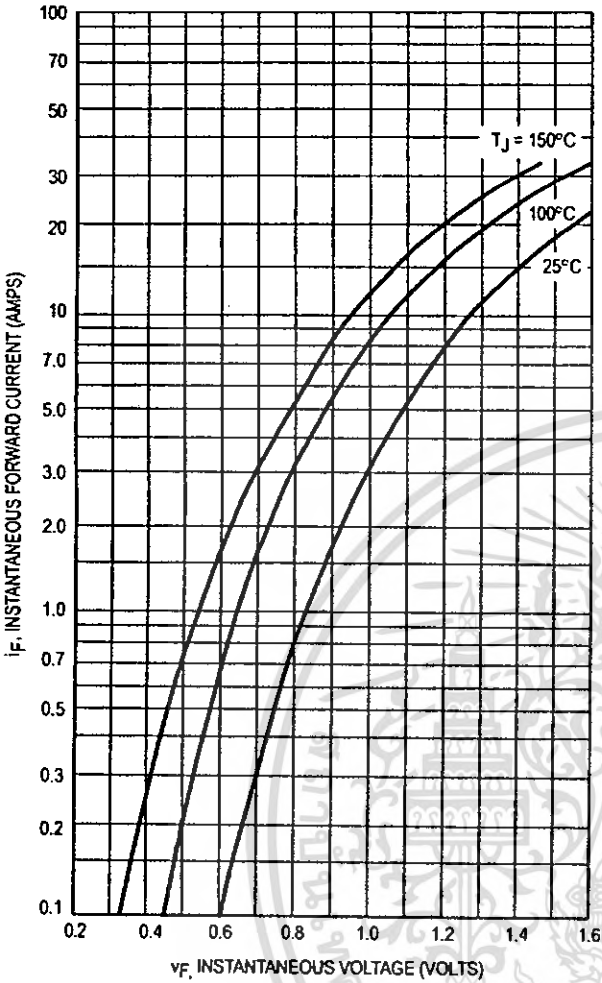


Figure 11. Typical Forward Voltage

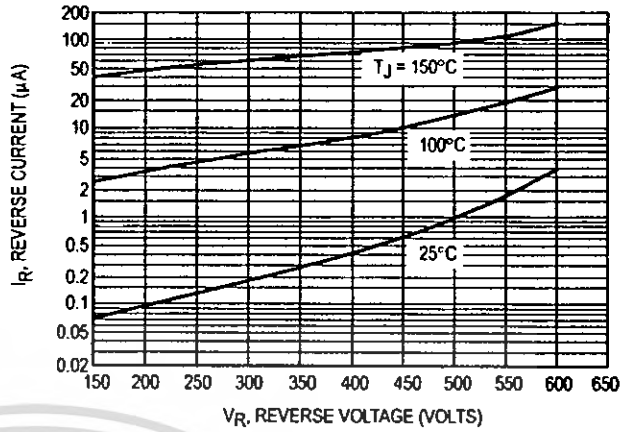


Figure 12. Typical Reverse Current

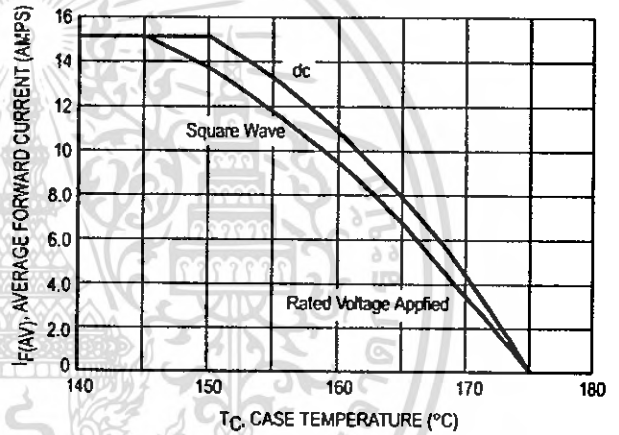


Figure 13. Current Derating, Case

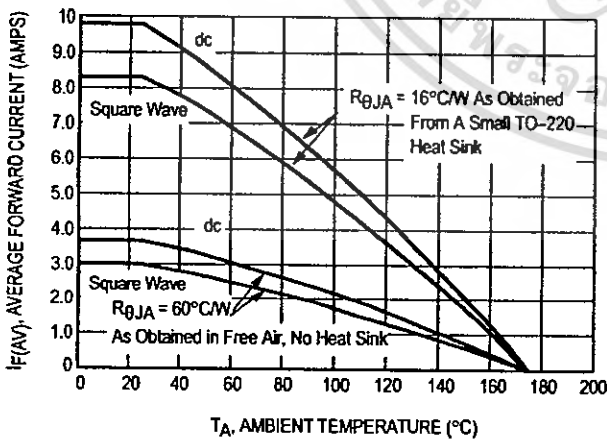


Figure 14. Current Derating, Ambient

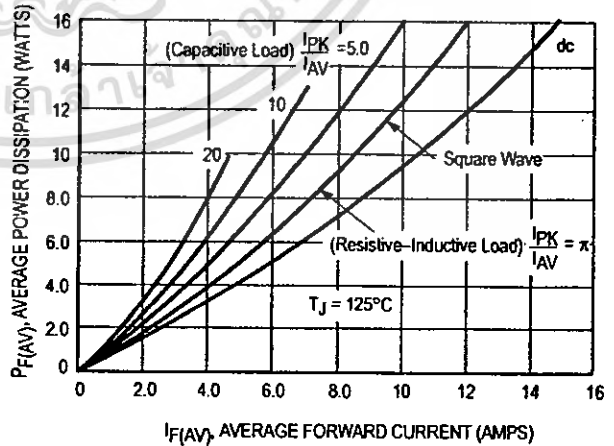


Figure 15. Power Dissipation

MUR1520, MUR1540, MUR1560

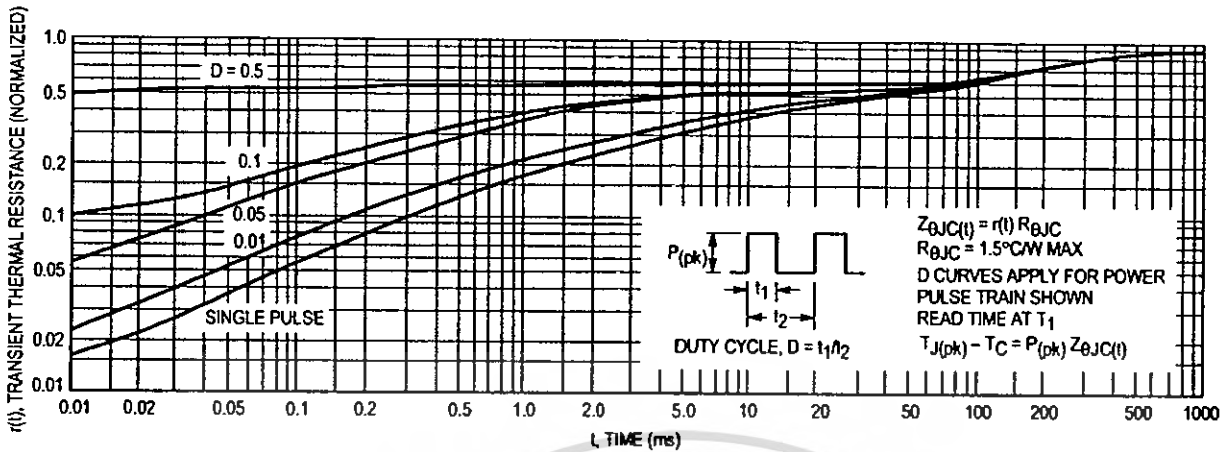


Figure 16. Thermal Response

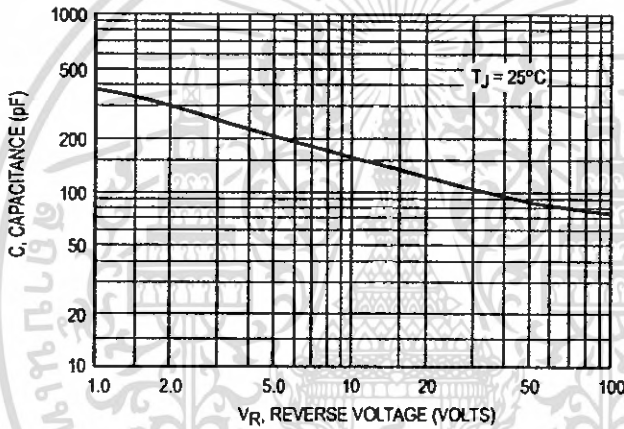
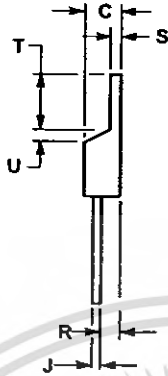
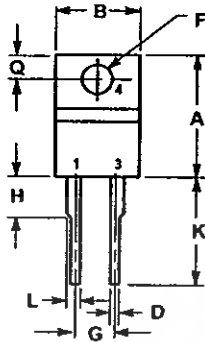


Figure 17. Typical Capacitance


PACKAGE DIMENSIONS



- NOTES:
 1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.595	0.620	15.11	15.75
B	0.390	0.405	9.65	10.29
C	0.160	0.190	4.06	4.82
D	0.025	0.035	0.64	0.89
F	0.142	0.147	3.61	3.73
G	0.190	0.210	4.83	5.33
H	0.110	0.130	2.79	3.30
J	0.018	0.025	0.46	0.64
K	0.500	0.562	12.70	14.27
L	0.045	0.060	1.14	1.52
Q	0.100	0.120	2.54	3.04
R	0.060	0.110	2.04	2.79
S	0.045	0.055	1.14	1.39
T	0.235	0.255	5.97	6.48
U	0.000	0.050	0.000	1.27

CASE 221B-03
 (TO-220AC)
 ISSUE B

Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in Motorola data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and  are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

Mfax is a trademark of Motorola, Inc.

How to reach us:

USA/EUROPE/Locations Not Listed: Motorola Literature Distribution;
 P.O. Box 5405, Denver, Colorado 80217. 1-303-675-2140 or 1-800-441-2447

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.: SPD, Strategic Planning Office, 4-32-1,
 Nishi-Gotanda, Shinagawa-ku, Tokyo 141, Japan. 81-3-5487-8488

Customer Focus Center: 1-800-521-6274

Mfax™: RMFAX0@email.sps.mot.com – TOUCHTONE 1-602-244-6609
 Motorola Fax Back System – US & Canada ONLY 1-800-774-1848
 – http://sps.motorola.com/mfax/

ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park,
 51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629298

HOME PAGE: <http://motorola.com/sps/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MC78XX/LM78XX/MC78XXA

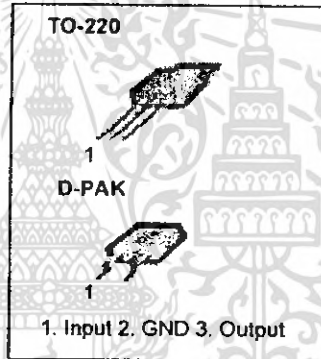
3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator

Features

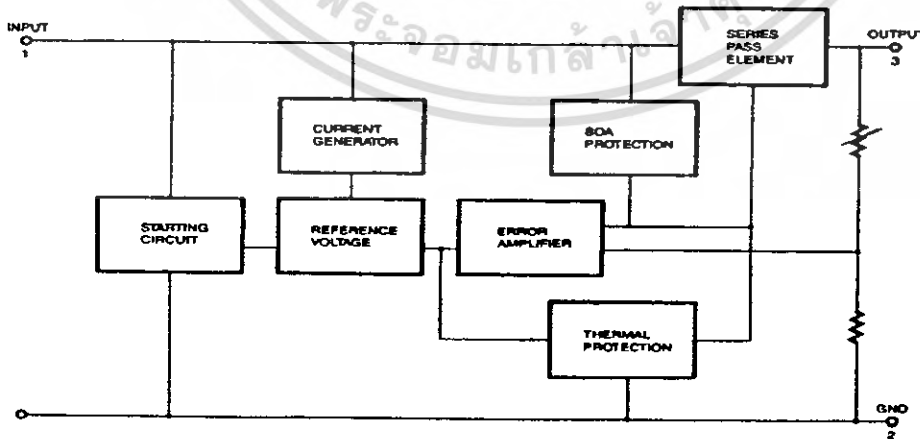
- Output Current up to 1A
- Output Voltages of 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 24V
- Thermal Overload Protection
- Short Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Protection

Description

The MC78XX/LM78XX/MC78XXA series of three terminal positive regulators are available in the TO-220/D-PAK package and with several fixed output voltages, making them useful in a wide range of applications. Each type employs internal current limiting, thermal shut down and safe operating area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.



Internal Block Diagram



Rev. 1.0.1

Electrical Characteristics (MC7815)

(Refer to test circuit, $0^{\circ}\text{C} < T_J < 125^{\circ}\text{C}$, $I_O = 500\text{mA}$, $V_I = 23\text{V}$, $C_I = 0.33\mu\text{F}$, $C_O = 0.1\mu\text{F}$, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	MC7815			Unit	
			Min.	Typ.	Max.		
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	14.4	15	15.6	V	
		$5.0\text{mA} \leq I_O \leq 1.0\text{A}$, $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 17.5\text{V to } 30\text{V}$	14.25	15	15.75		
Line Regulation (Note1)	Regline	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$V_I = 17.5\text{V to } 30\text{V}$	-	11	300	mV
			$V_I = 20\text{V to } 26\text{V}$	-	3	150	
Load Regulation (Note1)	Regload	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$I_O = 5\text{mA to } 1.5\text{A}$	-	12	300	mV
			$I_O = 250\text{mA to } 750\text{mA}$	-	4	150	
Quiescent Current	I_Q	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	5.2	8.0	mA	
Quiescent Current Change	ΔI_Q	$I_O = 5\text{mA to } 1.0\text{A}$	-	-	0.5	mA	
		$V_I = 17.5\text{V to } 30\text{V}$	-	-	1.0		
Output Voltage Drift	$\Delta V_O / \Delta T$	$I_O = 5\text{mA}$	-	-1	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$	
Output Noise Voltage	V_N	$f = 10\text{Hz to } 100\text{kHz}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	-	90	-	$\mu\text{V}/V_O$	
Ripple Rejection	RR	$f = 120\text{Hz}$ $V_I = 18.5\text{V to } 28.5\text{V}$	54	70	-	dB	
Dropout Voltage	V_{Drop}	$I_O = 1\text{A}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	2	-	V	
Output Resistance	r_O	$f = 1\text{kHz}$	-	19	-	$\text{m}\Omega$	
Short Circuit Current	I_{SC}	$V_I = 35\text{V}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	-	250	-	mA	
Peak Current	I_{PK}	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	2.2	-	A	

Note:

1. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty is used.

Electrical Characteristics (MC7815A)

(Refer to the test circuits. $0^{\circ}\text{C} < T_J < 125^{\circ}\text{C}$, $I_O = 1\text{A}$, $V_I = 23\text{V}$, $C_I = 0.33\mu\text{F}$, $C_O = 0.1\mu\text{F}$, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	14.7	15	15.3	V	
		$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$, $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 17.7\text{V to } 30\text{V}$	14.4	15	15.6		
Line Regulation (Note1)	Regline	$V_I = 17.9\text{V to } 30\text{V}$ $I_O = 500\text{mA}$	-	10	150	mV	
		$V_I = 20\text{V to } 26\text{V}$	-	5	150		
		$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$V_I = 17.5\text{V to } 30\text{V}$	-	11		150
		$V_I = 20\text{V to } 26\text{V}$	-	3	75		
Load Regulation (Note1)	Regload	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$ $I_O = 5\text{mA to } 1.5\text{A}$	-	12	100	mV	
		$I_O = 5\text{mA to } 1.0\text{A}$	-	12	100		
		$I_O = 250\text{mA to } 750\text{mA}$	-	5	50		
Quiescent Current	I_Q	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	5.2	6.0	mA	
Quiescent Current Change	ΔI_Q	$V_I = 17.5\text{V to } 30\text{V}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	-	0.8	mA	
		$V_I = 17.5\text{V to } 30\text{V}$, $I_O = 500\text{mA}$	-	-	0.8		
		$I_O = 5\text{mA to } 1.0\text{A}$	-	-	0.5		
Output Voltage Drift	$\Delta V/\Delta T$	$I_O = 5\text{mA}$	-	-1.0	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$	
Output Noise Voltage	V_N	$f = 10\text{Hz to } 100\text{KHz}$ $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	-	10	-	$\mu\text{V}/V_O$	
Ripple Rejection	RR	$f = 120\text{Hz}$, $I_O = 500\text{mA}$ $V_I = 18.5\text{V to } 28.5\text{V}$	-	58	-	dB	
Dropout Voltage	V_{Drop}	$I_O = 1\text{A}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	2.0	-	V	
Output Resistance	r_O	$f = 1\text{KHz}$	-	19	-	m Ω	
Short Circuit Current	I_{SC}	$V_I = 35\text{V}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	-	250	-	mA	
Peak Current	I_{PK}	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	2.2	-	A	

Note:

1. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Change in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty is used.

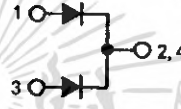
SWITCHMODE™ Power Rectifiers

... designed for use in switching power supplies, inverters and as free wheeling diodes, these state-of-the-art devices have the following features:

- Ultrafast 35 and 60 Nanosecond Recovery Time
- 175°C Operating Junction Temperature
- High Voltage Capability to 600 Volts
- Low Forward Drop
- Low Leakage Specified @ 150°C Case Temperature
- Current Derating Specified @ Both Case and Ambient Temperatures
- Epoxy Meets UL94, V₀ @ 1/8"
- High Temperature Glass Passivated Junction

Mechanical Characteristics:

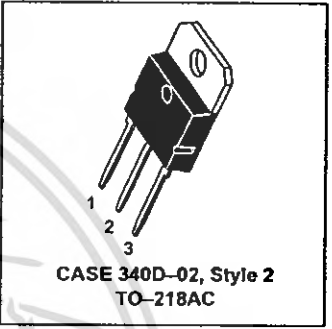
- Case: Epoxy, Molded
- Weight: 4.3 grams (approximately)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead Temperature for Soldering Purposes: 260°C Max. for 10 Seconds
- Shipped 30 units per plastic tube
- Marking: U3020, U3040, U3060



MUR3020PT
MUR3040PT*
MUR3060PT*

**Motorola Preferred Devices*

ULTRAFAST RECTIFIERS
30 AMPERES
200-400-600 VOLTS



MAXIMUM RATINGS, PER LEG

Rating	Symbol	MUR3020PT	MUR3040PT	MUR3060PT	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V _{RRM} V _{RWM} V _R	200	400	600	Volts
Average Rectified Forward Current (Rated V _R) Per Leg Per Device	I _{F(AV)}	15 @ T _C = 150°C 30 @ T _C = 150°C		15 @ T _C = 30 @ 145°C	Amps
Peak Rectified Forward Current, Per Leg (Rated V _R , Square Wave, 20 kHz, T _C = 150°C)	I _{FRM}	30 @ T _C = 150°C		30 @ T _C = 145°C	Amps
Nonrepetitive Peak Surge Current (Surge applied at rated load conditions, halfwave, single phase, 60 Hz) Per Leg	I _{FSM}	200	150		Amps
Operating Junction and Storage Temperature	T _J , T _{stg}	- 65 to +175			°C

THERMAL CHARACTERISTICS PER DIODE LEG

Maximum Thermal Resistance — Junction to Case	R _{θJC}	1.5	°C/W
— Junction to Ambient	R _{θJA}	40	

ELECTRICAL CHARACTERISTICS PER DIODE LEG

Maximum Instantaneous Forward Voltage (1) (I _F = 15 Amp, T _C = 150°C) (I _F = 15 Amp, T _C = 25°C)	V _F	0.85 1.05	1.12 1.25	1.2 1.5	Volts
Maximum Instantaneous Reverse Current (1) (Rated DC Voltage, T _J = 150°C) (Rated DC Voltage, T _J = 25°C)	i _R	500 10		1000 10	µA
Maximum Reverse Recovery Time (i _F = 1.0 Amp, di/dt = 50 Amps/µs)	t _{rr}	35	60		ns

(1) Pulse Test: Pulse Width = 300 µs, Duty Cycle ≤ 2.0%.

SWITCHMODE is a trademark of Motorola, Inc.

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

Rev 4

MUR3020PT MUR3040PT MUR3060PT

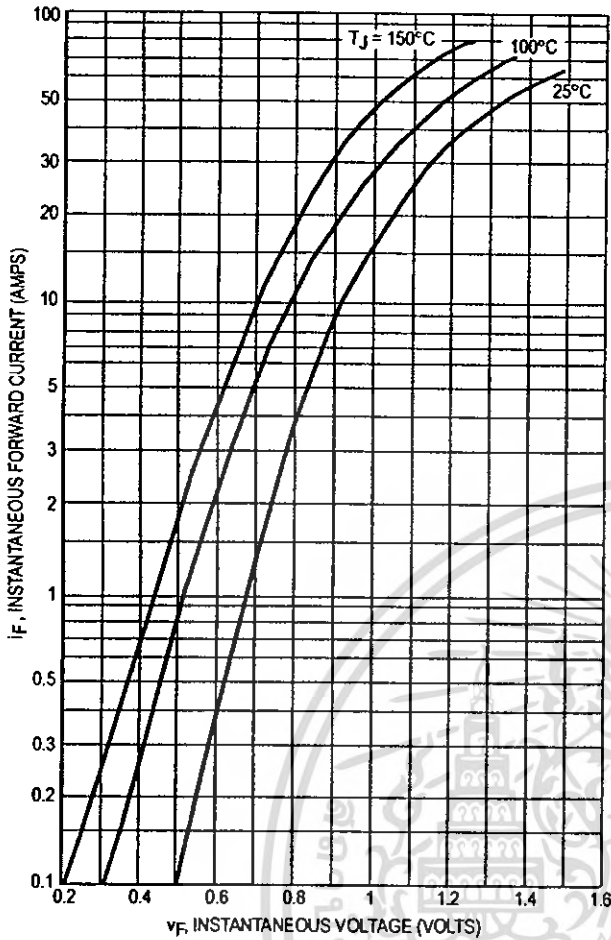


Figure 1. Typical Forward Voltage (Per Leg)

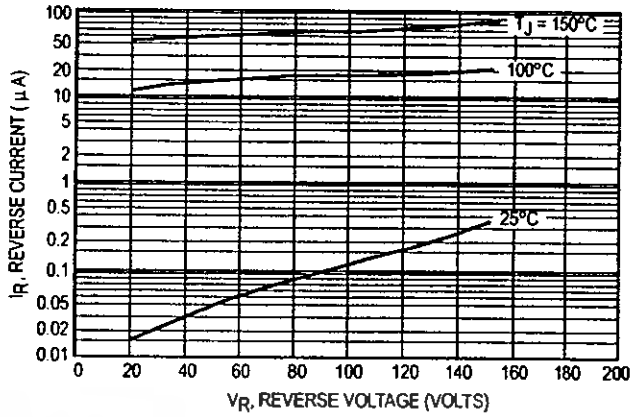


Figure 2. Typical Reverse Current (Per Leg)

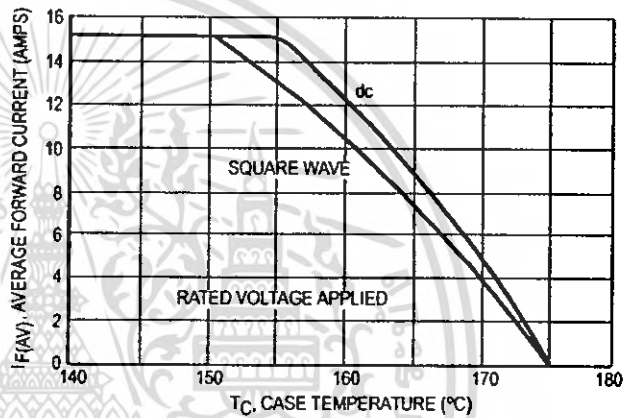


Figure 3. Current Derating, Case (Per Leg)

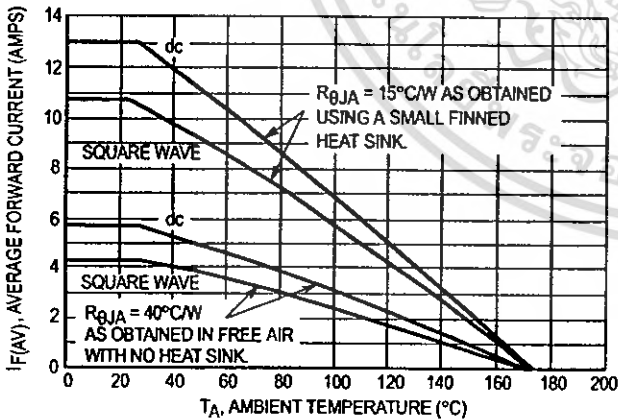


Figure 4. Current Derating, Ambient (Per Leg)

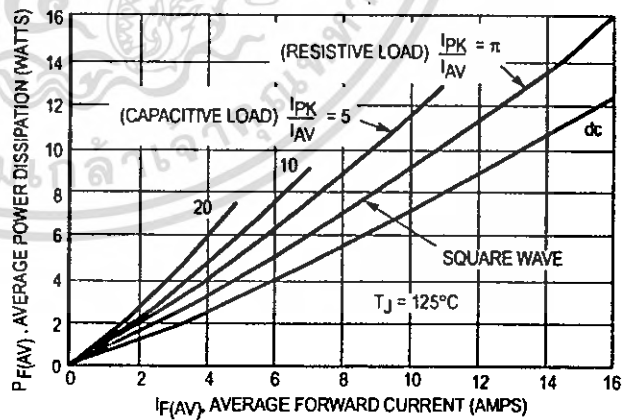


Figure 5. Power Dissipation (Per Leg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MUR3020PT MUR3040PT MUR3060PT

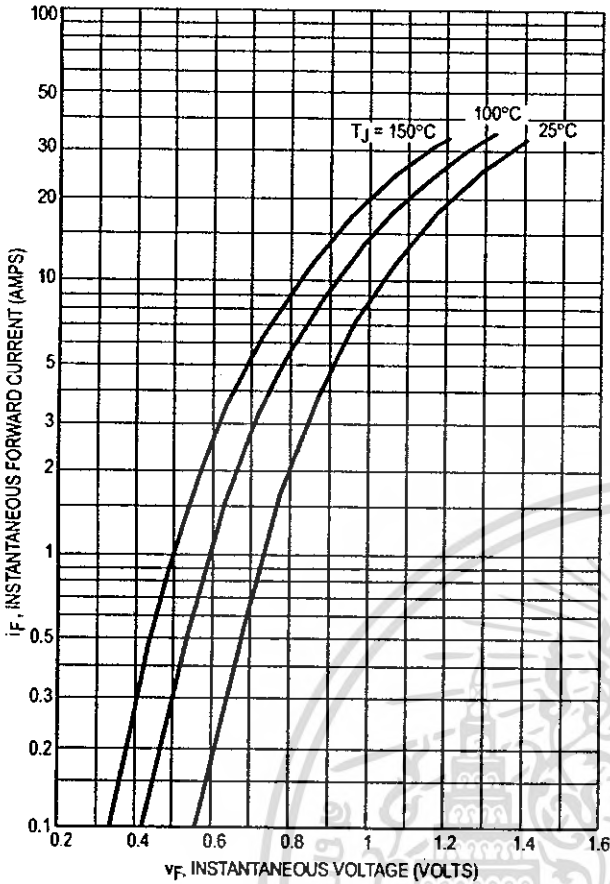


Figure 6. Typical Forward Voltage (Per Leg)

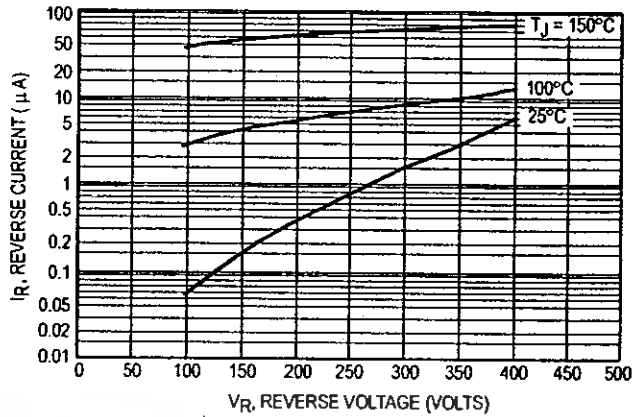


Figure 7. Typical Reverse Current (Per Leg)

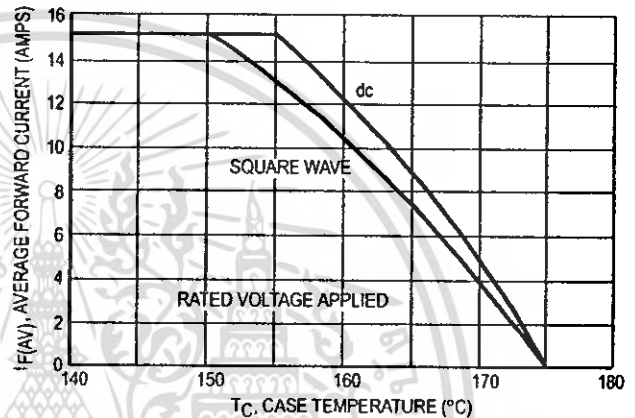


Figure 8. Current Derating, Case (Per Leg)

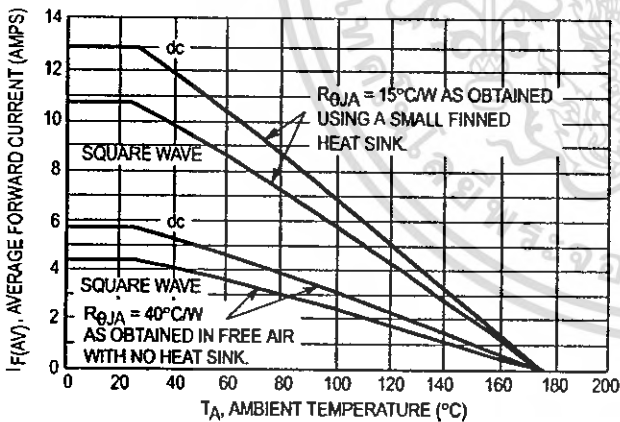


Figure 9. Current Derating, Ambient (Per Leg)

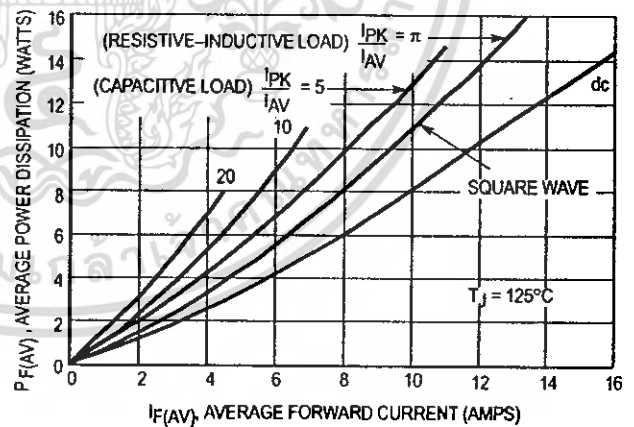


Figure 10. Power Dissipation (Per Leg)

MUR3020PT MUR3040PT MUR3060PT

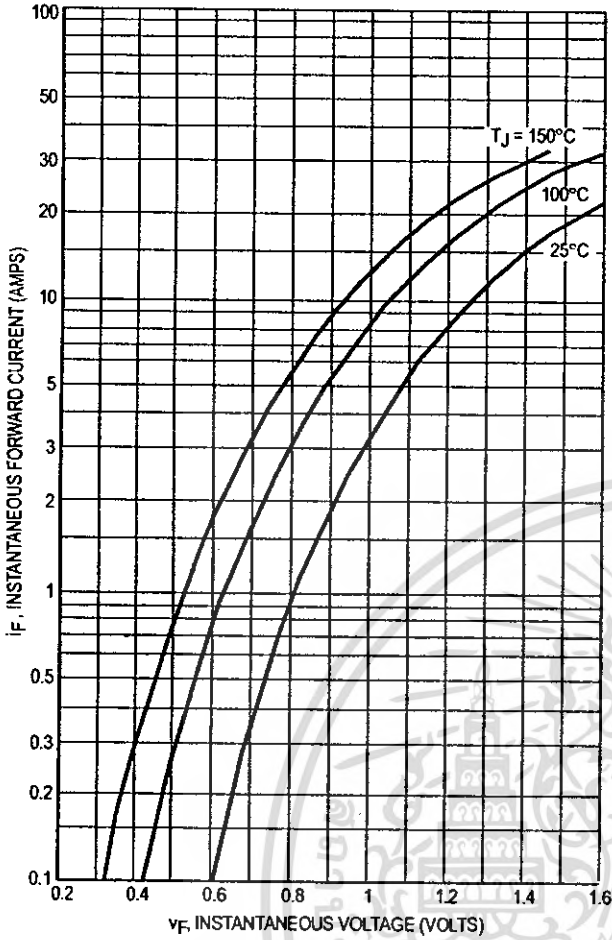


Figure 11. Typical Forward Voltage (Per Leg)

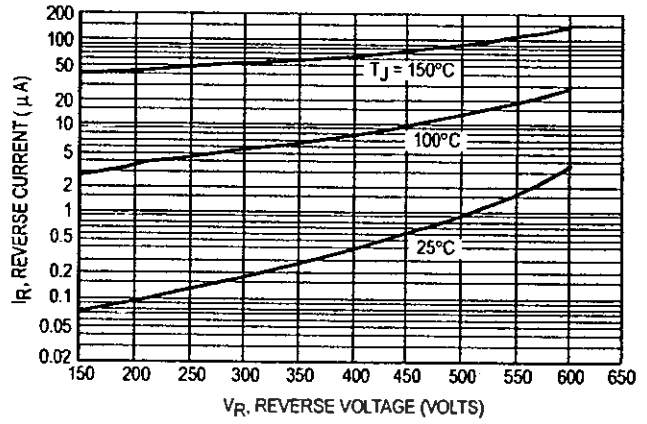


Figure 12. Typical Reverse Current (Per Leg)

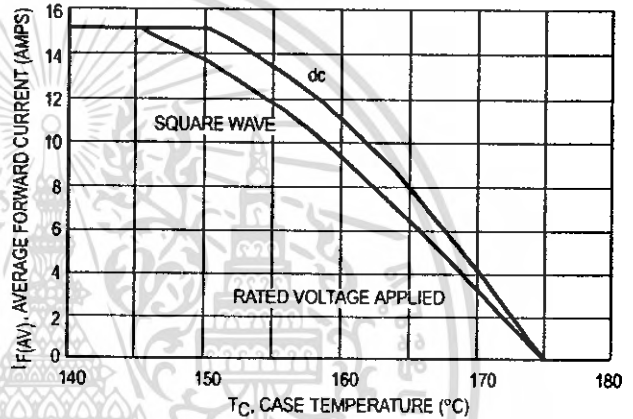


Figure 13. Current Derating, Case (Per Leg)

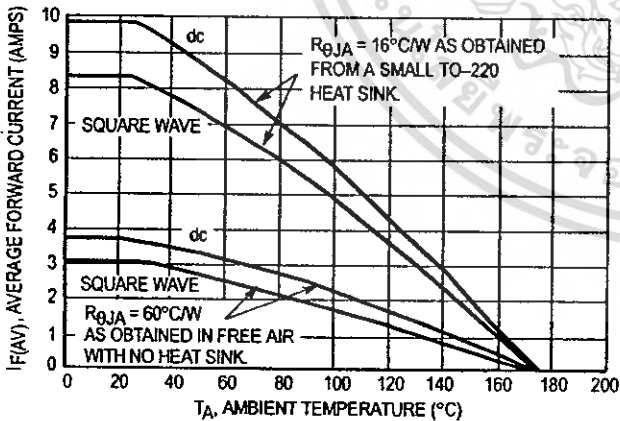


Figure 14. Current Derating, Ambient (Per Leg)

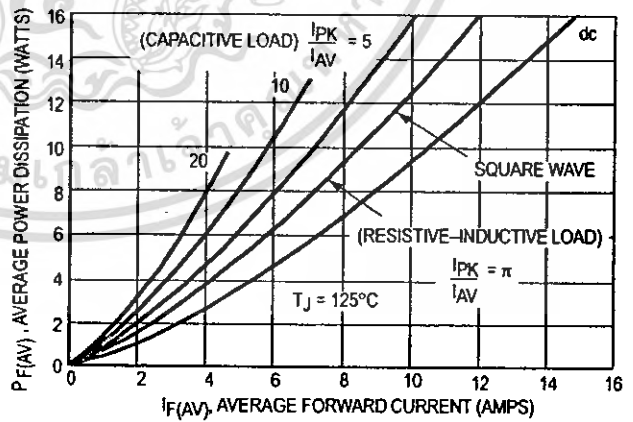


Figure 15. Power Dissipation (Per Leg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

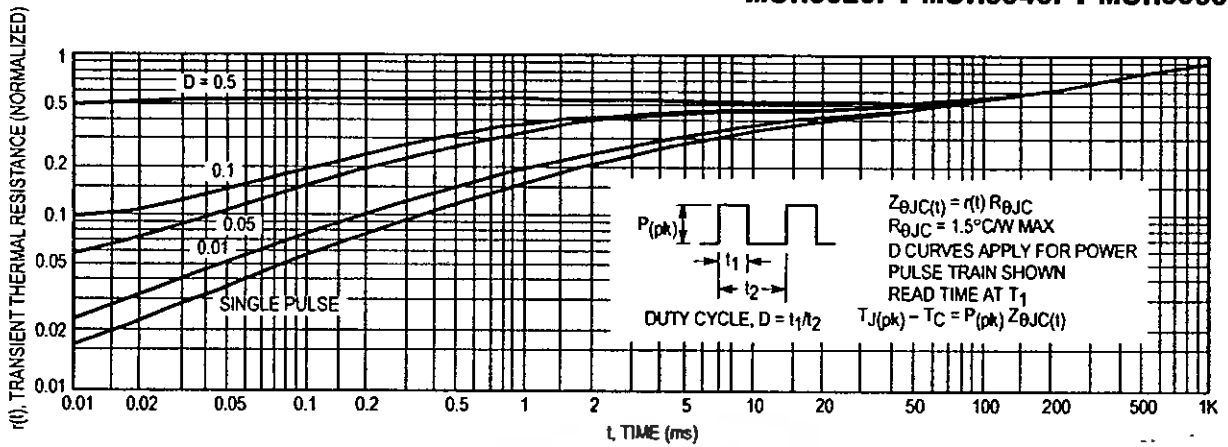


Figure 16. Thermal Response

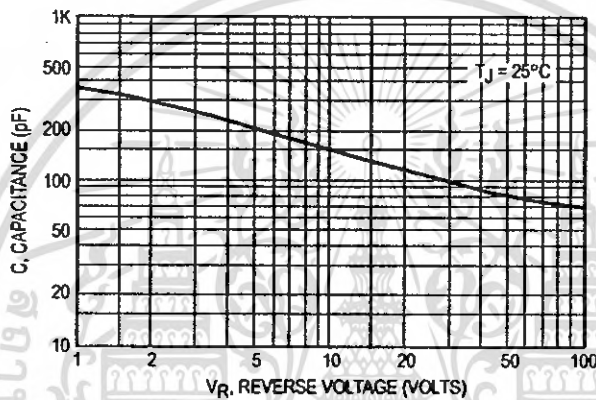
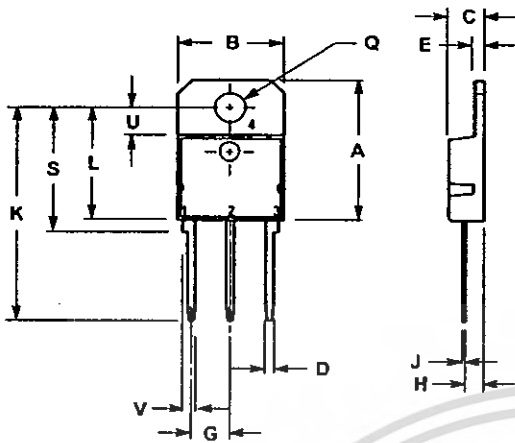


Figure 17. Typical Capacitance (Per Leg)

MUR3020PT MUR3040PT MUR3060PT

OUTLINE DIMENSIONS

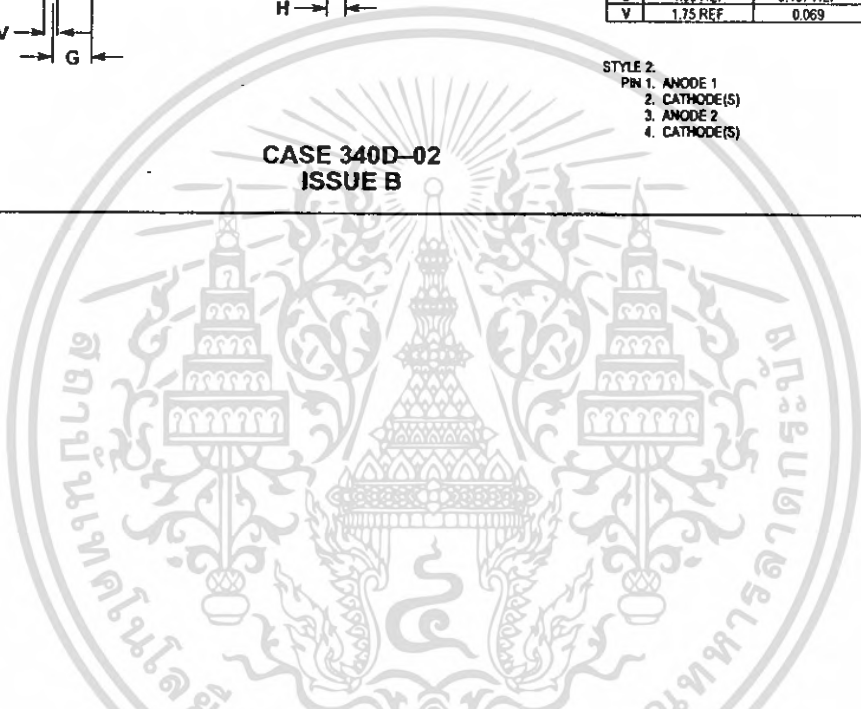


NOTES:
 1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	—	20.35	—	0.801
B	14.70	15.20	0.579	0.598
C	4.70	4.90	0.185	0.193
D	1.10	1.30	0.043	0.051
E	1.17	1.37	0.046	0.054
G	5.40	5.55	0.213	0.219
H	2.00	3.00	0.079	0.118
J	0.50	0.78	0.020	0.031
K	31.00 REF	—	1.220 REF	—
L	—	16.20	—	0.638
Q	4.00	4.10	0.158	0.161
S	17.80	18.20	0.701	0.717
U	4.00 REF	—	0.157 REF	—
V	1.75 REF	—	0.069	—

STYLE 2:
 PIN 1. ANODE 1
 2. CATHODE(S)
 3. ANODE 2
 4. CATHODE(S)

**CASE 340D-02
 ISSUE B**



Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in Motorola data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

Mfax is a trademark of Motorola, Inc.

How to reach us:

USA/EUROPE/Locations Not Listed: Motorola Literature Distribution;
 P.O. Box 5405, Denver, Colorado 80217. 1-303-675-2140 or 1-800-441-2447

JAPAN: Nippon Motorola Ltd: SPD, Strategic Planning Office, 4-32-1,
 Nishi-Gotanda, Shinagawa-ku, Tokyo 141, Japan. 81-3-5487-8488

Customer Focus Center: 1-800-521-6274

Mfax™: RMFAX0@email.sps.mot.com - TOUCHTONE 1-602-244-6609
 Motorola Fax Back System - US & Canada ONLY 1-800-774-1848
 - http://sps.motorola.com/mfax/

ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park,
 51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629298

HOME PAGE: <http://motorola.com/sps/>



MUR3020PT/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้