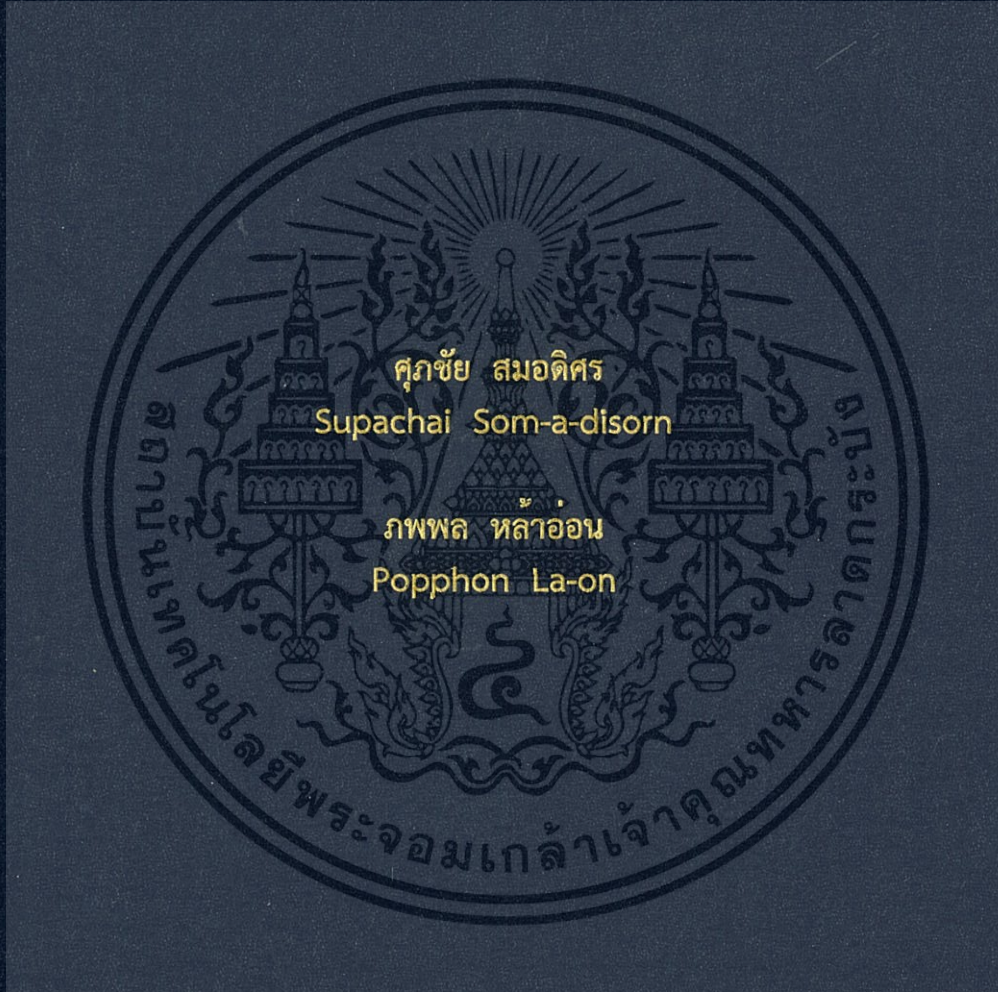


ระบบควบคุมแบตเตอรี่ในรถไฟฟ้า

Battery Management System (BMS) in Electric Vehicle



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

ระบบควบคุมแบตเตอรี่ในรถไฟฟ้า

Battery Management System (BMS) in Electric Vehicle



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2559
ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง ระบบควบคุมแบตเตอรี่ในรถไฟฟ้า
Battery Management System (BMS) in Electric Vehicle
ผู้จัดทำ นายศุภชัย สมอดิศร รหัสประจำตัว 56011236
นายภพพล หล้าอ่อน รหัสประจำตัว 56010904

รายงานนี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



๗๗-๗.
(ผศ.ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุขกิจ)
อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	ระบบควบคุมแบตเตอรี่ในรถไฟฟ้า		
นักศึกษา	นายภพพล	หล้าอ่อน	รหัสประจำตัว 56010904
	นายศุภชัย	สมอดิศร	รหัสประจำตัว 56011236
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
ภาควิชา	อิเล็กทรอนิกส์		
ปีการศึกษา	2559		
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	ผศ.ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุขกิจ		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เกี่ยวกับการสร้างวงจรและเขียนโปรแกรมเพื่อพัฒนาระบบการจัดการแบตเตอรี่ ควบคุมการชาร์จและดิสชาร์จไฟของแบตเตอรี่ สำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้คือ NCR18650 Lithium Ion (Battery Management System for NCR18650 Lithium Ion) มีจุดประสงค์ในการศึกษาหาวิธีการควบคุมสมดุลประจุไฟฟ้าของ การใช้งานเซลล์แบตเตอรี่รถไฟฟ้าชนิดลิเธียมไอออน เพิ่มประสิทธิภาพ อายุการใช้งานให้ดีขึ้น โดยการเขียน โปรแกรมด้วยบอร์ด Arduino ในการควบคุมการทำงานนี้จะมีการใช้บอร์ดโมดูลควบคุมการชาร์จและคายประจุ ของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถ้าหากแรงดันไฟฟ้าลดลงต่ำกว่า มาตรฐาน ระบบจะเริ่มต้นชาร์จแบตเตอรี่ แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนแบตเตอรี่ชาร์จไฟไว้เต็ม ระบบจะทำการ จะตัดการชาร์จแบตเตอรี่ ดังนั้นจากผลดังกล่าวสามารถบอกได้ว่าโครงการนี้สามารถควบคุมการชาร์จและดิสชาร์จ ไฟของแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Battery Management System (BMS) in Electric Vehicle		
Student	Mr.Popphon Laon	Student ID	56010904
	Mr.Supachai Som-a-disorn	Student ID	56011236
Degree	Bachelor of Engineering		
Program	Electronics Engineering		
Year	2016		
Project advisor	Asst. Prof.Dr.Pattarapong Phasukkit		

ABSTRACT

The ultimate goal of this project is to develop software and circuit design for battery management system (BMS) in electric vehicle, controls the charging and discharging cycles of the NCR18650 lithium-ion battery. With balanced control of electrostatic charge in the lithium-ion batteries, high performance in battery life. By regulating the charger module in a battery, used an Arduino board for programming, was a software designed for control module. Which can efficiently control the voltage levels if the voltage decreases and lower than standard, starting and charging systems in a battery. But if the voltage increases and the battery has been fully charged, the cut-off voltage. Therefore, the result suggested that this project can control for optimizing the charge and discharge of battery.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ภัทรพงษ์ ฆาสุกกิจ ที่สนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ในการทดลอง ให้คำปรึกษา ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่กลุ่มข้าพเจ้า

ขอขอบคุณครอบครัวสำหรับการสนับสนุนในทุกๆด้าน ขอขอบคุณพี่และเพื่อนในห้องปฏิบัติการทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจสำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากโครงการนี้ ขอขอบคุณ นายรัชพล แคมภูเขียว และนายสุลักษณ์ อ่วมพรหม ที่คอยช่วยเหลือตลอดจนโครงการนี้เสร็จลุล่วง และสุดท้ายกลุ่มข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า



ภาพพล หล้าอ่อน

ศุภชัย สมอดิศร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.5 ระยะเวลาในการทำโครงการ.....	2
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แบตเตอรี่.....	3
2.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่.....	4
2.3 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-Ion).....	5
2.4 วงจรที่ใช้ในการจัดการความสมดุลของปริมาณประจุภายในเซลล์แบตเตอรี่ (Balancing circuit system).....	9
2.5 NCR18650 Lithium Ion.....	11
2.6 พฤติกรรมของการชาร์จกระแสไฟเข้าแบตเตอรี่ NCR18650 Lithium Ion.....	12
2.7 ส่วนประกอบของระบบควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ NCR18650 Lithium Ion.....	13
2.8 Arduino Mega.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.9 Analog to Digital Converter (การแปลงสัญญาณอนาล็อก-ดิจิทัล)	17
2.10 มอสเฟต (MOSFET)	26
2.11 Multiplexer.....	29
2.12 เทอร์มิสเตอร์หรือตัวต้านทานความร้อน (Thermal Resistor).....	30
2.13 ฟิวส์รีซิสเตอร์ (Fuse Resistor)	32
2.14 OP-AMP.....	32
2.15 Hysteresis.....	56
2.16 รีเลย์(Relay)	57
บทที่ 3 การออกแบบระบบ.....	61
3.1 หลักการออกแบบระบบ และออกแบบวงจร.....	61
3.2 แผนผังการทำงานของโปรแกรม.....	67
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	68
4.1 การทดลองที่ 1 จ่ายไฟให้กับแบตเตอรี่ 1 ก้อน.....	68
4.2 การทดลองที่ 2 หยุดการจ่ายไฟ.....	70
4.3 การทดลองที่ 3 วัดค่าแบตเตอรี่ผ่านวงจร.....	71
4.4 การทดลองที่ 4 วัดค่าแรงดัน ที่ Output ของ op-amp.....	72
4.5 การทดลองที่ 5 วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน (over temperature)	72
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ.....	73
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	73
5.2 อุปสรรคและปัญหา.....	73
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	74
เอกสารอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นพลังงานในแบตเตอรี่แต่ละชนิด.....	7
2.2 กราฟแสดงค่าแรงดันและกระแสระหว่างการชาร์จ.....	7
2.3 กราฟแสดงค่าแรงดันและขีดความสามารถในการชาร์จ.....	8
2.4 กราฟแสดงค่าการกระจายขีดความสามารถของแบตเตอรี่.....	8
2.5 รูปแบบสถาปัตยกรรมระบบแบตเตอรี่ที่ใช้งานอยู่ในรถยนต์.....	9
2.6 รูปแบบวงจรการจัดการความสมดุลแบบพาสซีฟ.....	10
2.7 คุณสมบัติและขนาดของ NCR18650 Lithium Ion.....	11
2.8 กราฟแสดงพฤติกรรมของการชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่.....	12
2.9 กราฟแสดงพฤติกรรมของการชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่.....	13
2.10 Arduino Mega.....	14
2.11 วงจร Counting Converter A/D.....	18
2.12 กราฟแสดง output voltage A/D converter.....	19
2.13 Binary Search.....	20
2.14 วงจร Dual Slope A/D converter.....	20
2.15 วงจร Dual Slope A/D converter – Full Circuit.....	21
2.16 วงจร Dual Slope A/D converter – Zero Offset.....	22
2.17 A “Flash” converter.....	22
2.18 สรุป Analog to digital converter.....	23
2.19 โครงสร้างภายในของ Delta-Sigma ADC.....	24
2.20 โครงสร้างภายในของ SAR ADC.....	24
2.21 โครงสร้างภายในของ Flash ADC.....	25
2.22 โครงสร้างของ MOSFET.....	26

สารบัญรูป(ต่อ)

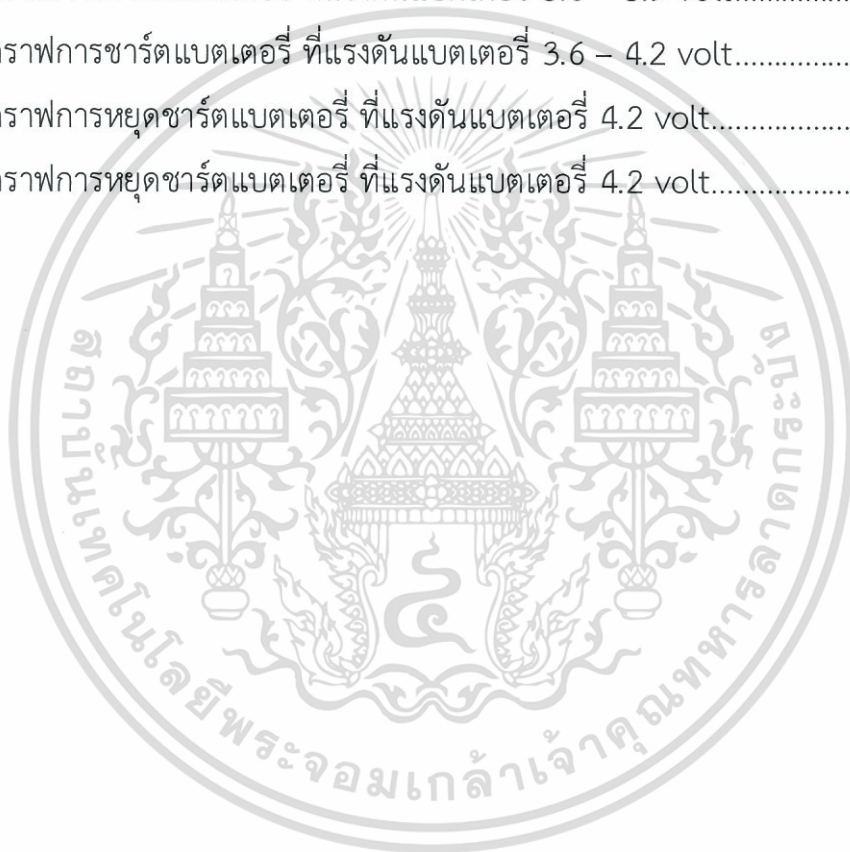
	หน้า
2.23 สัญลักษณ์ในทางดิจิทัล MOSFET.....	27
2.24 การทำงานของ MOSFET.....	28
2.25 รูปแสดงระหว่างช่องสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต.....	29
2.26 เทอร์มิสเตอร์ ชนิด NTC.....	31
2.27 เทอร์มิสเตอร์ ชนิด PTC.....	31
2.28 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันของ NTC ขนาด 10K โอห์ม.....	31
2.29 รูปแสดงสัญลักษณ์ของฟิวส์รีซีเตอร์.....	32
2.30 แสดงการทำงานและวงจรสมมุทธ์ของออปแอมป์.....	33
2.31 แสดงการต่อออปแอมป์ในอุดมคติเป็นวงจรขยายแบบไม่กลับขั้ว.....	34
2.32 แสดงแรงดัน ณ จุดต่าง ๆ เมื่อจัดวงจรขยายให้กับออปแอมป์.....	35
2.33 แสดงความหมายของความต้านทานเอาต์พุตและความสามารถในการขับโหลด.....	36
2.34 แสดงความต้านทานเอาต์พุตของออปแอมป์.....	37
2.35 ความต้านทานทางเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราการขยายเปลี่ยนไป.....	38
2.36 แรงดันออฟเซ็ทเพียง 1 mV เอาต์พุตได้ 10 mV เมื่ออัตราการขยาย 10 เท่า.....	39
2.37 แสดงการกำจัดแรงดันออฟเซ็ทโดยการให้ขยายเฉพาะแรงดันที่เป็นไฟสลัป.....	40
2.38 แสดงวิธีการปรับแรงดันออฟเซ็ท.....	40
2.39 แสดงการใช้นาลอกรสวิทช์เพื่อเปิดปิดวงจรทางอินพุต.....	41
2.40 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไบแอสที่อินพุตในไอซีแบบต่างๆ.....	42
2.41 ผลของกระแสไบแอสทางอินพุต.....	42
2.42 แสดงการต่อตัวต้านทานที่อินพุตทั้งสองให้สมดุลกัน.....	43
2.43 แสดงผลของกระแสออฟเซ็ท.....	44
2.44 คลื่นที่เหมือนกัน ความถี่เท่ากันแต่ขนาดต่างกัน สลัวเรทจะไม่เท่ากัน.....	45

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
2.45 แสดงผลของการป้อนกลับ.....	46
2.46 อัตราสล็อตเรทที่ดีทำให้ได้รูปขายนที่ไม่ผิดเพี้ยนจากการขยาย.....	46
2.47 แสดงขีดความสามารถของโตนคอนโทรล.....	47
2.48 แสดงการชดเชยเฟสของออปแอมป์เบอร์ LM709.....	47
2.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายกับสล็อตเรท.....	48
2.50 อัตราขยายของออปแอมป์มีผลทำให้ผลตอบสนองความถี่เปลี่ยนไป.....	49
2.51 แสดงการต่อตัวเก็บประจุชดเชยเฟสขนานเข้ากับตัวต้านทานป้อนกลับ.....	49
2.52 แสดงการชดเชยเฟสที่ทำให้สล็อตเรทไม่เลวลง.....	50
2.53 วงจรขยายแบบกลับขั้ว.....	51
2.54 วงจรขยายแบบไม่กลับขั้ว.....	52
2.55 วงจรตามแรงดัน.....	53
2.56 วงจรขยายผลบวก.....	53
2.57 วงจรขยายผลต่าง.....	54
2.58 ผลของฮีสเตอร์รีซิส.....	56
2.59 ภาพตัวอย่างการทำงานของรีเลย์ ที่ต่อกับหลอดไฟ 1 หลอด.....	58
2.60 ภาพตัวอย่างการทำงานของรีเลย์ ที่ต่อกับหลอดไฟ 2 หลอด.....	58
บทที่ 3 การออกแบบระบบ.....	61
3.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน.....	61
3.2 ส่วนวงจรการวัดแรงดันแบตเตอรี่.....	62
3.3 ส่วนวงจรการ charge-discharge แบตเตอรี่.....	63
3.4 ส่วนวงจรการป้องกัน เรืองอุณหภูมิด้วย NTC.....	63
3.5 PTC.....	64
3.6 วงจรรวม ด้านหน้า.....	65
3.7 วงจรรวม ด้านหลัง.....	65

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
3.8 schematic วงจรรวม.....	66
3.9 แผนผังการทำงานของโปรแกรมหลัก.....	67
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	68
4.1 รูปผู้ทดลองจ่ายไฟ และสังเกตผล.....	68
4.2 รูปกราฟการชาร์ตแบตเตอรี่ ที่แรงดันแบตเตอรี่ 3.6 – 3.7 volt.....	68
4.3 รูปกราฟการชาร์ตแบตเตอรี่ ที่แรงดันแบตเตอรี่ 3.6 – 3.9 volt.....	69
4.4 รูปกราฟการชาร์ตแบตเตอรี่ ที่แรงดันแบตเตอรี่ 3.6 – 4.2 volt.....	69
4.5 รูปกราฟการหยุดชาร์ตแบตเตอรี่ ที่แรงดันแบตเตอรี่ 4.2 volt.....	70
4.6 รูปกราฟการหยุดชาร์ตแบตเตอรี่ ที่แรงดันแบตเตอรี่ 4.2 volt.....	70



สารบัญตาราง

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ระยะเวลาในการทำโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แสดงคุณสมบัติของสารประกอบลิเทียมที่นำมาทำเป็นขั้วแคโทดในแบตเตอรี่.....	5
2.2 แสดงคุณสมบัติของประเภทแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน.....	6
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	68
4.1 ผลการทดสอบการหยุดการชาร์จ.....	71
4.2 ค่าแรงดันแบตเตอรี่แต่ละก้อน.....	71
4.3 ค่าแรงดันแบตเตอรี่แต่ละก้อน.....	72
4.4 ผลการทดลองการทำงานของวงจรป้องกันอุณหภูมิ.....	72



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันมีการนำแบตเตอรี่ NCR18650 ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมาใช้งานอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น สามารถนำไปใช้ spot ทำเป็นแบตเตอรี่สำรอง, แบตเตอรี่สว่านไฟฟ้า หรือเครื่องมือไฟฟ้าหลายประเภท และยังเป็นแบตเตอรี่ชนิดเดียวกันกับที่นำไปใช้ในรถไฟฟ้ายกด้วย เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นชนิดลิเทียมไอออน ทำให้มีประสิทธิภาพสูงและราคาค่อนข้างสูงรวมไปถึงถ้าหากมีการชาร์จที่ไม่ถูกวิธีอาจเป็นอันตรายแก่ผู้ใช้งานได้ ซึ่งทางผู้จัดทำโครงการจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในเรื่องของความปลอดภัยของผู้ที่ใช้งานและเพื่อยืดระยะเวลาการใช้งานของแบตเตอรี่ถ้าหากมีการชาร์จไฟที่ถูกต้อง ดังนั้นทางผู้จัดทำโครงการจึงได้จัดทำวงจร และเขียนโปรแกรม เพื่อพัฒนาระบบควบคุมการชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่ชนิดนี้ขึ้นมาเพื่อลดอันตรายจากการใช้งานและเพื่อยืดระยะเวลาการใช้งานของแบตเตอรี่อย่างที่เราจะเป็นดังที่กล่าวมาข้างต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาวงจรการชาร์จแบตเตอรี่ NCR 18650 Lithium Ion ในรถไฟฟ้ายก
2. เพื่อศึกษาการใช้งานของบอร์ดควบคุม Arduino
3. เพื่อศึกษาการเขียนโค้ดคำสั่งเพื่อควบคุมบอร์ด Arduino

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ทำการเขียนคำสั่งควบคุมโดยใช้บอร์ด Arduino
2. วัสดุหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการได้แก่
 - บอร์ดควบคุมการชาร์จ
 - แบตเตอรี่ NCR18650 Lithium Ion
 - อุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล
 - สายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 สมมติฐานของการศึกษา

สามารถควบคุมการชาร์จไฟให้กับแบตเตอรี่ 10 ก้อนต่ออนุกรมกันอยู่ได้ ดิสชาร์จไฟให้กับโหลดได้ และสามารถควบคุมความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นในการชาร์จและดิสชาร์จ

1.5 ระยะเวลาในการทำโครงการ

หัวข้อการปฏิบัติงาน	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
	9-31	1-28	1-31	1-10
1. ศึกษาการ Balance cell	←→			
2. ออกแบบวงจรการชาร์จและเขียนโค้ดให้ Arduino และเก็บค่า		←→		
3. ทำชิ้นงานต้นแบบ			←→	
4. ทำการทดสอบและบันทึกผล			←→	
5. เปรียบเทียบค่า และสรุปผล				←→

1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. ได้ฝึกวิธีการออกแบบ การคำนวณ และการคิดแบบเชิงวิศวกรรม
2. ได้ฝึกทักษะในการทำงานและฝึกฝนการทำงานร่วมกันเป็นกลุ่ม
3. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการทำโครงการเรื่องนี้ไปประยุกต์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงระบบการทำงาน ส่วนประกอบและอุปกรณ์ต่างในการทำระบบควบคุมการชาร์จของแบตเตอรี่ NCR18650 Lithium Ion รวมไปถึงทฤษฎีและรายละเอียดต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงงานดังต่อไปนี้

2.1 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย เซลล์ไฟฟ้าเคมี หนึ่งเซลล์หรือมากกว่า ที่มีการเชื่อมต่อภายนอก เพื่อให้กำลังงานกับอุปกรณ์ไฟฟ้า แบตเตอรี่มี ขั้วบวก (cathode) และ ขั้วลบ (anode) ขั้วที่มีเครื่องหมายบวก จะมีพลังงานศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าขั้วที่มีเครื่องหมายลบ ขั้วที่มีเครื่องหมายลบคือแหล่งที่มาของอิเล็กตรอนที่เมื่อเชื่อมต่อกับวงจรภายนอกแล้วอิเล็กตรอนเหล่านี้จะไหลและส่งมอบพลังงานให้กับอุปกรณ์ภายนอก เมื่อแบตเตอรี่เชื่อมต่อกับวงจรภายนอก สาร อิเล็กโทรไลต์ มีความสามารถที่จะเคลื่อนที่โดยทำตัวเป็นไอออน ยอมให้ปฏิกิริยาทางเคมีทำงานแล้วเสร็จในขั้วไฟฟ้าที่อยู่ห่างกัน เป็นการส่งมอบพลังงานให้กับวงจรภายนอก การเคลื่อนไหวของไอออนเหล่านั้นที่อยู่ในแบตเตอรี่ทำให้เกิดกระแสไหลออกจากแบตเตอรี่เพื่อปฏิบัติงาน ในอดีตคำว่า "แบตเตอรี่" หมายถึงเฉพาะอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยเซลล์หลายเซลล์ แต่การใช้งานได้มีการพัฒนาให้รวมถึงอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยเซลล์เพียงเซลล์เดียว

แบตเตอรี่ปฐมภูมิจะถูกใช้เพียงครั้งเดียวหรือ "ใช้แล้วทิ้ง" วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรในช่วงปล่อยประจุออก (discharge) ตัวอย่างที่พบบ่อยก็คือ แบตเตอรี่อัลคาไลน์ ที่ใช้สำหรับ ไฟฉาย และอีกหลายอุปกรณ์พกพา แบตเตอรี่ทุติยภูมิ (แบตเตอรี่ประจุใหม่ได้) สามารถดีชาร์จและชาร์จใหม่ได้หลายครั้ง ในการนี้องค์ประกอบเดิมของขั้วไฟฟ้าสามารถเรียกคืนสภาพเดิมได้โดยกระแสย้อนกลับ ตัวอย่างเช่นแบตเตอรี่ตะกั่วกรด ที่ใช้ในยานพาหนะ และแบตเตอรี่ ลิเทียมไอออน ที่ใช้สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบเคลื่อนย้ายได้

แบตเตอรี่มาในหลายรูปทรงและหลายขนาด จากเซลล์ขนาดเล็กที่ให้พลังงานกับ เครื่องช่วยฟัง และนาฬิกาข้อมือ จนถึงแบตเตอรี่แบบคัมพัสที่มีขนาดเท่าห้องที่ให้พลังงานเตรียมพร้อมสำหรับ ชุมสายโทรศัพท์ และ ศูนย์ข้อมูล คอมพิวเตอร์

2.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่แปลงพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง แบตเตอรี่ประกอบด้วยเซลล์แบบโวลตาได้มากกว่าหนึ่งเซลล์ แต่ละเซลล์ประกอบด้วยสองครึ่งเซลล์ ที่เชื่อมต่อเรียงกันเป็นแถวโดยสารอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าที่มีไอออนที่มีประจุลบ (anion) และไอออนที่มีประจุบวก (cation) ครึ่งเซลล์หนึ่งตัวจะมีอิเล็กโทรไลต์และขั้วลบ(อิเล็กโทรดที่แอนไอออนวิ่งเข้าหา) อีกครึ่งเซลล์หนึ่งจะมีอิเล็กโทรไลต์และขั้วบวก(อิเล็กโทรดที่แคทไอออนวิ่งเข้าหา Redox ปฏิกิริยา Redox เป็นตัวให้พลังงานกับแบตเตอรี่ แคทไอออนจะลดลง (อิเล็กตรอนมีการเพิ่ม) ที่แคโทดระหว่างการชาร์จประจุ ในขณะที่แอนไอออนจะถูกออกซิไดซ์ (อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออก) ที่ขั้วบวกระหว่างการชาร์จ ในระหว่างการดิสชาร์จกระบวนการจะเป็นตรงกันข้าม ขั้วไฟฟ้าทั้งสองไม่ได้สัมผัสกัน แต่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าโดย อิเล็กโทรไลต์ เซลล์บางตัวใช้อิเล็กโทรไลต์แตกต่างกันสำหรับแต่ละครึ่งเซลล์ ตัวคั่นช่วยให้ไอออนไหลระหว่างครึ่งเซลล์ แต่จะช่วยป้องกันการผสมของอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองด้าน

แต่ละครึ่งเซลล์มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า (หรือ EMF) ที่กำหนดโดยความสามารถของมันในการขับเคลื่อนกระแสไฟฟ้าจากภายในสู่ภายนอกของเซลล์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าสุทธิของเซลล์คือความแตกต่างระหว่าง EMFs ของครึ่งเซลล์ของมัน ดังนั้นหากขั้วไฟฟ้ามี EMFs = \mathcal{E}_1 และ \mathcal{E}_2 ดังนั้น EMF สุทธิจะเป็น $\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$ พุดอีกอย่าง EMF สุทธิคือความแตกต่างระหว่าง Reduction potential ของครึ่งปฏิกิริยา

แรงขับไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วของเซลล์เรียกว่า แรงดันไฟฟ้า(แตกต่าง)ที่ขั้วและถูกวัดเป็นโวลต์แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเซลล์ที่ไม่ใช่ทั้งกำลังชาร์จและดิสชาร์จเรียกว่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด และเท่ากับ emf ของเซลล์ ผลจากความต้านทานภายใน แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเซลล์ที่กำลังดิสชาร์จจึงมีขนาดเล็กกว่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเซลล์ที่กำลังชาร์จก็จะมีมากกว่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด

เซลล์ในอุดมคติจะมีความต้านทานภายในเล็กน้อยจนตัดทิ้งได้ ดังนั้นมันจึงจะรักษาระดับแรงดันที่ขั้วให้มีค่าคงที่ที่เท่ากับ \mathcal{E} จนหมดแรง แล้วลดลงไปอยู่ที่ศูนย์ ถ้าเซลล์ดังกล่าวสามารถรักษาระดับไว้ที่ 1.5 โวลต์และจัดเก็บประจุจำนวนหนึ่งคูลอมบ์ จากนั้นเมื่อมันดิสชาร์จอย่างสมบูรณ์ มันควรจะสามารถทำงานได้ 1.5 จูล ในเซลล์ปกติ ความต้านทานภายในจะเพิ่มระหว่างการดิสชาร์จ และแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดก็จะลดลงด้วยระหว่างการดิสชาร์จ ถ้าแรงดันไฟฟ้าและความต้านทานถูกวาดเป็นกราฟกับแกนเวลา รูปรกราฟที่ได้มักจะเป็นเส้นโค้งรูปร่างของเส้นโค้งจะแปรไปตามคุณสมบัติทางเคมีและการจัดแจงภายใน

แรงดันไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าของเซลล์จะขึ้นอยู่กับการปลดปล่อยพลังงานของปฏิกิริยาเคมีของขั้วไฟฟ้าและ อิเล็กโทรไลต์ของมัน เซลล์แบบอัลคาไลน์ และแบบสังกะสีคาร์บอน มีปฏิกิริยาเคมีแตกต่างกัน แต่มี EMF ประมาณเดียวกันที่ 1.5 โวลต์ ในทำนองเดียวกัน เซลล์แบบ NiCd และแบบ NiMH จะมีเคมีที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่มี EMF ประมาณเดียวกันที่ 1.2 โวลต์ การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าเคมีที่สูงในปฏิกิริยาของสารประกอบลิเทียม จะเป็นผลให้เซลล์ลิเทียมมี EMF ที่ 3 โวลต์หรือมากกว่า

2.3 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-Ion)

2.3.1 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-Ion)

- ขั้วแคโทด (Cathode) จะเป็นสารประกอบธาตุลิเทียม (Lithium) ประกอบด้วย

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของสารประกอบลิเทียมที่นำมาทำเป็นขั้วแคโทดในแบตเตอรี่

สารประกอบ	ค่าแรงดันปกติ(V)	ค่าขีดความสามารถ(mAh/g)
LiCoO_2	3.7	140
LiMnO_2	4.0	100
LiFePO_4	3.3	170
Li_2FePO_4	3.6	115

- ขั้วแอโนด (Anode) จะเป็นธาตุคาร์บอน (Carbon)
- ข้อดี (Advantages)
 - มีค่าสัดส่วนพลังงานต่อน้ำหนักที่ดีที่สุด
 - มีการคายประจุตัวมันเอง 5% ต่อเดือน (ในนิกเกิลเมทัลไฮไดร; Ni-MH จะเป็น 30%)
 - ไม่มีผลในเรื่องความจำ (memory effect)
- ข้อเสีย (Disadvantages)
 - จะเสื่อมสภาพหากไม่ได้ใช้งาน
 - อุณหภูมิที่สูงจะลดอายุการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

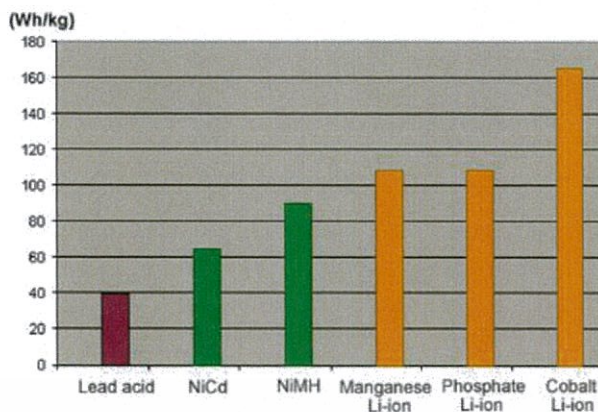
2.3.2 ประเภทแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของประเภทแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

Chemistry	Nominal Voltage (V)	Charge Voltage Limit (V)	Charge & Discharge C- rate	Energy Density (Wh/kg)	Application	Notes
Cobalt	3.6	4.2	1C limit	110-190	ใช้ในโทรศัพท์มือถือ, กล้อง, แลปท็อป	ใช้มาตั้งแต่ช่วงปี 1990 ใช้สำหรับอุปกรณ์พกพาได้ มีค่าความหนาแน่นพลังงานสูง
Manganese	3.7-3.8	4.2	10C cont. 40C pulse	110-120	ใช้ในอุปกรณ์ทางกำลังงานและอุปกรณ์ทางการแพทย์	มีค่าความต้านทานภายในต่ำ อัตราการให้กระแสสูง มีการชาร์จประจุเร็วแต่มีค่าความหนาแน่นพลังงานต่ำ
Nickel-Cobalt Manganese	3.7	4.1	5C cont. 30C pulse	95-130	ใช้ในอุปกรณ์ทางกำลังงานและอุปกรณ์ทางการแพทย์	เป็นการปรับความเข้ากันได้ระหว่างอัตราการให้กระแสสูงและขีดความสามารถสูง
Phosphate	3.2-3.3	3.6	35C cont.	95-140	ใช้ในอุปกรณ์ทางกำลังงานและอุปกรณ์ทางการแพทย์	เป็นของใหม่ อัตราการให้กระแสสูง อายุการใช้งานนาน หากชาร์จด้วยแรงดันสูงจะเพิ่มขีดความสามารถแต่อายุการใช้งานสั้นลง

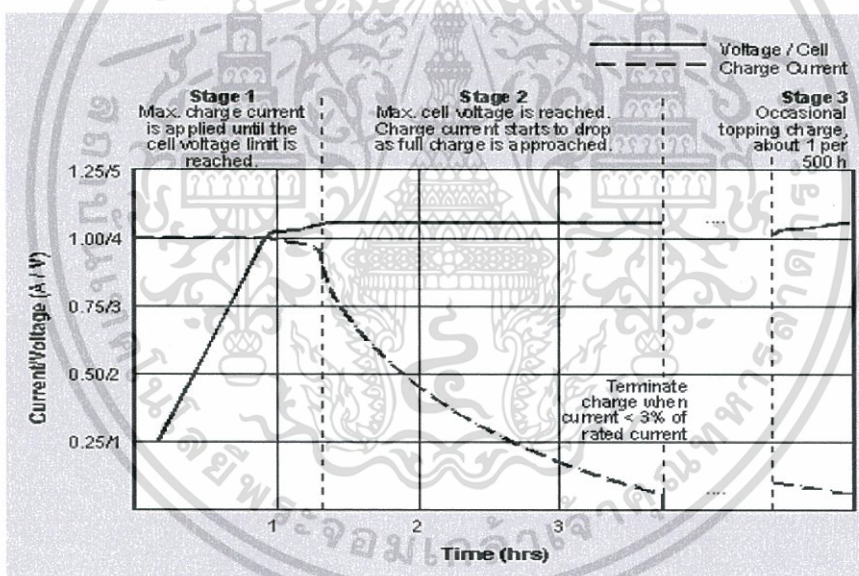
หากเปรียบเทียบอัตราความหนาแน่นพลังงานในชนิดแบตเตอรี่จะพบว่า ลิเทียมโคบอลต์ (Lithium-Cobalt) จะมีอัตราสูงสุด ส่วนแมงกานีส (Manganese) และฟอสเฟต (Phosphate) จะให้เสถียรภาพดีกว่าและให้กระแสไหลที่ดีกว่าโคบอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นพลังงานในแบตเตอรี่แต่ละชนิด
ที่มา: “Battery Cell Balancing” โดย Robert Tan IFAP ATV SMD SAE

2.3.3 วิธีการชาร์จแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงค่าแรงดันและกระแสระหว่างการชาร์จ

ที่มา: “Battery Cell Balancing” โดย Robert Tan IFAP ATV SMD SAE

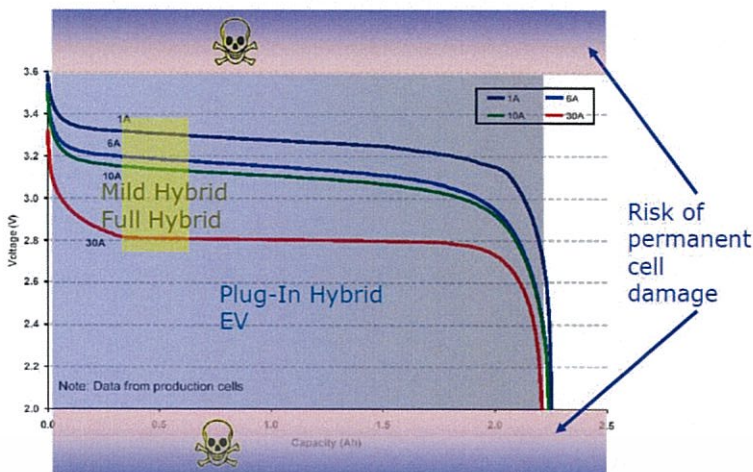
จะแบ่งช่วงการชาร์จได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่

ช่วงที่ 1 จะทำการคงที่กระแสแล้วปรับค่าแรงดันให้ได้ถึงขีดความสามารถสูงสุดแบตเตอรี่ เพื่อความเร็วในการชาร์จ

ช่วงที่ 2 เมื่อชาร์จจนถึงค่าแรงดันขีดความสามารถ กระแสชาร์จจะเริ่มตกลง

ช่วงที่ 3 จะมีการชาร์จเป็นครั้งคราว เพื่อทดแทนในส่วนที่ได้ใช้ไป อัตราประมาณ 1 ต่อ 500h

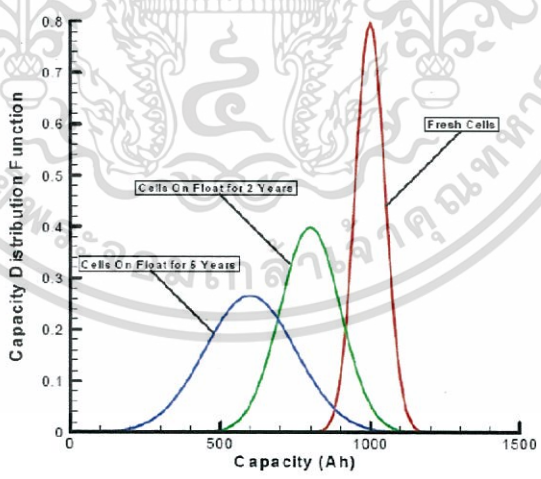
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงค่าแรงดันและขีดความสามารถในการชาร์จ
ที่มา: “Battery Cell Balancing” โดย Robert Tan IFAP ATV SMD SAE

จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ค่าแรงดันต่าง ๆ จะมีขีดความสามารถของแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงไม่เท่ากัน รวมทั้งช่วงการชาร์จที่เหมาะสมในรถยนต์ไฮบริดจ์แต่ละแบบด้วย สรุปได้ว่าการชาร์จจะต้องมีช่วงการปรับค่าแรงดันที่เหมาะสมมิเช่นนั้นจะมีผลต่อความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับตัวแบตเตอรี่ได้ ดังเห็นได้จากภาพว่าถ้าหากให้ค่าแรงดันสูงหรือต่ำไปจะส่งผลต่อโครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้อีก

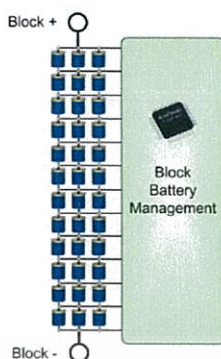
นอกจากนั้นอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะมีผลต่อขีดความสามารถในการใช้งานที่ลดลง แสดงได้จากกราฟการกระจายค่าขีดความสามารถ จะเห็นว่าเซลล์แบตเตอรี่ใหม่จะมีค่าการกระจายขีดความสามารถสูงสุดแล้วเซลล์แบตเตอรี่ที่มีอายุมากขึ้นจะมีค่าการกระจายขีดความสามารถที่ลดลง



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงค่าการกระจายขีดความสามารถของแบตเตอรี่
ที่มา: “Battery Cell Balancing” โดย Robert Tan IFAP ATV SMD SAE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของระบบแบตเตอรี่ที่ใช้งานอยู่ในรถยนต์จะมีลักษณะดังนี้ มีการต่อเซลล์แบบอนุกรม 10-12 เซลล์ และต่อกันแบบขนาน 1-3 เซลล์ ดังภาพ



รูปที่ 2.5 รูปแบบสถาปัตยกรรมระบบแบตเตอรี่ที่ใช้งานอยู่ในรถยนต์
ที่มา: “Battery Cell Balancing” โดย Robert Tan IFAP ATV SMD SAE

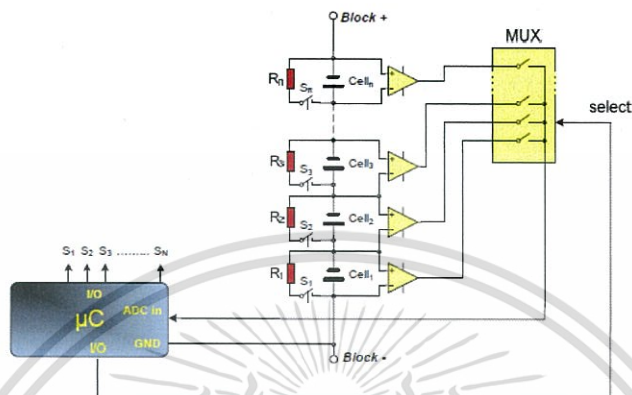
2.4 วงจรที่ใช้ในการจัดการความสมดุลของปริมาณประจุภายในเซลล์แบตเตอรี่ (Balancing circuit system)

ในวงจรระบบการจัดการความสมดุลนี้ จะมีส่วนประกอบของวงจร charge equalization ซึ่งจะทำการปรับค่าปริมาณประจุที่ต่างกันในแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ให้มีปริมาณที่เหมาะสมและเท่ากันในทุกเซลล์ เนื่องจากในแต่ละเซลล์แบตเตอรี่จะมีปริมาณประจุภายในเซลล์เหลือในปริมาณที่แตกต่างกัน วิตได้จากความแตกต่างของค่า SoC ในแต่ละเซลล์ เพราะฉะนั้นในระหว่างการชาร์จประจุ เซลล์แบตเตอรี่ที่มีค่า SoC สูงสุดจะมีค่าแรงดันถึงจุดสูงสุดก่อนเซลล์แบตเตอรี่อื่นๆ เช่นเดียวกับในตอนคายประจุ เซลล์แบตเตอรี่ที่มีค่า SoC ต่ำสุดปริมาณประจุจะหมดก่อนเซลล์แบตเตอรี่อื่นๆ ทำให้การใช้แบตเตอรี่นั้นไม่คุ้มค่าและสิ้นเปลือง เพราะไม่มีความสมดุลปริมาณประจุ

วงจรระบบการจัดการความสมดุลปริมาณประจุนี้จะถูกควบคุมอยู่ในระบบควบคุมการใช้งานแบตเตอรี่ ด้วยจะสามารถแบ่งออกเป็นรูปแบบได้ดังนี้

- แบบพาสซีฟ (Passive Balancing method)

จะมีความสามารถในการคายประจุในเซลล์แบตเตอรี่เท่านั้น เพื่อความเท่ากันของปริมาณประจุในเซลล์แบตเตอรี่ได้หมายความว่าเซลล์แบตเตอรี่อื่นจะคายประจุให้มีปริมาณเท่ากับเซลล์แบตเตอรี่ที่มีปริมาณประจุภายในเซลล์น้อยที่สุด



รูปที่ 2.6 รูปแบบวงจรการจัดการความสมดุลแบบพาสซีฟ
ที่มา: “Battery Cell Balancing” โดย Robert Tan IFAP-ATV-SMD-SAE

ในระบบนี้จะใช้ตัวต้านทานทนกำลังงานสูงต่อขานานกับเซลล์แบตเตอรี่เป็นตัวสร้างความสมดุลของปริมาณประจุภายในแต่ละเซลล์โดยจะมีสวิตช์ควบคุมเปิด-ปิดที่จะทำงานขึ้นอยู่กับค่าสถานะ SoC เพื่อควบคุมการกินกำลังงานของตัวต้านทาน แต่ในการคายประจุของเซลล์แบตเตอรี่จะเกิดขึ้นพร้อมกันจึงมีข้อควรระวังเกี่ยวกับความร้อนที่จะเกิดขึ้น

จะวัดค่าพารามิเตอร์หรือสถานะได้โดยการใช้วงจรดิฟเฟอเรนเชียลแอมพลิฟายเออร์ (Differential Amplifier) และมัลติเพล็กซ์เซอร์ (Multiplexer) ส่งค่าการควบคุมต่างๆไปที่ระบบคอนโทรลเลอร์ควบคุม

2.5 NCR18650 Lithium Ion

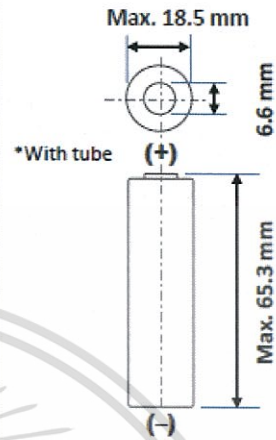
NCR18650 Lithium Ion เป็นแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดย NCR18650 Lithium Ion มีคุณสมบัติต่างๆดังต่อไปนี้

Specifications

Rated capacity ⁽¹⁾	Min. 2700mAh
Capacity ⁽²⁾	Min. 2750mAh Typ. 2900mAh
Nominal voltage	3.6V
Charging	CC-CV, Std. 1925mA, 4.20V, 3.0 hrs
Weight (max.)	46.5 g
Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C
Energy density ⁽³⁾	Volumetric: 577 Wh/l Gravimetric: 214 Wh/kg

⁽¹⁾ At 20°C ⁽²⁾ At 25°C ⁽³⁾ Energy density based on bare cell dimensions

Dimensions



For Reference Only

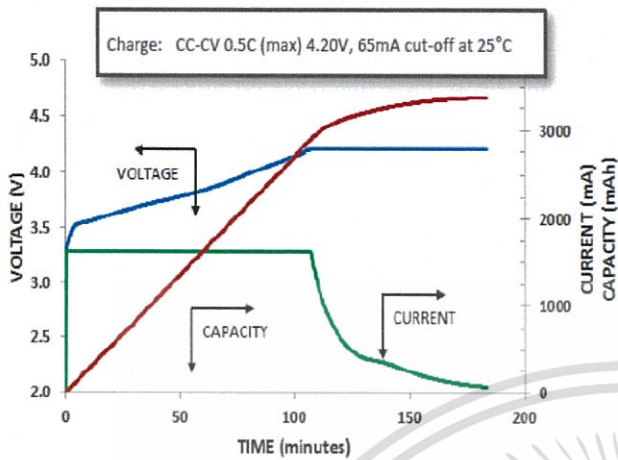
รูปที่ 2.7 คุณสมบัติและขนาดของ NCR18650 Lithium Ion

ที่มา: “NCR 18650 Lithium Ion” โดย PANASONICBATTERY [Panasonic Battery Group]

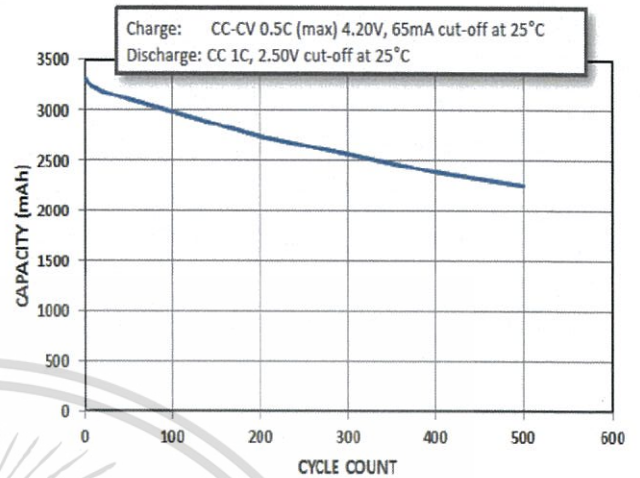
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 พฤติกรรมของการชาร์จกระแสไฟเข้าแบตเตอรี่ NCR18650 Lithium Ion

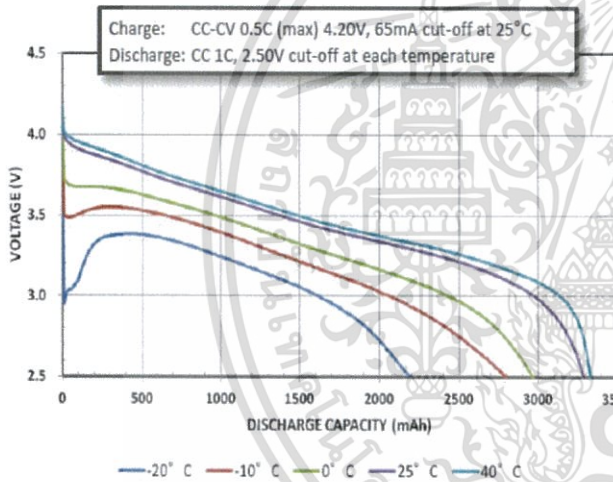
Charge Characteristics



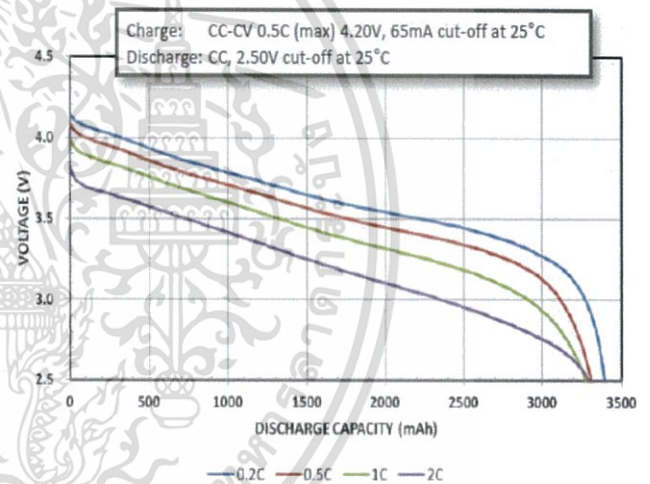
Cycle Life Characteristics



Discharge Characteristics (by temperature)



Discharge Characteristics (by rate of discharge)



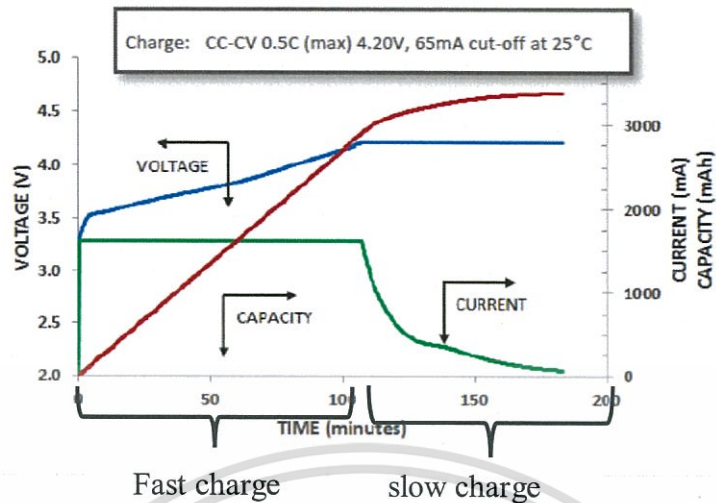
The data in this document is for descriptive purposes only and is not intended to make or imply any guarantee or warranty.

รูปที่ 2.8 กราฟแสดงพฤติกรรมของการชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่

ที่มา: “NCR 18650 Lithium Ion” โดย PANASONICBATTERY [Panasonic Battery Group]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Charge Characteristics



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงพฤติกรรมของการชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่

ที่มา: “NCR 18650 Lithium Ion” โดย PANASONICBATTERY [Panasonic Battery Group]

จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าการชาร์จไฟจะแบ่งออกเป็นสองช่วง คือ fast charge และ slow charge โดยช่วง fast charge จะเป็นช่วงเริ่มต้นของการชาร์จมีการอัดแรงดันไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเห็นจากกราฟ(เส้นสีแดง) ในช่วงนี้กระแสไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ (Constant current) ส่วนในช่วง slow charge จะเป็นช่วงที่มีการอัดแรงดันเข้าแบตเตอรี่ใกล้เต็มจะสังเกตว่าแรงดันมีค่าเริ่มคงที่ (Constant voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าจะเริ่มมีค่าลดลง

2.7 ส่วนประกอบของระบบควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ NCR18650 Lithium Ion

ระบบควบคุมการชาร์จของแบตเตอรี่ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักใหญ่ได้แก่ บอร์ดควบคุมการชาร์จ ตัวแปลงสัญญาณ DAC แบตเตอรี่ และระบบตรวจเช็คการชาร์จ โดยมีรายละเอียดของการทำงานในแต่ละส่วนดังนี้

2.7.1 บอร์ดควบคุมการชาร์จ ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายไฟเข้าแบตเตอรี่ตามเงื่อนไขที่เรากำหนด

2.7.2 ตัวแปลงสัญญาณ DAC (Digital to analog converter) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากดิจิตอลจากบอร์ดควบคุมไปเป็นสัญญาณอนาล็อกก่อนเข้าแบตเตอรี่

2.7.3 แบตเตอรี่ ทำหน้าที่รับกระแสไฟจากบอร์ดควบคุมที่ทำการจ่ายไฟ

2.7.4 ระบบการตรวจเช็คการชาร์จ ทำหน้าที่ตรวจเช็คระดับกระแสไฟฟ้าในฟ้าแล้วส่งข้อมูลไปยังในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อกเข้าไปยังบอร์ดควบคุมเพื่อเช็คระดับแรงดันไฟฟ้าในแบตเตอรี่ว่าอยู่ในเงื่อนไขของคำสั่งที่เรากำหนดหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 Arduino Mega 2560



รูปที่ 2.10 Arduino Mega

ที่มา: “Arduino Mega 2560” โดย <https://www.arduino.cc>

Arduino Mega 2560 บอร์ดรุ่นใหญ่ในของตระกูล Arduino มีคุณสมบัติต่างๆ เพิ่มขึ้นจาก Arduino Uno R3 ใช้ชิพ ATmega2560 ที่มีหน่วยความจำแฟลช 256 KB แรม 8 KB ใช้ไฟเลี้ยง 7 ถึง 12 V แรงดันของระบบอยู่ที่ 5 V มี Digital Input / Output มากถึง 54 ขา (เป็น PWM ได้ 14 ขา) มี Analog Input 16 ขา Serial UART 4 ชุด I2C 1 ชุด SPI 1 ชุด เขียนโปรแกรมบน Arduino IDE และโปรแกรมผ่าน USB เหมาะสำหรับผู้ที่สนใจเริ่มต้นเรียนรู้การพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ต้องการบอร์ด Arduino ที่มีหน่วยความจำและขาสัญญาณต่างๆ ให้ต่อใช้งานมากขึ้น

Arduino Mega 2560 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำงานบนพื้นฐานของ ATmega2560 ซึ่งประกอบด้วย

- 54 digital input/output pins (15 pin สามารถใช้เป็น PWM output ได้)
- 16 analog inputs
- 4 UARTs
- 16 MHz crystal oscillator (ใช้สำหรับรองความถี่ให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์)
- USB connection
- ปุ่มกด reset
- ช่องเสียบแหล่งจ่าย
- ICSP header :In-Circuit Serial Programming (ส่วนที่เป็น AVR ขนาดเล็กสำหรับการโปรแกรม Arduino ซึ่งประกอบด้วย MOSI, MISO, SCK, RESET, VCC,GND)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยบอร์ด Arduino Leonardo นี้มีทุกสิ่งที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์จำเป็นต้องใช้อย่างการต่อไฟเลี้ยง สามารถทำได้ทั้งการเชื่อมต่อเข้ากับ USB cable หรือ จ่ายไฟด้วย AC-DC adapter หรือ การใช้แบตเตอรี่ ซึ่ง Mega เป็นบอร์ดที่เข้ากันได้กับ shield ที่ออกแบบมาเพื่อ Arduino Duemilanove หรือ Diecimila

Mega 2560 นี้มีความแตกต่างจากบอร์ดก่อนหน้านี้ตรงที่ไม่ใช้ FTDI USB-to-serial driver chip แต่จะมี ATmega16U2 เข้ามาเป็นโปรแกรมแปลง USB-to-serial

Arduino Mega2560 Revision 2 มี ATmega8U2 ทำให้อัพเดท firmware ผ่าน USB protocol ที่เรียกว่า DFU(Device Firmware Update) ได้ง่ายขึ้น

Arduino Mega Revision 3 มี featureใหม่ๆเพิ่มขึ้นมาดังนี้

- 1.0 pinout: เพิ่ม SDA และ SCL (อยู่ใกล้กับ AREF pin) และอีกสอง pins ใหม่คือ IOREF เป็น pin ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับ shields เพื่อแปลงเป็นแรงดันที่ได้จากบอร์ด ส่วนอีก 1 pin ที่เหลือมีไว้สำหรับใช้ร่วมกับ AVR ในอนาคต

- วงจร Reset ที่ดีขึ้น

- ใช้ ATmega 16U2 แทน 8U2

Memory

ATmega2560 มีหน่วยความจำ 256 KB (8 KB ใช้สำหรับ bootloader) นอกจากนี้ยังมีอีก 8 KB สำหรับ SRAM และ 4 KB สำหรับ EEPROM

Input and Output

ในแต่ละ digital pins ทั้ง 54 pins บนบอร์ด Arduino Uno สามารถเป็นได้ทั้ง input และ output โดยจะทำงานที่แรงดัน 5 V และให้กระแสสูงสุด 40 mA

Power

Arduino Mega สามารถเชื่อมรับพลังงานโดยการเชื่อมต่อ micro USB connector หรือ จาก power supply จากภายนอกได้ โดยแหล่งพลังงานจะถูกเลือกโดยอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งจ่ายจากภายนอกสามารถมาได้จาก AC-to-DC adapter หรือจากแบตเตอรี่ โดยต่อเข้ากับ 2.1mm center-positive plug ไปยังช่องเสียบแหล่งจ่าย และการต่อเข้ากับแบตเตอรี่สามารถทำได้โดยการต่อเข้ากับ GND และ Vin pin header ของ power connector

บอร์ดสามารถทำงานได้ในช่วงแรงดัน 6 ถึง 20 volts ถ้า แหล่งจ่ายมีค่าต่ำกว่า 7 V อาจส่งผลให้ 5 V pin มีแรงดันที่ต่ำกว่า 5V และ บอร์ดอาจจะไม่เสถียร แต่ถ้าหากแรงดันมีค่าสูงกว่า 12 V อาจส่งผลให้บอร์ด Overheat และอาจทำให้บอร์ดเสียหายได้ ดังนั้นช่วงแรงดันที่เหมาะสมกับบอร์ดคือ 7 V ถึง 12 V

- VIN เป็น input voltage ของบอร์ด Arduino โดยใช้แหล่งจ่ายจากภายนอก
- 5V เป็น output pin ที่ควบคุม 5 V จากบอร์ด
- 3V3 เป็น 3.3 volt supply ที่สร้างขึ้นจาก regulator บนบอร์ด และให้กระแสได้สูงสุด 50 mA
- GND เป็น ground pin
- IOREF เป็น pin ที่ให้ voltage reference กับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อเลือกค่าแรงดันให้กับ shield ที่มาเชื่อมต่อกับบอร์ด

ฟังก์ชันอื่นๆเพิ่มเติม

Serial: 0 (Rx) และ 1(Tx); Serial 1: 19(Rx) และ 18 (Tx); Serial 2: 17 (Rx) และ 16(Tx); Serial 3:15 (Rx) และ 14 (Tx) ใช้สำหรับรับ (Rx) และส่ง(Tx) TTL serial data โดย pin 0 และ 1 จะถูกเชื่อมต่อไปยัง corresponding pins ของ ATmega16U2 USB-to-TTL serial chip

External Interrupts: 2 (interrupt 0), 3 (interrupt 1), 18 (interrupt 5), 19 (interrupt 4), 20 (interrupt 3), 21 (interrupt 2). Pins เหล่านี้สามารถที่จะกำหนดค่าที่เรียก interrupt ในค่าต่างๆ, ขอบขาขึ้นและลง หรือเปลี่ยนแปลงค่า

PWM: 2 ถึง 13 และ 44 ถึง 46 ให้ output PWM output 8-bits

SPI: 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS) ใช้สำหรับรองรับการสื่อสารแบบ SPI โดยที่ไม่เกี่ยวข้องกับ ICSP header ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับ Uno, Duemilanove และ Diecimila

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LED 13: เป็น build-in LED ที่เชื่อมต่อกับ digital pin 13 เมื่อ pin มีค่าเป็น HIGH LED จะติด , แต่เมื่อ pin เป็น LOW LED จะดับ

TWI : 20 (SDA) and 21 (SCL). รองรับการเชื่อมต่อแบบ TWI(I2C)

บอร์ด Mega2560 มี 16 analog inputs แต่ละ pins ให้ความละเอียด 10 bits

AREF. แรงดันอ้างอิง สำหรับ analog input

Reset ใช้ในการ reset ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยทั่วไปจะใช้โดยการเพิ่มปุ่ม reset ไว้บน sheild เพื่อป้องกันปุ่มที่อยู่บนบอร์ด

Communication

Arduino Uno สามารถสื่อสารกับคอมพิวเตอร์, Arduino ตัวอื่นๆ หรือ microcontroller ได้ โดยที่ไมโครคอนโทรลเลอร์บนบอร์ด คือ ATmega32U4 จะให้การสื่อสารแบบอนุกรม UART TTL (5 V) ซึ่งมีอยู่ใน pins 0 (Rx) และ 1 (Tx) นอกจากนี้ 32U4 สามารถใช้การสื่อสารแบบอนุกรมผ่าน USB และจะปรากฏเป็น COM port เสมือนไปยัง Software แต่อย่างไรก็ตามต้องใช้ไฟล์ .inf บนระบบปฏิบัติการ Windows แต่ OSX และ Linux สามารถ recognize ได้โดยอัตโนมัติ

Programming

Arduino Uno สามารถรองรับการโปรแกรมด้วย Arduino Software โดยสามารถใช้ได้ทั้งในระบบปฏิบัติการ Windows, Mac OS X และ Linux

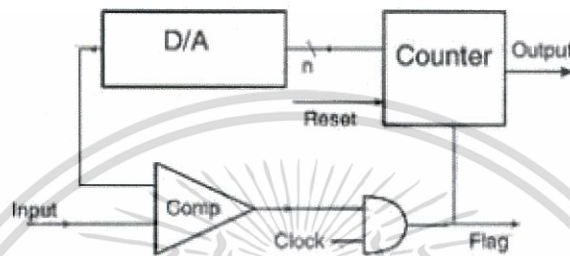
2.9 Analog to Digital Converter (การแปลงสัญญาณอนาล็อก-ดิจิตอล)

สัญญาณที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มี 2 ชนิด คือ สัญญาณอนาล็อก และสัญญาณดิจิตอล สัญญาณอนาล็อก จะใช้ใน อุปกรณ์ต่างๆ ไป และใช้ในการควบคุมแบบเก่า ในปัจจุบันมีไมโครโปรเซสเซอร์ และไมโครคอนโทรลเลอร์ เข้ามาช่วยในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย ซึ่งทำให้การควบคุมนั้นทำได้ง่าย และรวดเร็วยิ่งขึ้น แต่ในการควบคุมนั้น เราจำเป็นต้องใช้ สัญญาณดิจิตอลในการติดต่อกับไมโครโปรเซสเซอร์ หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่ในความเป็นจริงนั้น เราใช้สัญญาณอนาล็อกในการควบคุม ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อก เป็นสัญญาณดิจิตอล แล้วจึงนำสัญญาณนั้นเข้ามาสู่ไมโครโปรเซสเซอร์ หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้ควบคุมระบบต่อไปแม้ว่าสัญญาณอนาล็อกนั้นมีความแน่นอน และแม่นยำสูง แต่สัญญาณอนาล็อกนั้นก็ควบคุมได้ยาก เนื่องจากในสภาพแวดล้อม มีสัญญาณรบกวนอยู่มาก และการที่จะทำให้การควบคุมแบบอนาล็อก มีความสามารถควบคุม เท่ากับการควบคุมแบบดิจิตอลนั้น ทำได้ยาก เนื่องจากวงจรควบคุมแบบ อนาล็อกจะต้องมีความซับซ้อนสูง อย่างไรก็ตาม สัญญาณดิจิตอลก็ไม่สามารถทดแทนความละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสัญญาณอนาล็อกได้อย่างสมบูรณ์ แต่ทำให้การควบคุมนั้นทำให้ง่าย และสะดวกยิ่งขึ้น
Counting Converter

Counting Converter เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดของการแปลงสัญญาณอนาล็อก เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้
อัลกอริทึม การนับค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แล้วนำผลที่ได้จากการนับไปเปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการที่ตั้งไว้ ลักษณะการ
ทำงานเป็นดังรูป

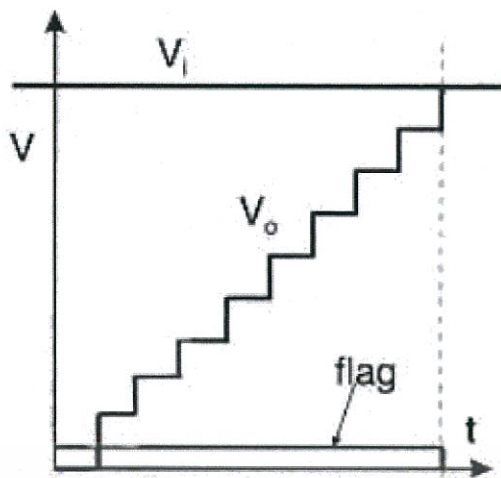


รูปที่ 2.11 วงจร Counting Converter A/D

ที่มา: “Analog to Digital Converter ” โดย www.cpe.ku.ac.th

จากวงจร Counter เป็นอุปกรณ์นับค่าที่เพิ่มขึ้นทีละหนึ่ง แล้วส่งค่าที่ได้ให้ D/A มีขา Reset รับสัญญาณ
Reset เมื่อต้องการให้เริ่มนับใหม่ D/A เมื่อรับค่าที่นับเพิ่มขึ้นทีละหนึ่งจากตัวนับ ก็แปลงค่าให้เป็นสัญญาณ
อนาล็อกที่มีค่าความต่างศักย์ค่าๆ หนึ่ง แล้วส่งต่อเข้าไปที่อุปกรณ์ตัวเปรียบเทียบ(Comparator)

Comparator จะเป็นอุปกรณ์ตัวเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ ของอินพุต และค่าจากที่ตัวนับ ถ้าหากทั้ง
สองสัญญาณมีค่าเท่ากันส่งค่าความต่างศักย์ 0 โวลต์ออกมา(ลอจิก 0) ถ้าไม่เท่ากันก็จะส่งความต่างศักย์ที่ไม่ใช่ 0
โวลต์ออกมา(ลอจิก 1) ซึ่งค่าความต่างศักย์ที่ออกมา จะนำมาเข้าลอจิกเกต "และ" กับ สัญญาณนาฬิกา จะได้ค่า
ลอจิกออกมา ถ้าผลลัพธ์ออกมาเป็นสัญญาณนาฬิกาแสดงว่ายังไม่ได้ผลลัพธ์เท่าที่ต้องการ สัญญาณนาฬิกาจะไป
ทำให้ตัวนับนับเพิ่มขึ้นต่อไป และเมื่อได้ค่าผลลัพธ์ดิจิทัลที่ต้องการแล้ว ค่าที่ได้จาก ตัวเปรียบเทียบจะให้ค่าความ
ต่างศักย์เป็น 0 (ลอจิก 0) ซึ่งเมื่อนำมาเข้าลอจิกเกต "และ" กับสัญญาณนาฬิกาแล้ว ก็จะทำให้ลอจิก 0 ซึ่งทำให้ตัวนับ
ไม่นับเพิ่มอีก ก็จะได้ค่าดิจิทัลจากตัวนับที่ต้องการจากคำอธิบายข้างต้นจะได้กราฟของ V_O ดังนี้



รูปที่ 2.12 กราฟแสดง output voltage A/D converter

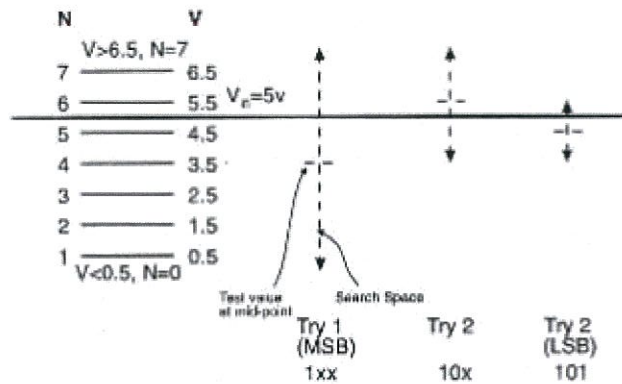
ที่มา: “Analog to Digital Converter ” โดย www.cpe.ku.ac.th

ข้อเสียของวิธีนี้ คือ การนับต้องเริ่มนับที่ 0 เสมอ และนับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ช้า เอาท์พุทที่ได้จะมี delay จึงไม่ค่อยนิยมใช้เท่าที่ควร จึงได้เปลี่ยนตัวนับเป็นแบบนับลงได้ด้วย ซึ่งจะอ้างอิงระดับจากระดับเก่า ทำให้ไม่จำเป็นต้องนับ 0 ใหม่ เมื่อมีการเปลี่ยนอินพุทใหม่ แต่ให้อ้างอิงกับผลลัพธ์เดิม ทำให้ได้ผลลัพธ์เร็วขึ้น

Successive Approximation

ใช้หลักการของ "binary search" ในการหาคำตอบ โดยนำค่าผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับค่ากึ่งกลางของช่วง เพื่อให้ทราบว่า ค่านั้นๆ มากกว่า หรือน้อยกว่า โดยจะปรับช่วงให้แคบลงมาเรื่อยๆ แล้วเปรียบเทียบผลลัพธ์กับค่ากึ่งกลางของช่วงไปเรื่อยๆ จนได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ เช่น เลขที่เป็นคำตอบคือ 3 จากช่วงของคำตอบที่ 0-7 ครั้งแรกเอาค่า $(0+7)/2 = 4$ มาเปรียบเทียบ ได้ผลว่า คำตอบที่ต้องการอยู่ในช่วงที่น้อยกว่า 4 ครั้งที่ 2 ก็เลือกค่า $(0+4)/2 = 2$ มาเปรียบเทียบ ได้ผลว่าคำตอบที่ต้องการอยู่ในช่วงที่มากกว่า 2 แต่น้อยกว่า 4 ครั้งที่ 3 ก็เลือกค่า $(2+4)/2 = 3$ มาเปรียบเทียบ ได้ผลว่าคำตอบที่ต้องการ

ข้อดีของวิธีนี้ คือ เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ n รอบแน่นอน (สำหรับ n bit converter ซึ่งอ้างอิงได้ $2n$ ระดับ และระดับ V_{in} ที่คงที่) ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าแบบ "Counting Algorithm" แต่มีข้อเสีย คือถ้า V_{in} เปลี่ยนทันทีทันใด ขณะที่กำลังทำ binary search อยู่ นั่น คำตอบที่ได้จะผิดพลาด ตัวอย่างเช่น เปลี่ยน V_{in} จาก 5 Volt เป็น 2 Volt



รูปที่ 2.13 Binary Search

ที่มา: “Analog to Digital Converter ” โดย www.cpe.ku.ac.th

ช่วงของ V_{in} คือ 1-7 ใช้ $n=3$ (เพราะว่า $2^3=8$)

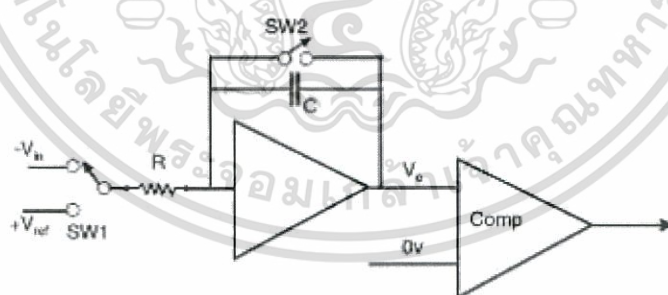
ครั้งแรก ใช้ 4 เปรียบเทียบกับ V_{in} (ซึ่งเท่ากับ 5 โวลต์) พบว่า อยู่ในช่วง lower ได้ 1xx

ครั้งที่ 2 ใช้ 2 เปรียบเทียบกับ V_{in} (ซึ่งเท่ากับ 5 โวลต์) พบว่า อยู่ในช่วง upper ได้ 10x

ครั้งที่ 3 ใช้ 3 เปรียบเทียบกับ V_{in} (ซึ่งเท่ากับ 5 โวลต์) พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จะผิดพลาด ได้ 100

Dual-Slope ADC

ใช้หลักการของวงจร Integrator ทำงานร่วมกับตัว Comparator ดังรูป



รูปที่ 2.14 วงจร Dual Slope A/D converter

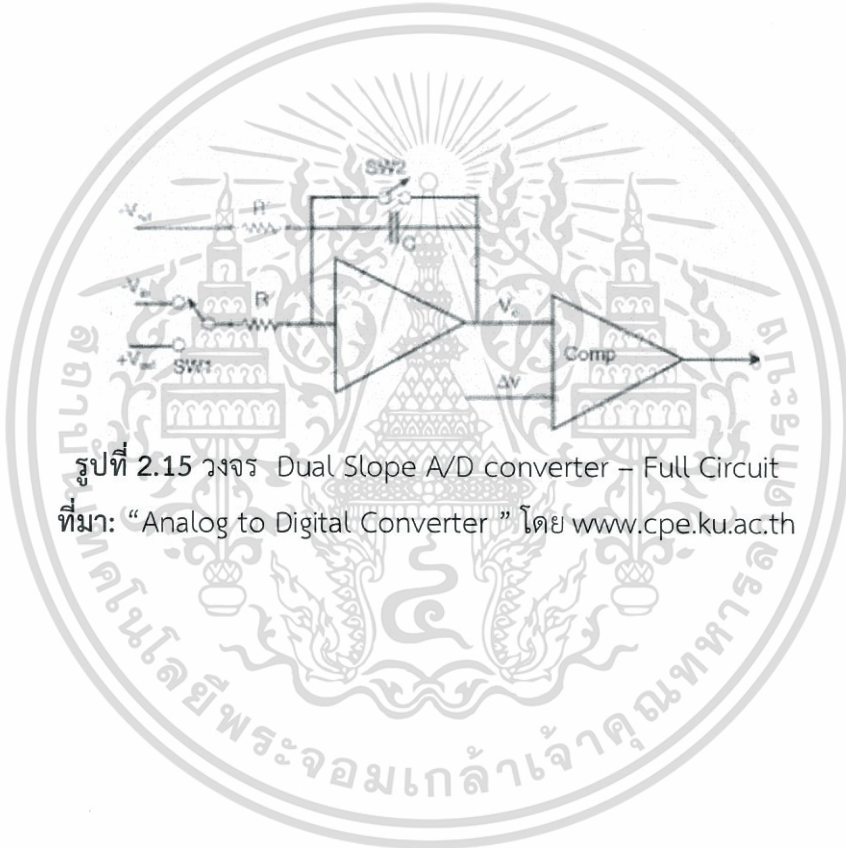
ที่มา: “Analog to Digital Converter ” โดย www.cpe.ku.ac.th

Input Voltage มี 2 ตัว คือ ค่าความต่างศักย์อนาล็อกที่ต้องการแปลงเป็นดิจิทัล ($-V_{in}$) และความต่างศักย์ที่คงที่ค่าหนึ่ง (V_{ref}) และมีสวิตช์ SW1 ซึ่งทำหน้าที่เลือกค่าสัญญาณจากวงจรตอนเริ่มต้นสวิตช์ SW2 ทำหน้าที่คาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

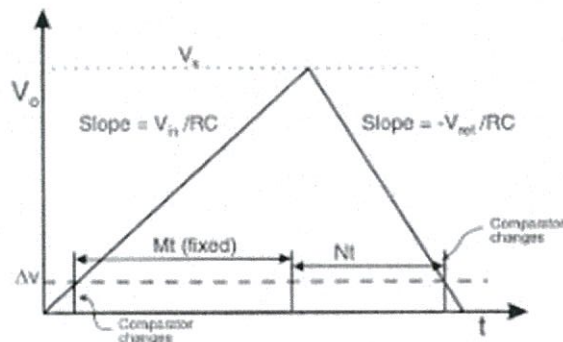
ประจุในตัวเก็บประจุ C แล้วจึงเปิด SW2 ออกเมื่อสวิตช์ SW1 สับมาที่ $-V_{in}$ จากวงจร Integrater จะพิสูจน์สมการได้

เนื่องจาก V_{ref} และ t_n มีค่าคงที่ สัญญาณอนาล็อกขึ้นกับค่า t_n เพราะการควบคุมการเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัล ที่ขึ้นกับค่า t_n การแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลจะทำโดยจับคู่ค่า t_n กับเอาต์พุตค่าๆ หนึ่ง ตามความเหมาะสมสำหรับ V_{ref} นั้นๆ เหมือนการเทียบค่าในตารางความเร็วของการแปลงสัญญาณแบบนี้ ขึ้นอยู่กับ V_{in} และ Slope ของวงจร integrater โดยธรรมชาติแล้ว ลักษณะของตัวเปรียบเทียบเองนั้น จะไม่เป็นอุดมคติ คือจะมีผลต่างของความต่างศักย์อยู่ V โวลต์ แม้ว่าจะต่ออินพุตทั้งสองลงกราวด์แล้วก็ตาม ซึ่งถ้า V_{ref} ที่ใช้อยู่มีค่าน้อยกว่าค่าผลต่างของความต่างศักย์ที่เกิดจากตัวเปรียบเทียบ ความชันก็จะน้อย ทำให้เวลา t_m ใช้เวลานานมาก กว่าที่จะพ้นค่าความต่างศักย์ที่เกิดจากตัวเปรียบเทียบ เราจึงต้องนำค่าความต่างศักย์มาเพิ่มให้กับ V_{ref} เพื่อหาผลลัพธ์ดังรูป



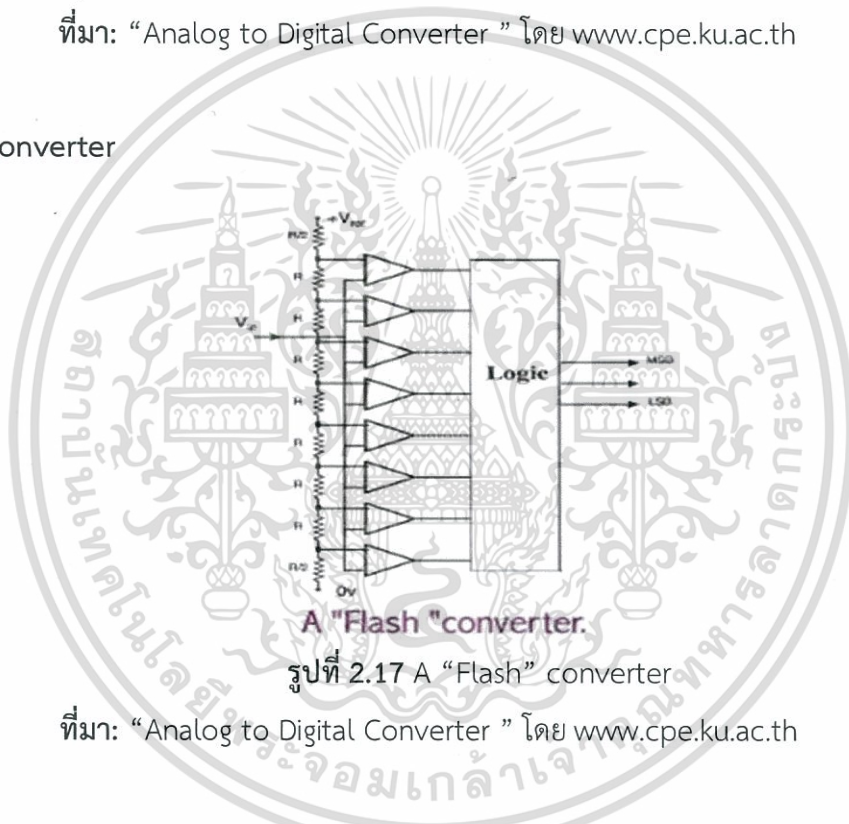
รูปที่ 2.15 วงจร Dual Slope A/D converter – Full Circuit
ที่มา: “Analog to Digital Converter ” โดย www.cpe.ku.ac.th

จากวงจรดังกล่าวทำให้ได้กราฟดังรูป



รูปที่ 2.16 วงจร Dual Slope A/D converter – Zero Offset
ที่มา: “Analog to Digital Converter ” โดย www.cpe.ku.ac.th

Flash Converter



รูปที่ 2.17 A “Flash” converter

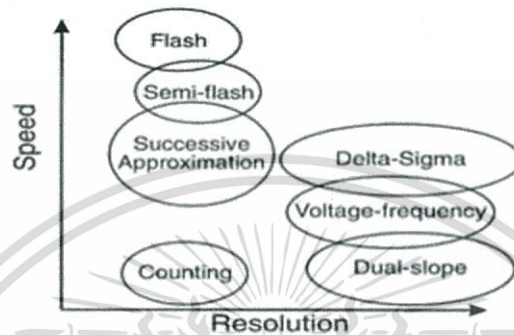
ที่มา: “Analog to Digital Converter ” โดย www.cpe.ku.ac.th

หลักการของ Flash Converter คือการใช้การแบ่งแรงดันเป็น Voltage หลายๆ ค่า แล้วเปรียบเทียบกับ V_{in} เป็นคู่ๆ พร้อมกัน แล้วกระทำการทาง logic จากรูปมี Voltage เปรียบเทียบ 8 bit ค่าความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากค่าความต้านทานที่ต่อเพิ่มขึ้น ความต่างศักย์ที่ได้นั้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ V_{in} แล้วมากกว่าก็จะปล่อยลอจิกออกมา ถ้ามากกว่าก็จะให้ลอจิก 1 ถ้าน้อยกว่าหรือเท่ากันก็จะให้ลอจิก 0 วิธี Flash Converter นี้จะเร็วที่สุด แต่ใช้อุปกรณ์ทาง Hardware มากกว่าแบบอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทสรุป

การแปลงสัญญาณอนาล็อก เป็นสัญญาณดิจิทัล มีประโยชน์มากในการควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ ซึ่งมีลักษณะการแปลงสัญญาณได้หลายวิธี แต่ละวิธีจะมีอัลกอริทึม ความรวดเร็วในการทำงาน และการใช้อุปกรณ์ไมโครแวร์ต่างกันด้วย ทำให้ขนาด และราคาต่างกัน ขึ้นกับความต้องการของผู้ใช้ที่จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับงานที่ใช้ และงบประมาณที่มีอยู่ลำดับของความเร็ว และความละเอียดของอัลกอริทึมต่างๆ เป็นดังรูป



รูปที่ 2.18 สรุป Analog to digital converter

ที่มา: “Analog to Digital Converter ” โดย www.cpe.ku.ac.th

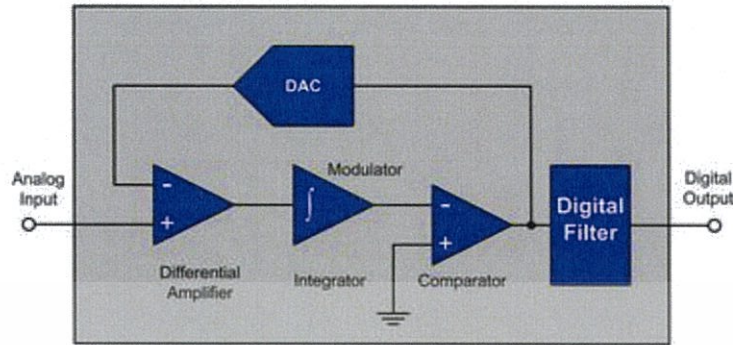
ADC Architecture แบบต่างๆ

ADC แต่ละชนิดจะมีจุดเด่นจุดด้อยแตกต่างกันไปผู้ออกแบบจำเป็นต้องเลือกใช้ ADC ให้เหมาะสมกับลักษณะงาน

1. Delta-Sigma เป็นการแปลงสัญญาณที่มีความละเอียดสูง เป็นการแปลงที่ถือว่าเป็นอุดมคติ (Ideal) และทำงานได้หลายย่านความถี่ ตั้งแต่สัญญาณ DC ไปจนถึงหลัก MHz การทำงานของ Delta-Sigma ADC สัญญาณอินพุตจะถูก Oversample โดยตัว Modulator หลังจากนั้นจะนำสัญญาณมากรองอีกทีเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้นโดย Digital Filter จึงทำให้ได้ค่า ADC ที่มีความละเอียดสูง ที่เรทแซมปลิงต่ำ เพราะว่า Delta-sigma ทำการ Oversample สัญญาณอินพุตจึงทำให้ได้สัญญาณเรียบขึ้น(Anti-aliasing) และในวงจรส่วน Digital Filter จะมีต้นทุนที่ต่ำกว่า Analog Filter โดยปกติแล้วความละเอียดสูงๆจากการแปลงแบบ Delta-sigma จะใช้ในงานด้านเสียง (audio), งานควบคุมในอุตสาหกรรม และ งานเครื่องมือวัด โดยปกติแล้ว Delta-sigma จะรับสัญญาณความแตกต่างระหว่าง 2 อินพุต แทนที่จะเป็นการวัดโวลต์เทียบกราวด์ การวัดสัญญาณความแตกต่าง (Differential) ของอินพุตสามารถนำไปวัดเซ็นเซอร์แบบบริดจ์ เช่นเทอร์โมคัปเปิ้ลได้ Delta-sigma เป็นการแปลงสัญญาณที่แตกต่างกับ SAR การแปลงสัญญาณแบบ SAR จะเหมือนกับการวัดสัญญาณ ณ ตอนนั้น ส่วน Delta-sigma จะเหมือนกับค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าใน 1 ช่วงเวลา โดยส่วนมาก Delta-sigma จะมีบัฟเฟอร์และตัวขยาย (Programable gain amplifiers=PGA) อยู่ในตัว บัฟเฟอร์จะมีอิมพีแดนส์สูงเพื่อให้ต่อตรงกับขาสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้โดยไม่มีทำให้วงจรมีค่าอิมพีแดนซ์มีค่าผิดไปจากเดิม ดังนั้น Delta-sigma จึงสามารถใช้วัดสัญญาณที่มีขนาดเล็กได้ดี เช่นสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ล เพราะมี PGA อยู่ในตัวสามารถปรับค่า gain ได้ตามความเหมาะสม

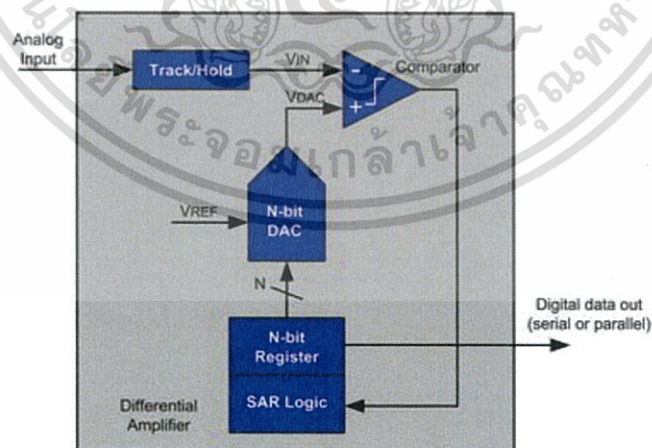


รูปที่ 2.19 โครงสร้างภายในของ Delta-Sigma ADC

ที่มา: “Analog to Digital Converter ” โดย www.thaiembedded.com

2. Successive-approximation-register (SAR) analog-to-digital converters (ADCs) เป็น ADC ที่มีขายในตลาดมากที่สุด ความละเอียดจะอยู่ในระดับกลางถึงถึงความละเอียดสูง SAR ADCs ให้อัตราการ sampling ถึง 5 Msps ที่ความละเอียด 8-18 bits โครงสร้างแบบ SAR จะให้ประสิทธิภาพสูง กินไฟน้อย และมีขนาดเล็ก

หลักการของ SAR จะเหมือนตาชั่งแบบ balance คือจะมีน้ำหนักที่ไม่ทราบค่าอยู่ด้านหนึ่ง และน้ำหนักที่ทราบค่าอยู่อีกด้านหนึ่ง เราจะเปลี่ยนน้ำหนักที่ทราบค่าไปเรื่อยๆจนกระทั่งตาชั่ง balance เมื่อมีสัญญาณอินพุตเข้ามา สัญญาณจะถูก sample เข้ามาและถูก hold ไว้เพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันที่ทราบค่า และจะส่งผลลัพธ์ไปที่เอาต์พุต

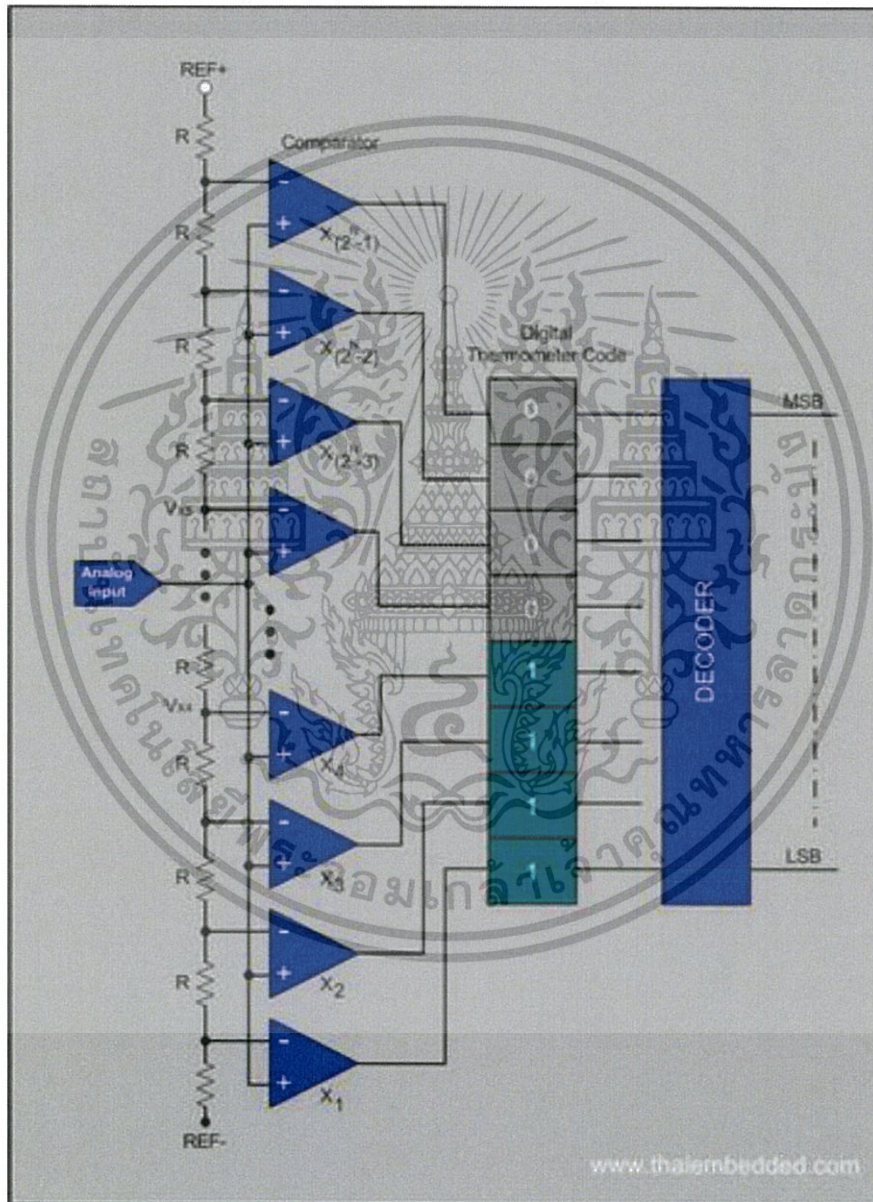


รูปที่ 2.20 โครงสร้างภายในของ SAR ADC

ที่มา: “Analog to Digital Converter ” โดย www.thaiembedded.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Flash ADC เป็นที่รู้จักกันในอีกชื่อว่า Parallel ADCs หรือแปลเป็นไทยได้ว่า การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบขนาน ADC ชนิดนี้เป็น ADC ที่เร็วที่สุด Flash ADCs จะใช้ในงานที่มีแบนวิธกว้าง อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วจะกินกระแสมากกว่า ADC ชนิดอื่น มีราคาแพง และโดยทั่วไปจะจำกัดความละเอียดไว้ที่ความละเอียด 8 บิต Flash ADCs สร้างมาจากวงจร Comparator มาต่อเรียงกัน โดย Comparator แต่ละตัวจะมีค่าเท่ากับ 1 บิต ซึ่งเป็นผลลัพธ์มาจากการเปรียบเทียบค่าของวงจร Comparator ตัวอย่างการใช้งานได้แก่การสื่อสารผ่านดาวเทียม, ออสซิลโลสโคป, ระบบประมวลผลเรดาร์



รูปที่ 2.21 โครงสร้างภายในของ Flash ADC

ที่มา: “Analog to Digital Converter ” โดย www.thaiembedded.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

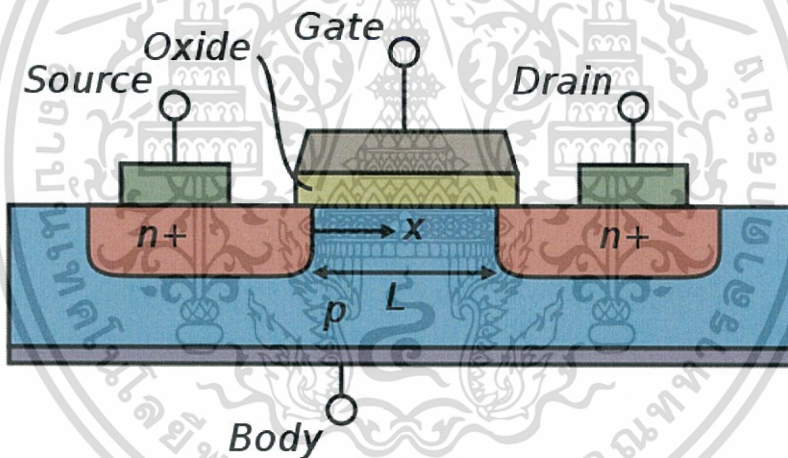
2.10 มอสเฟต (MOSFET)

มอสเฟต (metal–oxide–semiconductor field-effect transistor: MOSFET) เป็นทรานซิสเตอร์ที่ใช้ อิทธิพลสนามไฟฟ้าในการควบคุมสัญญาณไฟฟ้า โดยใช้ออกไซด์ของโลหะในการทำส่วน GATE นิยมใช้ในวงจร ดิจิตอล โดยนำไปสร้างลอจิกเกตต่างๆเพราะมีขนาดเล็ก

2.10.1 โครงสร้างของ MOSFET

MOSFET ประกอบด้วยสามส่วน คือ

1. GATE เป็นส่วนที่ทำมาจากออกไซด์ของโลหะ โดยสร้างให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างแผ่นสองแผ่นเพื่อ สร้างสนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมการเข้าออกของสัญญาณไฟฟ้า
2. SOURCE เป็นส่วนขาเข้าของสัญญาณ
3. DRAIN เป็นส่วนขาออกของสัญญาณ



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของ MOSFET

ที่มา: “MOSFET” โดย [www. /th.wikipedia.org.com](http://www.th.wikipedia.org.com)

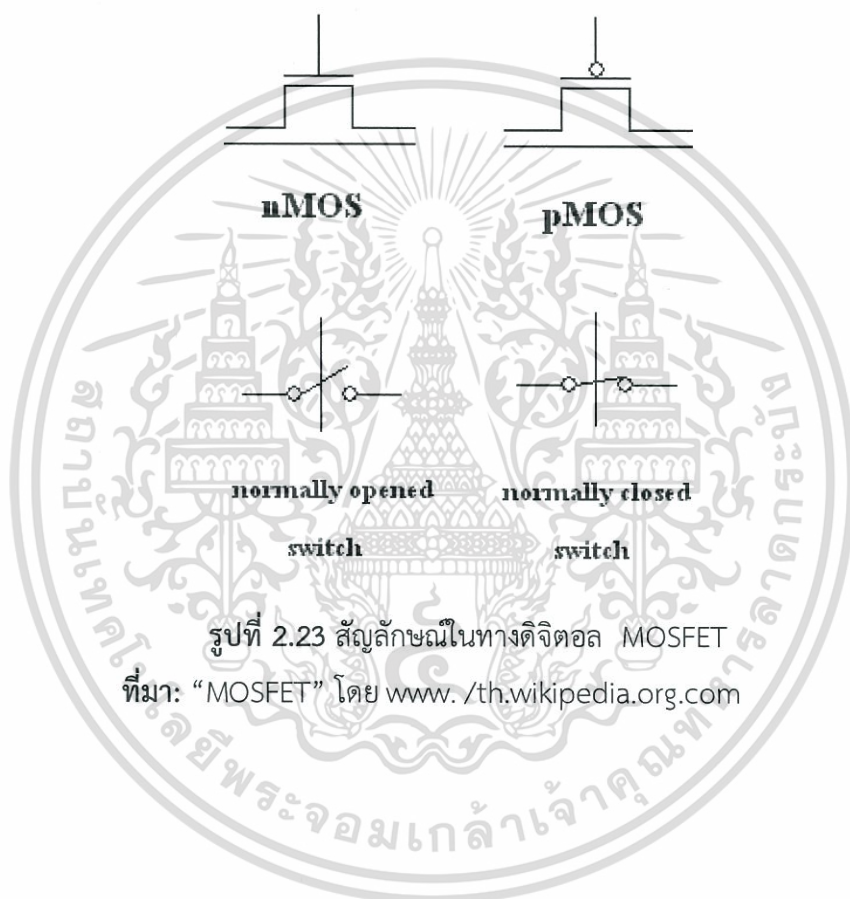
2.10.2 ประเภทของ MOSFET

- nMOS (negative MOSFET) เป็นทรานซิสเตอร์ประเภท NPN เมื่อมีความต่างศักย์เป็นบวก (สนามไฟฟ้า แรง) สัญญาณไฟฟ้าจึงจะไหลจาก source ไป drain ได้
- pMOS (positive MOSFET) เป็นทรานซิสเตอร์ประเภท PNP เมื่อมีความต่างศักย์ต่ำหรือเป็นลบ (สนามไฟฟ้าอ่อน) สัญญาณไฟฟ้าจึงจะไหลจาก source ไป drain ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.3 สัญลักษณ์แทน MOSFET

สัญลักษณ์ในทางดิจิทัล MOSFET ในทางดิจิทัลถูกมองว่าเป็นสวิตช์ โดย nMOS จะเป็นสวิตช์ที่เมื่อสัญญาณเข้าเป็น "1" สวิตช์ก็จะปิด ถ้าไม่สวิตช์ก็ยังคงเปิดอยู่ (normal opened switch) ส่วน pMOS จะเป็นสวิตช์ที่เมื่อสัญญาณเข้าเป็น "1" สวิตช์ก็จะเปิด ถ้าไม่สวิตช์ก็จะปิดอยู่ (normal closed switch) และสัญลักษณ์ทั่วไปจะมีสามขา ขากลางเป็น gate ส่วนอีกสองขาคือ source และ drain โดยใช้ใน nMOS เป็นหลักเพื่อสื่อสัญลักษณ์เดียวกับทรานซิสเตอร์ทั่วไปคือ โฟลว base ไหล ขา Collector จะต่อกับ Emitter ส่วน pMOS ก็จะใส่ bubble ที่ขา gate



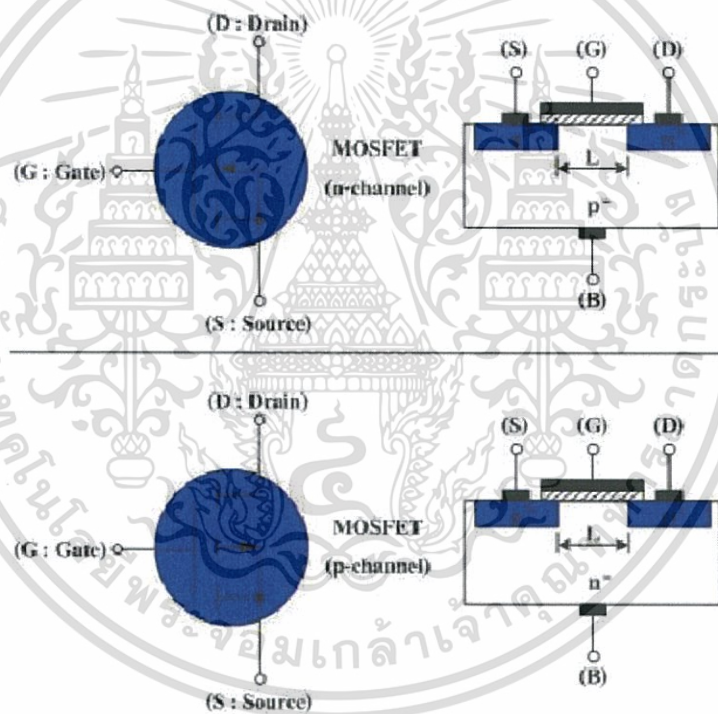
รูปที่ 2.23 สัญลักษณ์ในทางดิจิทัล MOSFET

ที่มา: "MOSFET" โดย [www. /th.wikipedia.org.com](http://www.th.wikipedia.org.com)

2.10.4 การทำงานของ MOSFET

nMOS เมื่อปล่อยความต่างศักย์สูง จะเกิดสนามไฟฟ้าในทิศลงอย่างแรง โวลใน p-type จะถูกผลักลงมาอยู่ด้านล่าง (ตามรูปที่ประกอบข้างบน) ประกอบกับมีอิเล็กตรอนอิสระบางส่วนถูกดูดขึ้นไปด้านบน ส่งผลให้บริเวณด้านบนมีอิเล็กตรอนอิสระมากจนเป็น n-type ได้เรียกว่า channel สัญญาณไฟฟ้าก็จะไหลผ่านช่วง channel นี้ ซึ่งเป็น n-type เหมือนกับ drain และ source ได้โดยใช้อิเล็กตรอนอิสระเป็นพาหะ

pMOS จะทำงานกลับกับ nMOS โดยเมื่อปล่อยความต่างศักย์ต่ำ (โดยมากมักจะติดลบ) จะเกิดสนามไฟฟ้าในทิศขึ้นอย่างแรง อิเล็กตรอนอิสระใน n-type จะถูกผลักลงมาอยู่ด้านล่าง ประกอบกับมีโฮลบางส่วนถูกดูดขึ้นไปด้านบน ส่งผลให้บริเวณด้านบนมีโฮลมากจนเป็น p-type ได้เรียกว่า channel สัญญาณไฟฟ้าก็จะไหลผ่านช่วง channel นี้ซึ่งเป็น p-type เหมือนกับ drain และ source ได้โดยใช้โฮลเป็นพาหะ

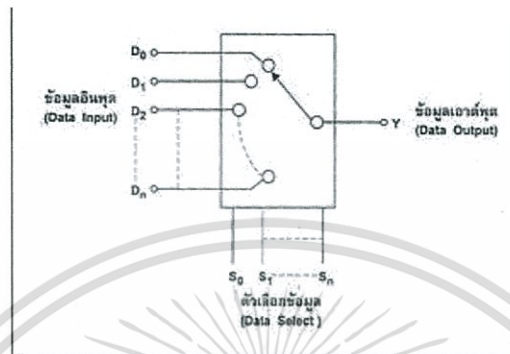


รูปที่ 2.24 การทำงานของ MOSFET

ที่มา: “MOSFET” โดย [www. /th.wikipedia.org.com](http://www.th.wikipedia.org.com)

2.11 Multiplexer

มัลติเพล็กซ์เซอร์ (Multiplexer : MUX) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ตัวเลือกข้อมูล(Data Selector) ซึ่งเป็นตัวที่ทำหน้าที่เลือกช่องสัญญาณที่มีข้อมูลช่องหนึ่งจากหลายๆช่องสัญญาณมาเป็นอินพุตและต่อช่องสัญญาณที่มีข้อมูลนั้นเข้าเป็นสัญญาณเอาต์พุตเพียงเอาต์พุตเดียว ดังรูป 2.15



รูปที่ 2.25 รูปแสดงระหว่างช่องสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต
ที่มา: “Multiplexer” โดย <http://kikmultiplex.blogspot.com>

จากรูปทางด้านซ้ายนั้นได้แสดงอินพุตจำนวน n ขา ตั้งแต่ D_0 ถึง D_n ขาซึ่งใช้สำหรับเลือกข้อมูล S_0 ถึง S_m และขาเอาต์พุต Y ส่วนขาของ S_0 ถึง S_m ใช้สำหรับการเลือกให้อินพุตใดจากอินพุต D_0 ถึง D_n ผ่านออกไปที่เอาต์พุต Y และจำนวนขาของ S นั้นก็ยังมีความสัมพันธ์กับจำนวนขาของอินพุต D คือ เช่น ถ้ามีจำนวนอินพุตที่จะถูกเลือกจำนวน 4 อินพุต จำนวนบิตของขาสำหรับเลือกข้อมูลจะเท่ากับ 2 ($2^2 = 4$) ถ้ามีจำนวนอินพุตที่จะถูกเลือกจำนวน 8 อินพุต จำนวนบิตของขาสำหรับเลือกข้อมูลจะเท่ากับ 3 ($2^3 = 8$) เป็นต้น

ซึ่งวิธีการรวมข้อมูลจากหลายๆ จุด แล้วส่งผ่านไปตามสายส่งเพียงสายเดียวนั้น เรียกว่า multiplex ซึ่งสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 รูปแบบคือ

2.11.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา (Time Division Multiplexing: TDM)

เป็นการแบ่งเวลาในการใช้สายส่งเพื่อใช้ส่งข้อมูล เหมาะกับสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัล เนื่องจากสัญญาณดิจิทัลมีช่วงเวลาที่แน่นอนของบิตแต่ละบิต จึงทำให้สามารถมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลาให้มีความสอดคล้องกับเวลาของบิตได้ โดยอาจคิดเป็นอัตราเร็วของบิตได้คือ สัญญาณที่มีอัตราเร็วต่ำหลายๆ สัญญาณสามารถนำมามัลติเพล็กซ์รวมกันเป็นสัญญาณที่มีอัตราบิตสูงขึ้นได้ ซึ่งการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา ยังสามารถแบ่งออกเป็น “การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลาในแบบซิงโครนัส” และ “การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลาในรูปแบบสถิติ”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลาในรูปแบบซิงโครนัส (Synchronous Time Division Multiplexing: Sync TDM) Sync TDM จะอนุญาตให้ข้อมูลจากแต่ละแหล่งมาหมุนเวียนเพื่อส่งข้อมูลไปบนสายส่งข้อมูลความเร็วสูง Sync TDM จะให้ชิ้นส่วนของข้อมูล เช่น ไบต์ข้อมูล จากอุปกรณ์ส่งผ่านไปยังสายส่งข้อมูลความเร็วสูง จากนั้นก็ให้อุปกรณ์ที่จะอินพุตในลำดับถัดไปส่งไบต์ข้อมูลผ่านสายส่งข้อมูลความเร็วสูงหมุนเวียนต่อไปเรื่อยๆ

หากสถานีผู้ส่งบางสถานีไม่ต้องการส่งข้อมูลในช่วงเวลาขณะนั้น ซึ่งเรียกว่าอยู่ในสถานะ Idle มัลติเพล็กซ์เซอร์ก็จะทำการส่งสล็อต (Slot) ข้อมูลของสถานีที่ Idle ผ่านสายส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง โดยสล็อตดังกล่าวนี้จะเป็นสล็อตว่าง ซึ่งการส่งสล็อตว่างออกไปก็เพื่อจุดประสงค์ให้คงลำดับเหมือนเดิม โดยตัวอย่างการซิงโครนัสทีดีเอ็มที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน เช่น T-1 Multiplexing, ISDN Multiplexing และ SONET

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลาในรูปแบบสถิติ (Statistical Time Division Multiplexing: Stat TDM) หรือ อะซิงโครนัสทีดีเอ็ม (Asynchronous TDM) เป็นการมัลติเพล็กซ์เชิงสถิติที่ข้อมูลสามารถส่งร่วมกันบนสายในลักษณะแบบแบ่งเวลาตามความต้องการ (On-Demand) เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียสล็อตว่างเปล่าของสถานีที่ไม่มีการส่งข้อมูล ดังนั้น ข้อมูลที่ส่งจะถูกส่งไปยังสายเฉพาะสถานีที่ต้องการส่งข้อมูลเท่านั้น โดยสถานีที่ Idle จะไม่มีการส่งสล็อตว่างเปล่าออกมาบนสายส่ง ซึ่งในการส่งข้อมูลของแต่ละสถานีจะมีการใส่ Address ของสถานีส่งเข้าไปด้วย ซึ่งจะช่วยให้ฝ่ายรับนั้นรับรู้ได้ว่า ข้อมูลที่ส่งมานั้นมาจากสถานีใด

2.11.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplexer หรือ FDM)

เป็นวิธีที่ใช้กันทั้งระบบที่มีสายและระบบคลื่นวิทยุ ซึ่งหลักการของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่นี้คือการนำสัญญาณจากแหล่งต่างๆมารวมกัน ให้อยู่ในคลื่นพาห่เดียวกันที่ความถี่ต่างๆ และสัญญาณเหล่านี้สามารถที่จะใช้เส้นทางร่วมกันได้ซึ่งต่างจากแบบแรกที่ไม่สามารถใช้ร่วมกันได้

2.12 เทอร์มิสเตอร์หรือตัวต้านทานความร้อน (Thermal Resistor)

เป็นตัวต้านทานที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงอาจไม่เป็นเชิงเส้น (Non - Linear) และแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ผลิต โครงสร้างและส่วนประกอบภายในมักนำมาจากธาตุเยอรมันเนียมและซิลิคอน หรือโคบอลต์ นิกเกิล ทองแดง แพลทินัม เหล็ก และแมงกานีส เป็นต้น รูปร่างที่ผลิตขึ้นมาใช้งานมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน เช่น รูปจาน แท่งทรงกระบอก ลูกประคำหรืออื่นๆ รูปร่างและสัญลักษณ์ของเทอร์มิสเตอร์ คุณสมบัติของตัวเทอร์มิสเตอร์ที่ผลิตขึ้นมาใช้งานมี 2 ชนิด คือ ชนิด NTC และชนิด PTC

- ตัวต้านทานที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นบวก (PTC - Positive Temperature Coefficient) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความต้านทานมีค่าสูงขึ้นตาม มีพบใช้ในวงจรเครื่องรับโทรทัศน์ โดยต่ออนุกรมกับ ขดลวดลบสนามแม่เหล็ก (demagnetizing coil) เพื่อป้องกันกระแสในช่วงเวลาสั้น ๆ ให้กับขดลวดในขณะที่เปิดโทรทัศน์ นอกจากนั้นแล้ว ตัวต้านทานประเภทนี้ยังมีการออกแบบเฉพาะเพื่อใช้เป็น ฟิวส์ (fuse) ที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ เรียกว่า โพลีสวิตช์ (polyswitch)

- ตัวต้านทานที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นลบ (NTC - Negative Temperature Coefficient) เป็นชนิดที่ปกติจะมีความต้านทานสูงเมื่อได้รับความร้อน ค่าความต้านทานจะต่ำลง ใช้งานด้านการตรวจสอบความร้อนเพื่อควบคุมระดับการทำงาน เช่น ในวงจรขยายเสียงที่ดีใช้ตรวจจับความร้อนที่เกิดจากการทำงานแล้วป้อนกลับไปลด การทำงานของวงจรให้น้อยลง เพื่ออุปกรณ์หลักจะไม่เกิดความร้อนมากเกินไป



รูปที่ 2.26 เทอร์มิสเตอร์ ชนิด NTC



รูปที่ 2.27 เทอร์มิสเตอร์ ชนิด PTC

ที่มา: “NTC” โดย <https://www.picclick.com>

ที่มา: “PTC” โดย <http://www.pollin.de.com>

-20	97.6037	17	14.3375	54	3.0862	90	0.9086
-19	92.0947	18	13.6932	55	2.9733	91	0.8811
-18	86.9305	19	13.0815	56	2.8652	92	0.8545
-17	82.0877	20	12.5005	57	2.7616	93	0.8289
-16	77.5442	21	11.9485	58	2.6622	94	0.8042
-15	73.2798	22	11.4239	59	2.5669	95	0.7803
-14	69.2759	23	10.9252	60	2.4755	96	0.7572
-13	65.5149	24	10.4510	61	2.3879	97	0.7350
-12	61.9809	25	10.0000	62	2.3038	98	0.7135
-11	58.6587	26	9.5709	63	2.2231	99	0.6927
-10	55.5345	27	9.1626	64	2.1456	100	0.6727
-9	52.5954	28	8.7738	65	2.0712	101	0.6533
-8	49.8294	29	8.4037	66	1.9998	102	0.6346
-7	47.2253	30	8.0512	67	1.9312	103	0.6165
-6	44.7727	31	7.7154	68	1.8653	104	0.5990
-5	42.4620	32	7.3954	69	1.8019	105	0.5821
-4	40.2841	33	7.0904				

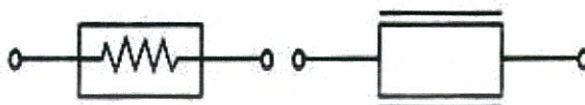
รูปที่ 2.28 รูปตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันของ NTC ขนาด 10K โอห์ม

ที่มา: “NTC” โดย <http://www.electrodragon.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 ฟิวส์รีซิสเตอร์ (Fuse Resistor)

เป็นตัวต้านทานที่ใช้ทำหน้าที่แทนฟิวส์ เพื่อป้องกันความเสียหายของวงจรเมื่อมีการกระจายกระแสไหลผ่านวงจรมากเกินไปเกินค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งจะทำให้ตัวต้านทานขาดทันที โดยทั่วๆ ไปตัวต้านทานชนิดนี้จะมีค่าประมาณ 0 – 200 โอห์ม



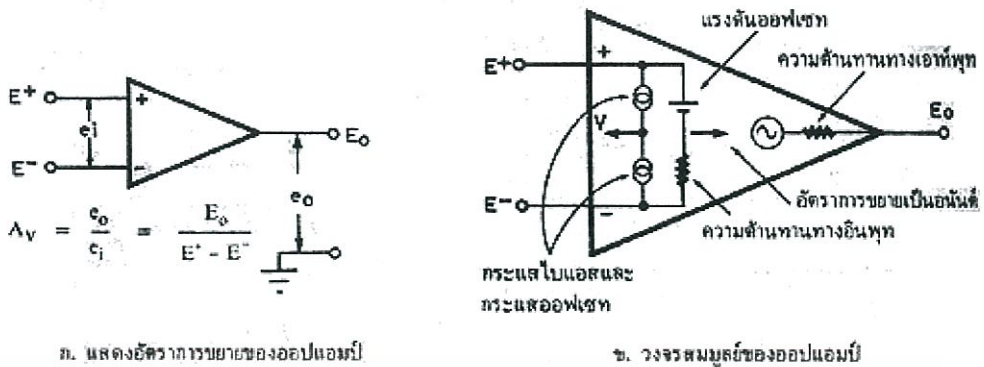
รูปที่ 2.29 รูปแสดงสัญลักษณ์ของฟิวส์รีซิสเตอร์

ที่มา: “Fuse Resistor” โดย <http://www.med.cmu.ac.th>

2.14 OP-AMP

ออปแอมป์ (Operation Amplifier, Op-Amp) หรือวงจรขยายเชิงดำเนินการ เป็นอุปกรณ์วงจรรวมหรือไอซี ประเภทเชิงเส้น (Linear Integrated Circuit) ซึ่งมีการนำไปใช้ในงานประยุกต์ต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง ออปแอมป์ถูก ออกแบบครั้งแรกในปี 1948 เพื่อช่วยปฏิบัติการด้านคณิตศาสตร์ในเครื่องอนาลอกคอมพิวเตอร์ (Analog Computer) ดังนั้น จึงใช้ชื่อว่า Operational Amplifier ซึ่งหมายถึง วงจรขยายดำเนินการ นอกจากนี้ ออปแอมป์ยังได้ ถูกนำไปใช้ในงานประยุกต์ต่าง ๆ มากมาย ทั้งนี้ก็เนื่องจากเปววงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier) ที่มีอัตรา ขยายที่สูงมากและการออกแบบและวิเคราะห์วงจรที่ใช้ออปแอมป์ก็สามารถทำได้ง่าย งานประยุกต์ที่ใช้ออปแอมป์จะพบได้ในวงจรเครื่องวัด, วงจรแสดงผล และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุม กระบวนการ, วงจรปรับสัญญาณ, วงจรสื่อสาร, ระบบเตือนภัย, วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทางการแพทย์, ด้านวิทยาศาสตร์ และในระบบคอมพิวเตอร์ เป็นต้นจะเห็นได้ว่าออปแอมป์ได้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ดังนั้นจึง อาจเรียกออปแอมป์ได้ว่า เปนวงจรขยายเชิงเส้นอเนกประสงค์

2.14.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับออปแอมป์เอาต์พุต



รูปที่ 2.30 แสดงการทำงานและวงจรมูลของออปแอมป์

ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

ออปแอมป์มีสัญลักษณ์และสัญญาณเข้าออก ตามที่แสดงในรูปที่ 2.30k ความสัมพันธ์ของสัญญาณเข้าและออก แสดงด้วยสูตรง่าย ๆ คือ

$$E_o = A_v (E^+ - E^-) \quad (2.1)$$

A_v เป็นอัตราการขยายแรงดันซึ่งมีค่าสูงมาก จึงเป็นคุณสมบัติที่พิเศษสุดของออปแอมป์ ออปแอมป์แบบอุดมคติ จะมีคุณสมบัติตามเงื่อนไขดังนี้

1. อัตราการขยายแรงดัน สูงมากจนเป็นอนันต์
2. ความต้านทานทางอินพุต สูงมากจนเป็นอนันต์
3. ความต้านทานทางเอาต์พุต ต่ำมากจนเป็นศูนย์
4. แรงดันออฟเซตทางอินพุตเป็นศูนย์
5. กระแสออฟเซตทางอินพุตเป็นศูนย์
6. ลักษณะสมบัติเชิงความถี่ ขยายได้ดีตั้งแต่ไฟตรง จนความถี่สูงมากเป็นอนันต์
7. ไม่มีข้อบกพร่องอื่น ๆ

แต่ในความเป็นจริงแล้ว ออปแอมป์ก็ไม่ได้มีคุณสมบัติอย่างในอุดมคติเลยทีเดียว แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อความสะดวกในการทำความเข้าใจสำหรับผู้เริ่มต้น ในช่วงแรกให้ถือว่า ออปแอมป์ที่ใช้ศึกษากันไปนี้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับอุดมคติมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้โอปแอมป์ที่เป็นอุดมคติในการออกแบบวงจรนั้น เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมาก หลังจากออกแบบเสร็จแล้ว จึงค่อยมาพิจารณาเงื่อนไข หรือคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ไม่เป็นอุดมคติ แล้วค่อยแก้ไขและปรับปรุงวงจรให้ดีขึ้นอีกทีหนึ่งต่อไป

2.14.2 อัตราการขยายแรงดัน

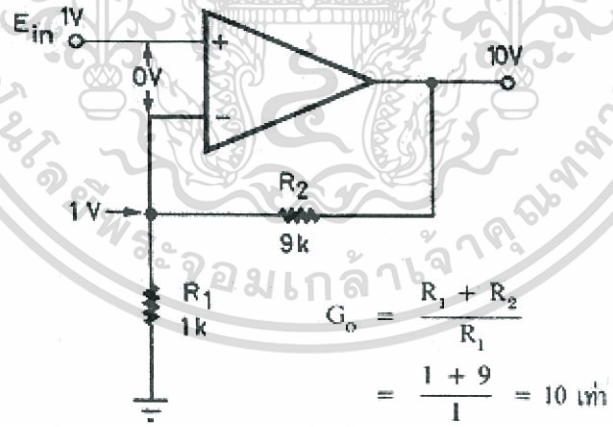
อัตราการขยาย G_o ของวงจรรอปแอมป์ ซึ่งต่อเป็นวงจรขยายแบบไม่กลับขั้ว ตามรูป 2.19 จะมีสูตรทั่วไปคือ

$$G_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \tag{2.2}$$

แต่ในความเป็นจริงอัตราการขยายจะเป็น

$$G_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + (R_1 + R_2)/A_v} \tag{2.3}$$

ซึ่งถ้าอัตราการขยายแรงดัน A_v ของออปแอมป์มีขนาดสูงมาก ๆ แล้วเทอม $(R_1 + R_2) / A_v$ จะมีขนาดเล็กมากจนเป็นศูนย์ไป จึงทำให้สูตรเหลือแต่ $\frac{R_1 + R_2}{R_1}$ นั่นเอง



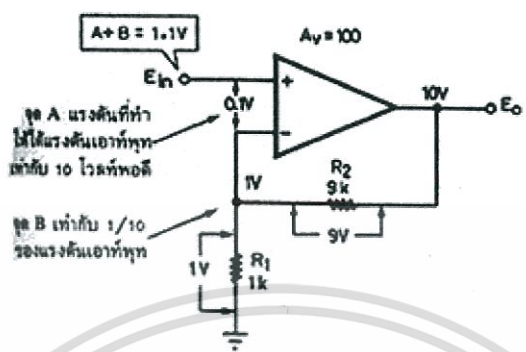
รูปที่ 2.31 แสดงการต่อออปแอมป์ในอุดมคติเป็นวงจรขยายแบบไม่กลับขั้ว

ที่มา: "OP-AMP" โดย www.living-electronics.blogspot.com

ในรูปที่ 2.31 ค่า $R_1 = 1$ kโอห์มและ $R_2 = 9$ kโอห์ม ถ้าเป็นออปแอมป์แบบอุดมคติวงจรทั้งหมดจะมีอัตราการขยายเท่ากับ 10 พอดิ แต่ถ้าไม่เป็นอุดมคติ เช่น $A_v = 100$ จะได้ แรงดันตามส่วนต่าง ๆ ของวงจรตามในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32 คือ เพื่อให้แรงดันเอาต์เท่ากับ 10 โวลต์ จะมีสัญญาณที่อินพุตต่ำลงเท่ากับ 10 เท่า คือเท่ากับ 0.1 V แต่แรงดันที่ป้อนกลับจากเอาต์พุตคิดจากการแบ่งแรงดัน ด้วยตัวต้านทานสองตัวจะเป็น 1 V ดังนั้นแรงดันอินพุตของวงจรต้องมีค่า 1.1 V จึงจะทำให้แรงดันเอาต์พุตเป็น 10 V ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.33



$$\text{อัตราขยาย } G = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_1 + R_2} = 9.09 \text{ เท่า}$$

เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุต 10V จะต้องป้อนอินพุต 0.1V แต่ที่รับของออปแอมป์ป้อนอินพุตกลับมา 1V จึงทำให้ที่รับของออปแอมป์ต้องการไฟ 1.1V อัตราขยายจึงเป็น

$$G = \frac{10}{1.1} = 9.09$$

รูปที่ 2.32 แสดงแรงดัน ณ จุดต่าง ๆ เมื่อจัดวงจรขยายให้กับออปแอมป์ ที่มา: "OP-AMP" โดย www.living-electronics.blogspot.com

ในการวิเคราะห์วงจรออปแอมป์นั้น ในบางครั้งถ้าเราคิดย้อนแรงดันเอาต์พุตมาที่แรงดันอินพุต จะทำให้วิเคราะห์และทำความเข้าใจได้ง่ายขึ้น

จากวิธีการอธิบายที่กล่าวมานี้สามารถกระจายแรงดันอินพุตเป็น

$$E_{in} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E_o + \frac{E_o}{A_v} \tag{2.4}$$

จากสมการข้างบนนี้ ด้านขวามือเทอมแรกเป็นแรงดันที่ได้จากการป้อนกลับตามในรูปที่ 3 ที่จุด B และเทอมที่ 2 เป็นแรงดันที่ป้อนเข้าที่อินพุตทั้งสองของออปแอมป์ ตามในรูปที่ 3 ที่จุด A

ออปแอมป์ที่ใช้งานกันทั่วไป จะมีอัตราขยาย Av สูงเป็นหลายหมื่น หรือหลายแสนเท่า ดังนั้นจึงทำให้ แรงดัน Eo/Av มีขนาดเล็กมากจนสามารถละทิ้งได้

แต่ถ้าความถี่ของสัญญาณที่ใช้ขยายมีขนาดสูงมาก ๆ ละก็ อัตราขยาย Av ของออปแอมป์ก็จะมีขนาดเล็กจนทำให้เราไม่สามารถละทิ้ง เทอม Eo/Av

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลองดูคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ใช้งานจริง เบอร์ต่าง ๆ ในตารางที่ 1 จะเห็นว่า ออปแอมป์ที่ใช้งานความเร็วสูง จะมีอัตราขยายไฟตรง (หรือความถี่ต่ำ) ต่ำ ในขณะที่ออปแอมป์แบบใช้งานทั่วไป จะมีอัตราขยายสูง กว่าแต่เมื่อความถี่สูงขึ้น ออปแอมป์แบบใช้งานทั่วไปจะมีอัตราขยายลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด

2.14.3 ความต้านทานทางอินพุท

ความต้านทานทางเอาต์พุทของออปแอมป์จะมีขนาดเพียงไม่กี่โอห์มหรือไม่กี่สิบโอห์มเท่านั้น ดูเผิน ๆ แล้วอาจเห็นว่าไม่สำคัญเท่าไร แต่อย่างไรก็ตามยังมีผู้สับสนใน ความหมายอันนี้ และมักจะเข้าใจกันผิดเสมอ คือ แยกความแตกต่างระหว่างความต้านทานทางเอาต์พุทกับความสามารถในการขับโหลดได้ไม่ถูกต้อง

ความสามารถในการขับโหลดหมายถึง ความสามารถในการจ่ายกระแสและแรงดันให้กับโหลด ซึ่งอาจจะเป็น ตัวต้านทานหรือวงจรซึ่งมาต่อทางด้านเอาต์พุทของออปแอมป์

สมมติให้ออปแอมป์มีความต้านทานทางเอาต์พุท 10 โอห์ม ไม่ได้หมายความว่า ให้ต่อกับโหลดที่มีขนาด 10 โอห์มพอดี ตามความคิดเรื่องการแมทซิมัมพีแดนซ์ ซึ่งตามความเป็นจริงนั้น ความต้านทานทางเอาต์พุทกับ ความสามารถในการขับโหลดจะไม่เกี่ยวข้องกันเลยลองดูรูปเปรียบเทียบในรูปที่ 2.34

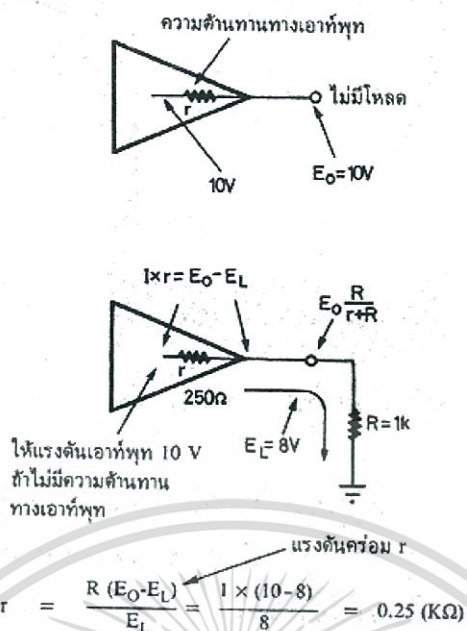


รูปที่ 2.33 แสดงความหมายของความต้านทานเอาต์พุทและความสามารถในการขับโหลด

ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

ความต้านทานทางเอาต์พุท จะเปรียบเหมือนกับการดึงรถยนต์ด้วยโซ่หรือเชือกไนลอน แต่ความสามารถในการขับโหลด จะเปรียบเหมือนแรงของคนดึง ว่ามีมากแค่ไหน ความต้านทานทางเอาต์พุทจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุท เมื่อโหลดเปลี่ยนไป ซึ่งจะคล้ายกับเชือกไนลอน ซึ่งยืดออกมายาวไม่เท่ากัน เมื่อรถหนักไม่เท่ากัน หมายความว่าความต้านทานทางเอาต์พุท เปลี่ยนไปเมื่อแรงดันเอาต์พุทเปลี่ยนไปด้วยผลของโหลด

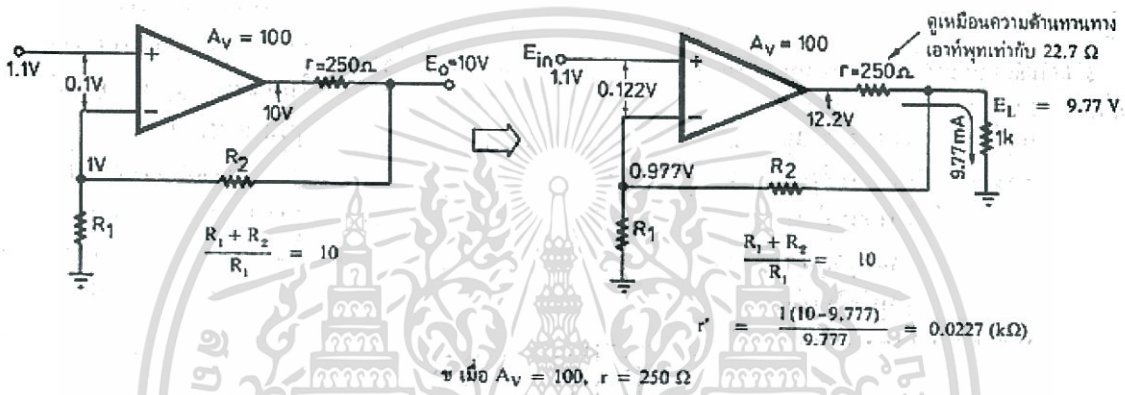
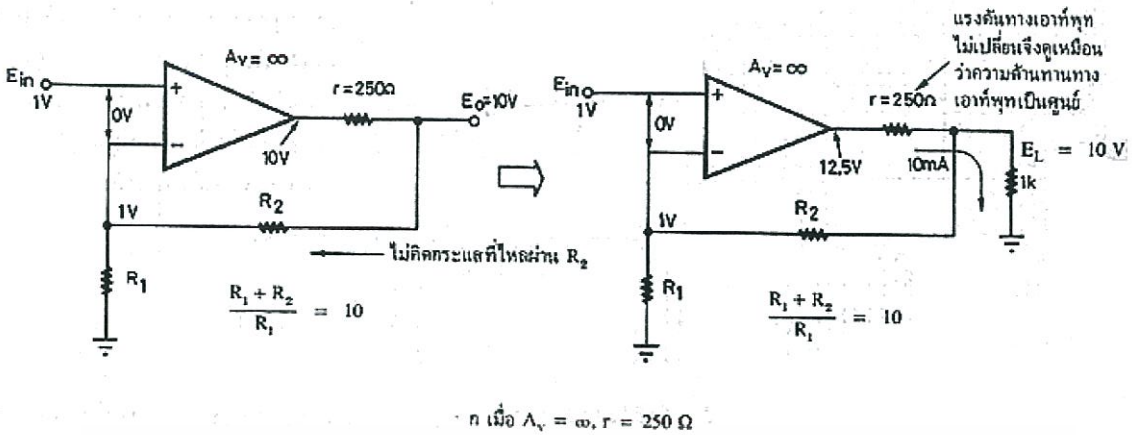
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 แสดงความต้านทานเอาต์พุตของออปแอมป์
ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

ตัวอย่างในรูปที่ 34 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงผลของแรงดันเอาต์พุตในขณะที่ไม่มีโหลดต่ออยู่ ออปแอมป์จะได้แรงดันเอาต์พุต 10 V แต่เมื่อต่อโหลดขนาด 1 kโอห์ม เข้าไปเท่านั้น แรงดันเอาต์พุตลดลงมาเหลือเพียง 8 V ในกรณีนี้ ความต้านทานทางเอาต์พุตมีค่า 250 โอห์ม

อัตราขยายของออปแอมป์ A_v จะมีผลทำให้ความต้านทานทางเอาต์พุตของวงจรดูเหมือนจะเปลี่ยนแปลงไปด้วยลองมาดูรูปที่ 7 เพื่อเข้าใจได้ง่ายขึ้นให้ออปแอมป์ เป็นอุดมคติทุกประการยกเว้นมีความต้านทานทางเอาต์พุต และนำความต้านทานอันนี้มาเขียนไว้ข้างนอกตัวออปแอมป์



รูปที่ 2.35 ความต้านทานทางเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราขยายเปลี่ยนไป
ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

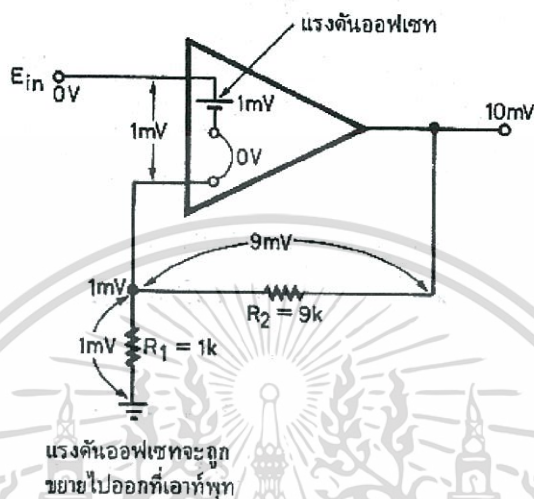
รูปที่ 35 ก. เป็นกรณีที่ $A_v = a$ และรูปที่ 35 ข. เป็นกรณีที่ $A_v = 100$ จะเห็นว่าทั้งสองกรณีเมื่อต่อโหลดให้กับวงจร ออปแอมป์จะพยายามยกแรงดันเอาต์พุต ของตัวเองให้สูงขึ้นเพื่อให้แรงดันที่คร่อมโหลดมีค่าใกล้เคียงของเดิม จึงทำให้แลดูเห็นว่าความต้านทานทางเอาต์พุตของวงจรมีค่าน้อยลงไป

กรณี $A_v = \text{alfa}$ จะคำนวณความต้านทานทางเอาต์พุตได้ศูนย์ และกรณี $A_v = 1000$ จะคำนวณความต้านทานทางเอาต์พุตได้เพียง 22.7 โอห์ม เท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากความต้านทานทางเอาต์พุตจริงของออปแอมป์

ข้อมูลเกี่ยวกับความต้านทานทางเอาต์พุตของออปแอมป์นั้น มักจะไม่ค่อยมีแสดงในคู่มือออปแอมป์ของผู้ผลิต แต่อย่างไรก็ตามความต้านทานทางเอาต์พุตนี้ไม่ค่อยก่อปัญหา แก่ผู้ออกแบบเท่ากับความสามารถในการขับโหลดของออปแอมป์

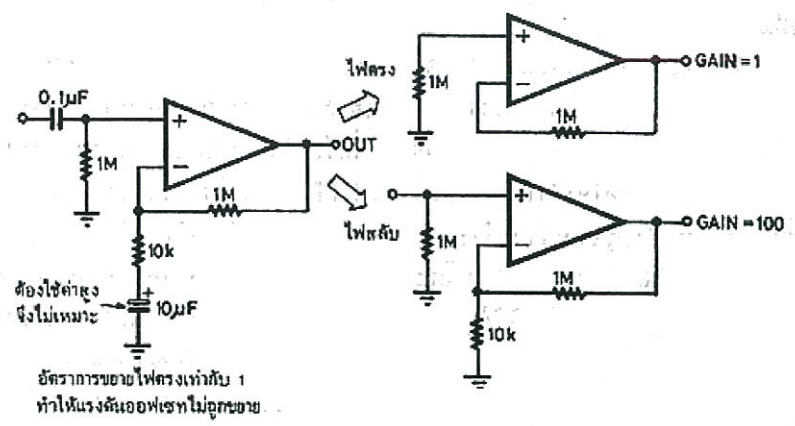
2.14.4 แรงดันออฟเซตทางอินพุท

แรงดันออฟเซตทางอินพุทเป็นเรื่องสำคัญมากเรื่องหนึ่ง เมื่อเราศึกษาเรื่องออปแอมป์ แรงดันออฟเซตทางอินพุทหมายถึง แรงดันขนาดเล็กที่ปรากฏระหว่างอินพุทบวกลบ ของออปแอมป์ในขณะที่แรงดันอินพุทเป็นศูนย์ ลองดูรูปที่ 37 ประกอบ



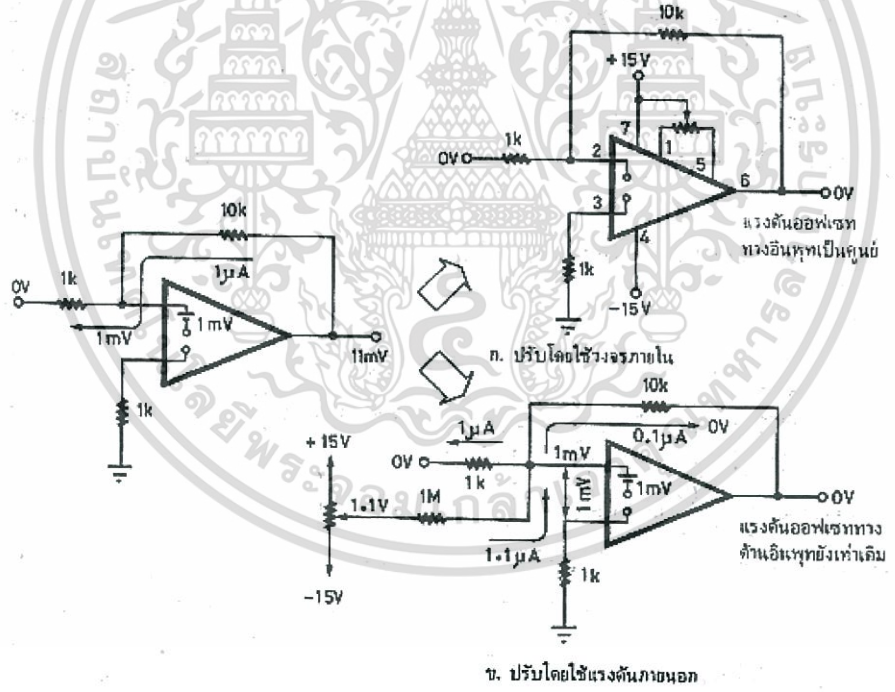
รูปที่ 2.36 แรงดันออฟเซตเพียง 1 mV เอาท์พุทได้ 10 mV เมื่อออปแอมป์มีอัตราขยาย 10 เท่า
ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

สำหรับวงจรที่ไม่ต้องการขยายแรงดันไฟตรง มักพยายามกำจัดผลของแรงดันออฟเซตนี้ ไม่ให้ไปปรากฏที่เอาต์พุท อย่างเช่น วิธีการวงจรขยายแรงดัน ไฟสลับด้วยออปแอมป์สังเกตจากรูปทางซ้าย มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ ซึ่งคุณสมบัติของตัวเก็บประจุคือจะกันไฟตรงเอาไว้ และยอมให้ผ่านเฉพาะไฟสลับ ดังนั้น เมื่อมีแรงดันไฟตรงป้อนกลับมาที่อินพุทลบ ตัวเก็บประจุจะทำให้สัญญาณไฟตรงทั้งหมดไหลผ่านเข้าอินพุทลบ หักล้างกับแรงดันไฟตรง ที่จะออกทางเอาต์พุทได้อัตราขยายเท่ากับ 1



รูปที่ 2.37 แสดงการกำจัดแรงดันออฟเซตโดยการให้ขยายเฉพาะแรงดันที่เป็นไฟสลัป
 ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

เมื่อมีสัญญาณไฟสลัปผ่านเข้ามาจากเอาต์พุต มันจะเลือกไหลผ่านตัวเก็บประจุลงดินไป เหมือนกับว่าตัวต้านทานค่า 10 kโอห์ม ในวงจรถูกต่อลงดินกลายเป็นรูปทางขวามือ ล่าง เมื่อคำนวณอัตราขยายจากค่าของอุปกรณ์แล้วได้เท่ากับ 100 เท่า



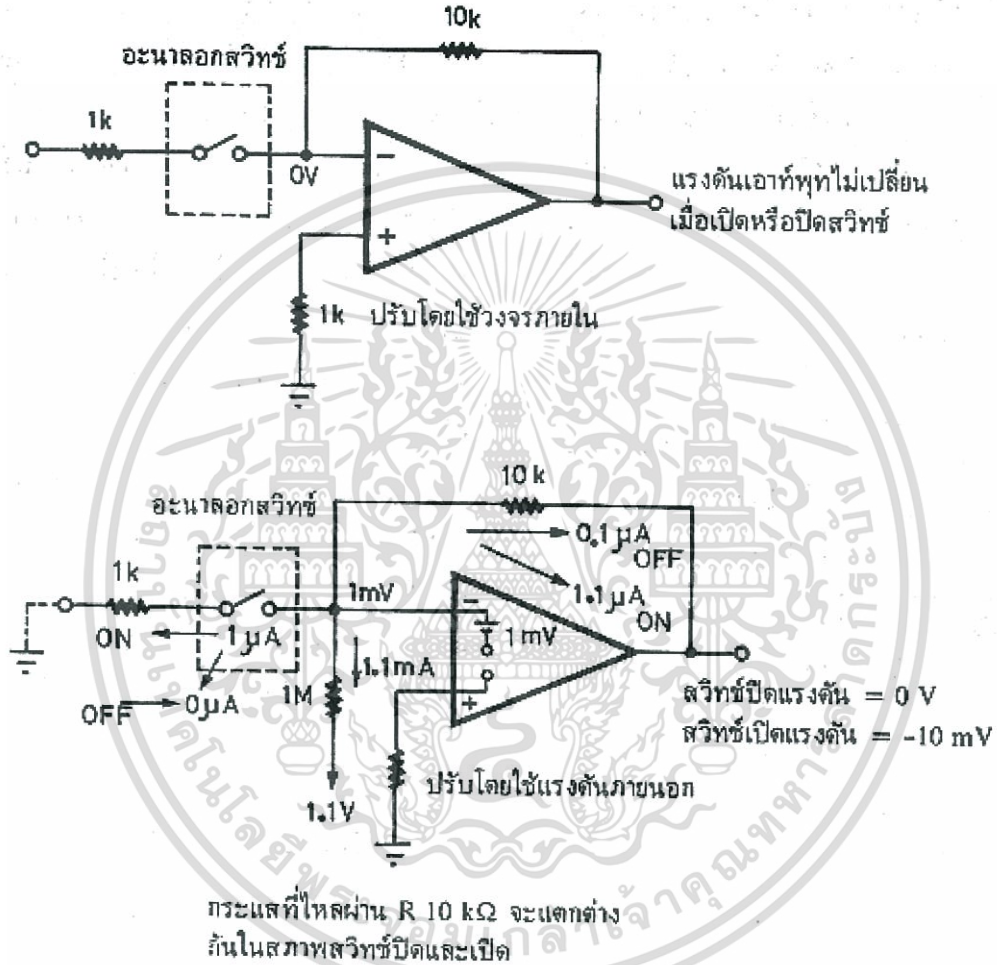
รูปที่ 2.38 แสดงวิธีการปรับแรงดันออฟเซต
 ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

การปรับเพื่อลดขนาดแรงดันออฟเซตที่อินพุตสามารถทำได้ 2 วิธีคือ ใช้วงจรภายในของออปแอมป์เอง โดยต่ออุปกรณ์ปรับเข้ากับขาของออปแอมป์และอีกวิธีหนึ่งคือ ป้อนแรงดันจากภายนอกเข้าไปปลงล้างผลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันออฟเซตนี้การป้อนแรงดันจากภายนอกแม้จะลดผลของออฟเซต ไม่ให้ไปปรากฏที่เอาต์พุตได้จริง แต่อย่าลืมว่า แรงดันออฟเซตทางอินพุตของออปแอมป์ ก็ยังไม่ได้หายไปไหน จากรูปที่ 38 ประกอบ

ซึ่งเรื่องนี้อาจจะเป็นปัญหาได้เมื่อวงจรออปแอมป์ซับซ้อนขึ้น หรือในวงจรที่ใช้อะนาล็อก สวิตช์ (analog switch) อะนาล็อกสวิตช์เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ชนิดหนึ่งมีการทำงานคล้ายคลึงกับรีเลย์ เพียงแต่ไม่มีหน้าสัมผัสเชิงกลแบบรีเลย์ ใช้ในการเปิดปิดสัญญาณไฟฟ้าภายในมักจะทำด้วยทรานซิสเตอร์หรือเฟ็ท อะนาล็อกสวิตช์ที่มีขายตามท้องตลาดในปัจจุบัน มักจะเป็นชนิดที่ทำจากเฟ็ททั้งนั้น



รูปที่ 2.39 แสดงการใช้อนาล็อกสวิตช์เพื่อเปิดปิดวงจรทางอินพุต

ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

ดูตัวอย่างในรูปที่ 2.40 จะเห็นว่าการปรับออฟเซตโดยใช้แรงดันภายนอกจะทำให้เอาต์พุต มีแรงดันแตกต่างกันเมื่อสวิตช์อยู่ในสภาวะเปิดหรือปิด

2.14.5 กระแสไบแอสทางอินพุท

กระแสไบแอสทางอินพุท หมายถึง กระแสที่ไหลเข้าหรือออกจากขั้วบวกหรือลบ ของอินพุทของออปแอมป์ไม่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ทางอินพุทของออปแอมป์ ปกติกระแสไบแอสทางอินพุท จะมีองค์ประกอบไฟตรงเป็นหลักในขณะที่ความสัมพันธ์ทางอินพุท จะมีองค์ประกอบทางไฟสลับเป็นหลัก

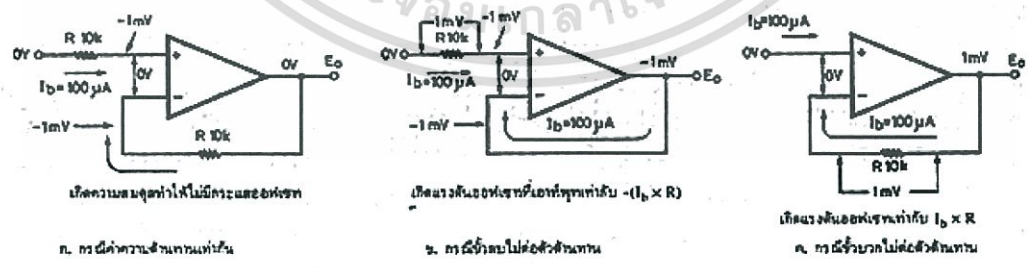
ทิศทางการไหลของกระแสไบแอสนี้ จะเป็นการไหลเข้าหรือออกจากออปแอมป์จะกำหนดจากชนิดของทรานซิสเตอร์หรือเฟ็ท ที่ขั้วอินพุทภายในออปแอมป์นั้น ๆ ส่วนใหญ่แล้วกระแสจะไหลเข้า แต่มีออปแอมป์บางตัว (เช่นเบอร์ 4558) กระแสจะไหลออก จึงควรระวังในจุดนี้ด้วย



รูปที่ 2.40 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไบแอสที่อินพุทในไอซีแบบต่าง ๆ
ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

นอกจากนั้น ยังมีออปแอมป์ชนิดที่มีความต้านทานทางอินพุทสูงมากและกระแสไบแอสต่ำ ภายในออปแอมป์จะมีการชดเชยกระแสไบแอสนี้ เลยทำให้ทิศทางการไหลของกระแสไบแอสไม่แน่นอนลองดูรูปที่ 2.40 ประกอบ

ลองดูผลของกระแสไบแอสในรูปที่ 2.41 ก. นั้นออปแอมป์ต้องการกระแสไบแอส 100 microA กระแสนี้จะไหลเข้าออปแอมป์ทั้งทางขั้วบวกและลบ ถ้าค่าความต้านทานที่ต่อบนทางเดินของกระแสทั้งสองด้านเท่ากัน ก็จะไม่ผลทำให้เกิดแรงดันออฟเซตที่เอาท์พุท แต่ค่าความต้านทานที่ต่อกับขั้วบวกและลบนี้นั้นแตกต่างกันละก็จะทำให้เกิดแรงดันออฟเซต ที่เอาท์พุทของวงจรทันที

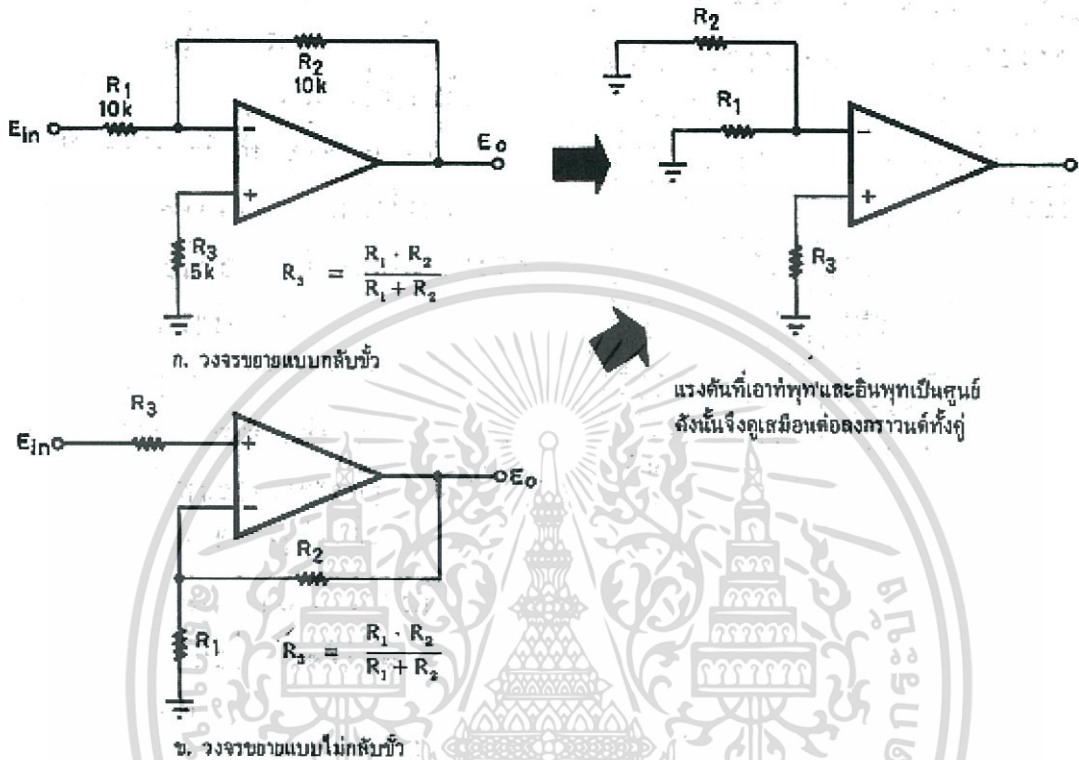


รูปที่ 2.41 ผลของกระแสไบแอสทางอินพุท

ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.41 ให้ค่าความต้านทานที่ต่อวงจรเท่ากับ 10 kโอห์ม เมื่อกระแสไบแอสไหลผ่านตัวต้านทาน จะทำให้เกิดแรงดันเท่ากับ $100 \text{ mA} \times 10 \text{ kโอห์ม} = 1 \text{ mV}$ ในกรณีรูป ก. ทั้งขั้วบวกและลบมีแรงดัน 1 mV เท่ากัน จึงหักล้างกันเอง ไม่ทำให้เกิดแรงดันออฟเซตที่ขั้วเอาต์พุต ในกรณีรูป ข. และ ค. นั้น มีตัวต้านทานต่ออยู่เพียงข้างเดียว จึงไม่เกิดความสมดุล เป็นผลทำให้เกิดแรงดันออฟเซต



รูปที่ 2.42 แสดงการต่อตัวต้านทานที่อินพุตทั้งสองให้สมดุลกัน
ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

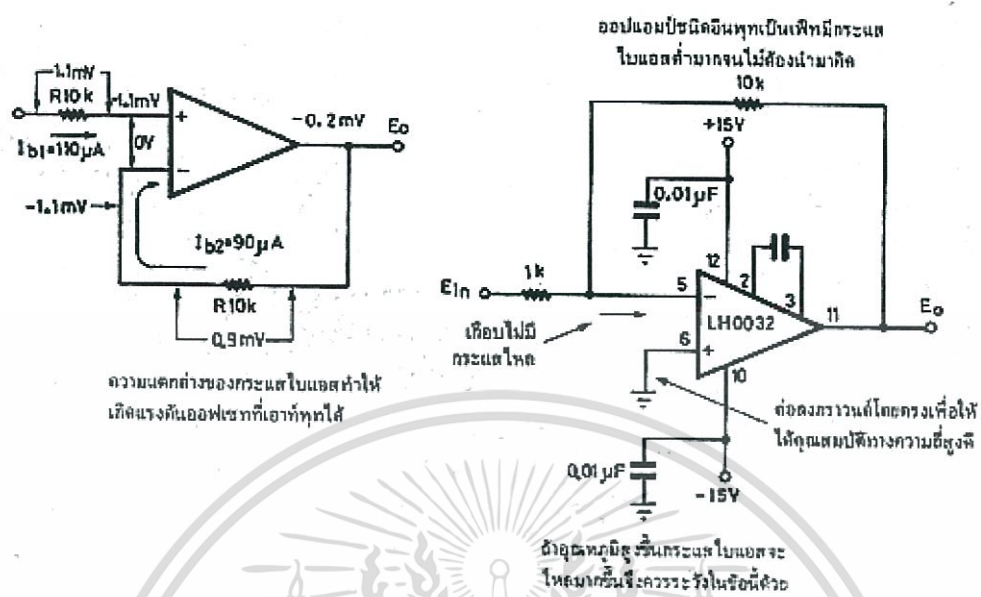
ถ้าที่ขั้วอินพุตของออปแอมป์มีตัวต้านทานมาต่อด้วยหลายตัว ตัวต้านทานที่จะต้องต่อเข้าที่อีกขั้วหนึ่งเพื่อให้เกิดความสมดุลจะต้องมีค่าเท่ากับการต่อขนานของ ตัวต้านทานทุกตัวนั้น ดูตัวอย่างในรูปที่ 2.43

ในปัจจุบันมีออปแอมป์ที่ใช้เพ็ทเป็นอินพุตอยู่หลายตัว ที่นิยมใช้แพร่หลายกันดูในตารางที่ 1 ออปแอมป์ชนิดนี้ จะมีกระแสไบแอสที่อินพุตต่ำมาก จนไม่ทำให้เกิดปัญหาในการใช้งาน

2.14.6 กระแสออฟเซตทางอินพุต

ตามปกติกระแสไบแอสที่ไหลเข้าขั้วบวกและลบของออปแอมป์จะไม่เท่ากันทีเดียวนัก ความแตกต่างของกระแสทั้งสองนี้ เรียกว่ากระแสออฟเซตทางอินพุตของออปแอมป์ ยกตัวอย่างเช่น กระแสไบแอสที่ไหลเข้าทาง

ขั้วบวกเป็น 110 microA และที่ขั้วลบเป็น 90 microA เราจะเขียนว่ากระแสไบแอสเท่ากับ 100 microA และกระแสออฟเซตทางอินพุตเท่ากับ 20 microA เป็นต้น



รูปที่ 2.43 แสดงผลของกระแสออฟเซ็ท ที่มา: "OP-AMP" โดย www.living-electronics.blogspot.com

รูปที่ 2.43 จะแสดงให้เห็นว่ากระแสออฟเซตนี้ จะทำให้เกิดแรงดันออฟเซตขึ้นที่ขั้วเอาต์พุตได้โดยยังไม่คิดผลของกระแสไบแอส การหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดแรงดันออฟเซตเนื่อง มาจากกระแสออฟเซตนี้ สามารถทำได้โดยการลดขนาดของค่าความต้านทานในวงจรลง อันจะเป็นผลทำให้แรงดันตกคร่อมมีขนาดเล็กลง

ออปแอมป์ที่ใช้งานทั่วไป จะมีขนาดของกระแสออฟเซตมากขึ้นตามขนาดของกระแสไบแอส แต่ถ้าเป็นออปแอมป์คุณภาพดี จะมีกระแสออฟเซตน้อยเป็นไม่กี่สิบลำของกระแสไบแอสยิ่งถ้าเป็นออปแอมป์ชนิดที่อินพุตเป็นเฟิร์ท จะมีกระแสไบแอสน้อยมาก ทำให้กระแสออฟเซตยิ่งน้อยลงไปใหญ่ จนไม่จำเป็นต้องคำนึงถึง และถ้าใช้ออปแอมป์ชนิดนี้ ในงานความถี่สูง ควรต่อขั้วบวกของออปแอมป์ลงกราวนด์โดยตรง เพื่อให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ดีขึ้นแต่จุดอ่อนของออปแอมป์ชนิดที่อินพุตเป็นเฟิร์ท จะอยู่ที่คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ลองดูจากคู่มือของออปแอมป์ ชนิดที่มีอินพุตเป็นเฟิร์ทนั้น แล้วเปรียบเทียบค่ากระแสไบแอสและกระแสออฟเซตทางอินพุตที่อุณหภูมิ 20 องศา และ 70 องศา จะเห็นว่าแตกต่างกันมาก บางตัวที่ 70 องศา จะมีกระแสไบแอสมากกว่า ออปแอมป์ชนิดอินพุตเป็นทรานซิสเตอร์เสียอีก

ลองดูตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของออปแอมป์ในตารางที่ 1 จะเห็นว่ากระแสไบแอสและกระแสออฟเซตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิการเพิ่มขึ้นจะมากถึง ขนาดหลายร้อยหลายพันเท่า และเป็นเงื่อนไขเดียวที่ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นมากที่สุดในบรรดาคุณสมบัติอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

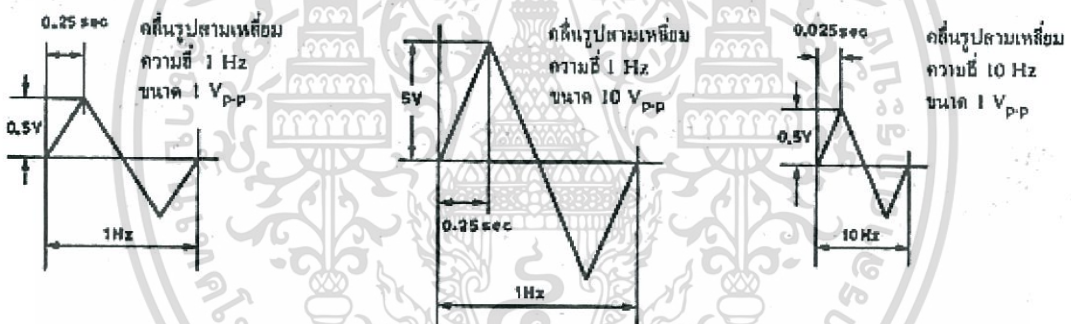
ฉะนั้นจึงควรทดสอบวงจรที่ต้องการอินพุตพีแควนซ์สูง ๆ และทดสอบที่อุณหภูมิสูงด้วย แล้วทำการวัดผลของกระแสไบแอสนี้ จึงจะทำให้เกิดความมั่นใจในการใช้งานได้ สำหรับคุณสมบัติทางด้านอื่นจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเช่นกัน แต่จะไม่มากเท่ากับกระแสไบแอสนี้

2.14.7 ลักษณะสมบัติเชิงความถี่

คุณสมบัติข้อนี้เรียกว่าเป็นตัวกำหนดความสามารถของออปแอมป์ที่เดียว ออปแอมป์จะดีไม่ดึกก็มักดูกันที่ลักษณะเชิงความถี่นี้

แต่มีคุณสมบัติอีกข้อหนึ่งที่มีมักจะดูควบคู่กันไปคือ สลัวร์เรท (Slew rate) สลัวร์เรท หมายถึง ความสามารถในการให้เอาท์พุท เพื่อไล่ให้ทันการเปลี่ยนแปลงทางอินพุท ที่ป้อนเข้ามา ถ้าป้อนแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีแอมพลิจูดใหญ่ให้กับออปแอมป์ แล้ววัดดูความเร็วในการขึ้นลงของรูปคลื่นทางเอาท์พุทจะได้เป็นค่าสลัวร์เรทออกมา

ตัวอย่างเช่นเอาท์พุทให้แรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป 10 V ในเวลา 0.1 mS แสดงว่ามีสลัวร์เรท เท่ากับ $10 / 0.1 \text{ microS} = 100 \text{ V} / \text{microS}$ คลื่นสามเหลี่ยมความถี่ 1 Hz ขนาด 1 Vpp จะมีสลัวร์เรทเท่ากับ $0.5 \text{ V} / 0.25 \text{ microS}$ หรือ $2 \text{ V} / \text{Sec}$ แต่ถ้าขนาดเพิ่มเป็น 10 Vpp ค่าสลัวร์เรทจะเป็น $5 \text{ V} / 0.25 \text{ Sec}$ หรือ $20 \text{ V} / \text{Sec}$ นั่นเอง ซึ่งจะเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่าตัว อัตราการเปลี่ยนแรงดันนี้เราเรียกว่า สลัวร์เรท

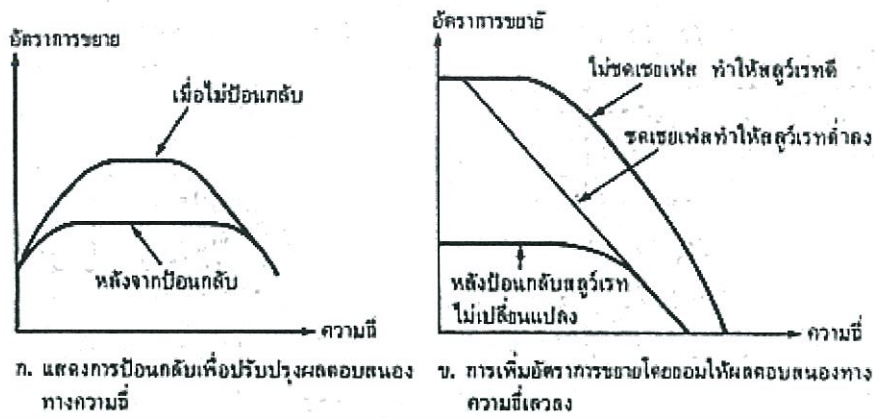


รูปที่ 2.44 คลื่นที่เหมือนกัน ความถี่เท่ากันแต่ขนาดต่างกัน สลัวร์เรทจะไม่เท่ากัน

ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

จากรูปที่ 2.44 การเพิ่มความถี่หรือเพิ่มขนาดสัญญาณ ให้ออปแอมป์ จะเป็นปัญหาทางด้านสลัวร์เรททั้งสิ้น การป้อนกลับจะทำให้ผลตอบสนองความถี่ของวงจรขยายดีขึ้นจริง แต่จะไม่ทำให้สลัวร์เรทสูงขึ้นเลย แนวความคิดของการใช้วงจรป้อนกลับในสมัยก่อนนั้น มีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงผลตอบสนองทางความถี่ให้ดีขึ้น ตามรูปที่ 2.31 แต่การใช้งานออปแอมป์ในปัจจุบัน มักจะไม่คำนึงถึงผลตอบสนองความถี่มากนักบางครั้งเพื่อให้ได้อัตราขยายของระบบสูงขึ้น อาจจะต้องทำให้ผลตอบสนองความถี่เลวลง โดยพยายามไม่ให้เกิดการออสซิลเลทเกิดขึ้นได้ง่าย

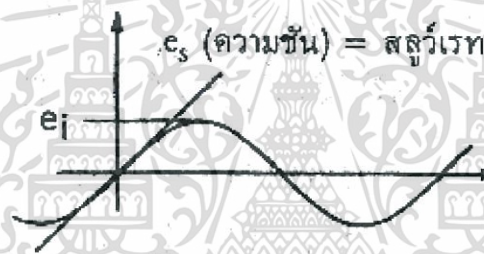
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.45 แสดงผลของการป้อนกลับ

ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับสั้วเรท คือการที่จะทำให้รูปคลื่นที่สมบูรณ์มีขนาดใหญ่ได้เท่าใด ในขณะที่ความถี่สูงขึ้น ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับผลตอบสนองทางความถี่เลย



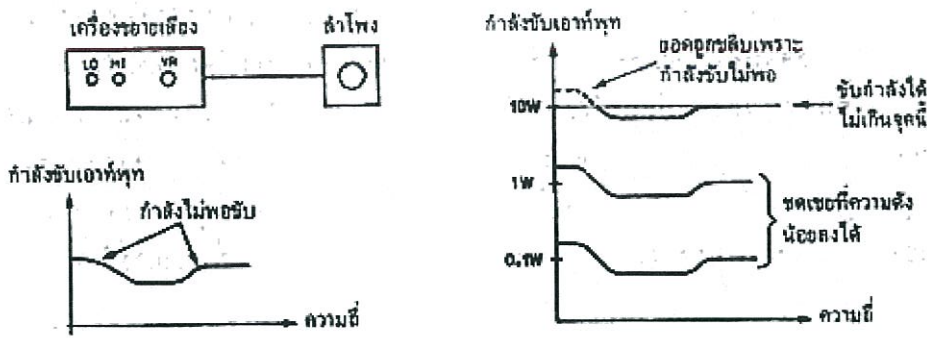
รูปที่ 2.46 อัตราสั้วเรทที่ดีทำให้ได้รูปชายนี่ไม่ผิดเพี้ยนจากการขยาย

ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

ลองดูในรูปที่ 2.46 การที่ออปแอมป์จะสามารถผลิตสัญญาณรูปชายนี่ความถี่ 1 MHz ขนาด 20 Vp-p ได้นั้น ออปแอมป์จะต้องมีสั้วเรทดีถึง 62.8 V / microS

ออปแอมป์เบอร์ LM741 ที่นิยมใช้กันนั้น มีสั้วเรทเพียง 0.5 V / microS ถ้าจะนำมาผลิตรูปคลื่นชายนี่มีขนาด 20 Vp-p ก็คงจะได้ความถี่เพียงประมาณ 10 KHz เท่านั้นเอง แต่ถ้าใช้ LM741 เป็นบัฟเฟอร์ที่มีอัตราขยายเพียง 1 เท่า และพยายามผลิตสัญญาณให้ได้ 1 MHz ก็จะได้ขนาดสัญญาณเพียง 0.1 V เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.47 แสดงขีดความสามารถของโหนดคอนโทรล
ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

เปรียบเทียบการพยายามใช้โหนดคอนโทรล ในการปรับให้เครื่องขยายเสียงที่มีกำลังน้อยขับเสียงต่ำให้ดังขึ้นตามในรูปที่ 2.47 นั้นเอง

แต่ถ้าสล็อตเรตก็ไม่ได้หมายความว่าผลตอบสนองทางความถี่จะดีตามไปด้วย ออปแอมป์ในสมัยแรก ๆ นิยมใช้เบอร์ LM709 ซึ่งเป็นออปแอมป์เบอร์ที่มีสล็อตเรต 2 V / microS แต่ในการใช้งานทุกครั้งจะต้องต่ออุปกรณ์ เพื่อชดเชยเฟสเสมอ ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าสล็อตเรตต่ำลงจนอาจจะเร็วกว่า LM741 ซึ่งมีสล็อตเรตเพียง 0.5 V / microS ดูรูปที่ 2.39 ประกอบ

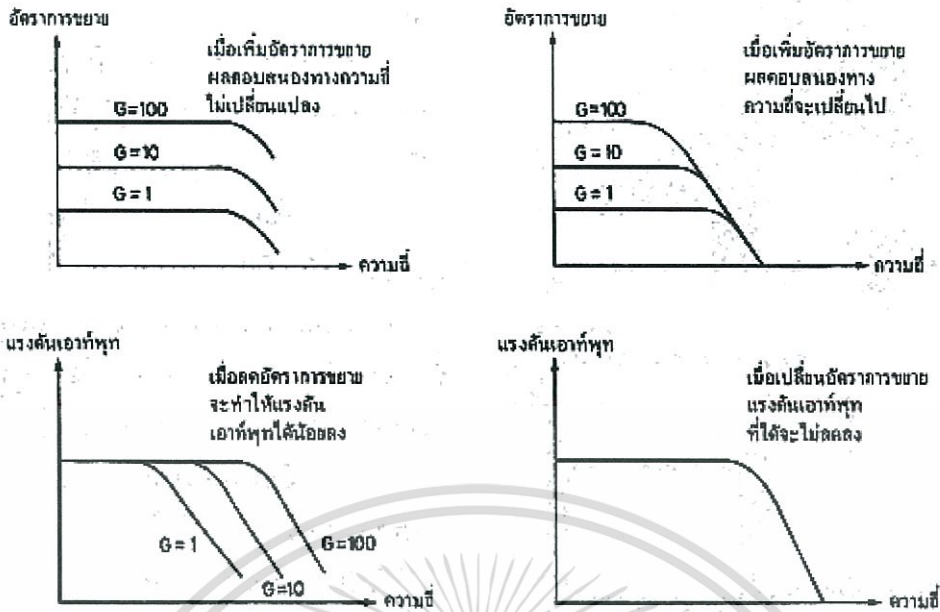
การชดเชยเฟส มักจะทำให้ค่าสล็อตเรตต่ำลง แต่ก็มีวิธีชดเชยที่จะไม่ทำให้สล็อตเรตต่ำลง บางครั้งอาจทำได้ดีขึ้นด้วย แต่ถ้าใช้ออปแอมป์หลายตัวทำงานร่วมกัน จะทำให้เกิดปัญหาเรื่องเสถียรภาพของการทำงานได้

อัตราขยาย	C ₁ (pF)	C ₂ (pF)	R ₁ (kΩ)	ผลตอบสนองความถี่	สล็อตเรต
1000	10	3	0	↑ เหมือนเดิม ↓	ดี ↓ เลว
100	100	3	1.5		
10	470	22	1.5		
1	4700	220	1.5		

รูปที่ 2.48 แสดงการชดเชยเฟสของออปแอมป์เบอร์ LM709
ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

จากรูปที่ 2.49 จะเห็นว่า การชดเชยเฟสให้ LM709 จะทำให้ผลตอบสนองความถี่ดีขึ้น แต่จะทำให้สล็อตเรตเลวลง เนื่องจากผลของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการชดเชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ออปแอมป์เบอร์ LM709 (ชดเชยเฟสภายนอก)

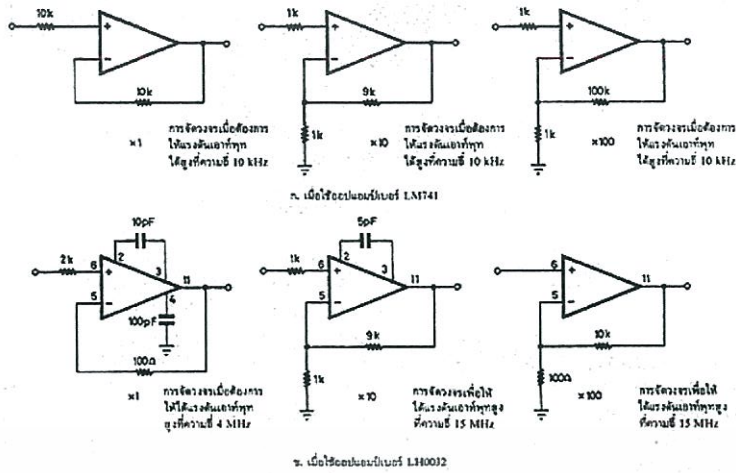
ข. LM741 (ชดเชยเฟสภายนอก)

รูปที่ 2.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายกับสlew rate
 ที่มา: "OP-AMP" โดย www.living-electronics.blogspot.com

การชดเชยเฟสจะต้องต่ออุปกรณ์ภายนอก แต่ค่า C และ R ที่เหมาะสมจะต้องปรับไปตามอัตราขยายที่ต้องการ

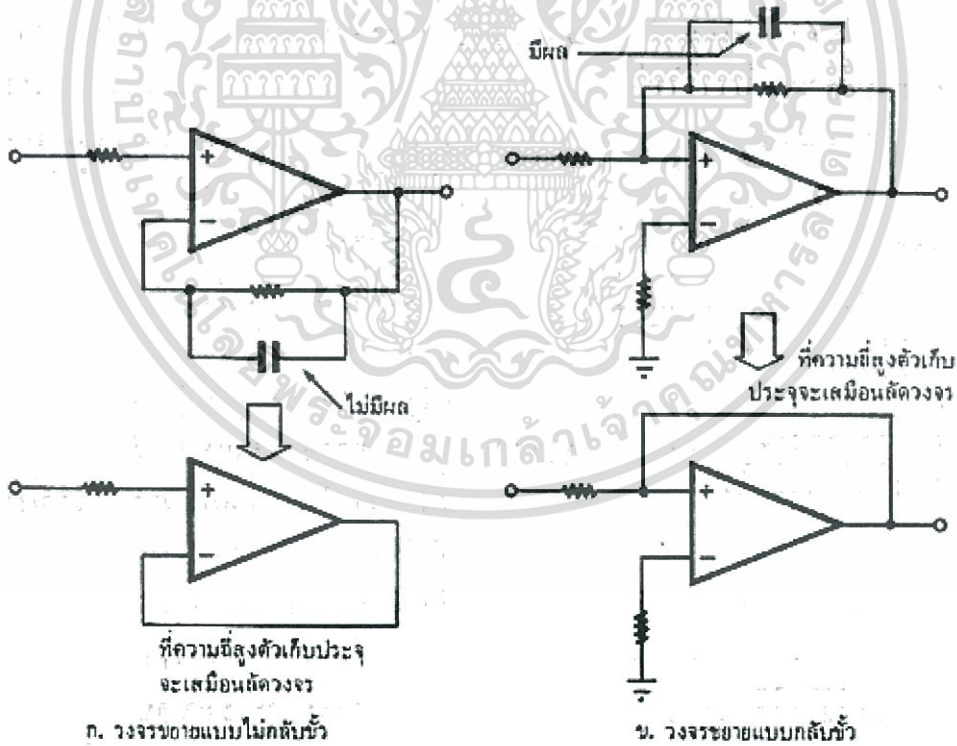
ออปแอมป์ในปัจจุบันนี้ จะมีวงจรถดเชยเฟสใส่ไว้ภายในตัวไอซี ไม่จำเป็นต้องต่ออุปกรณ์ภายนอก และไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนขนาดของอุปกรณ์ตามอัตราขยายที่ได้ แต่ถ้าใช้ในกรณีที่อัตราขยายสูงมาก จะทำให้ผลตอบสนองความถี่เลวลงไปได้

ออปแอมป์ความเร็วสูง ก็มีการชดเชยเฟสภายในเช่นเดียวกัน แต่การชดเชยจะน้อยที่สุด ดังนั้นในบางครั้ง อาจจะต้องต่ออุปกรณ์ภายนอกช่วย เช่น เมื่อใช้กรณีที่อัตราขยายสูงไม่ต้องต่ออุปกรณ์ชดเชย แต่ถ้าอัตราขยายต่ำจะต้องต่อตัวเก็บประจุชดเชยเป็นต้นดูรูปที่ 2.37 ประกอบ



รูปที่ 2.50 อัตราการขยายของออปแอมป์มีผลทำให้ผลตอบสนองความถี่เปลี่ยนไป
ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

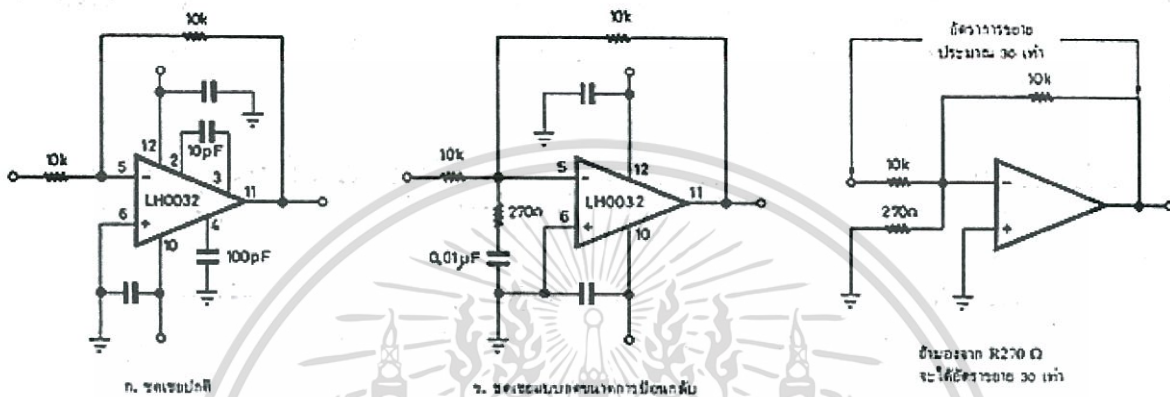
ถ้าใช้ออปแอมป์ความเร็วสูง ที่อัตราการขยายเพียง 1 จะต้องต่ออุปกรณ์ชดเชยให้หลายตัว มิฉะนั้นการทำงานจะขาดเสถียรภาพ (ออสซิลเลตได้ง่ายมาก) การใส่ตัวเก็บประจุเข้าไปเพื่อชดเชยจะทำให้สlew rate ลดลง และคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ในย่านความถี่สูงจะเกิดยอดทำให้ไม่เป็นผลดีต่อการใช้งาน



รูปที่ 2.51 แสดงการต่อตัวเก็บประจุชดเชยเฟสขนานเข้ากับตัวต้านทานป้อนกลับ
ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การชดเชยเฟสในรูปที่ 2.51 จะใช้การต่อตัวเก็บประจุ คร่อมตัวต้านทานที่ใช้ในการป้อนกลับซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก จากในรูปจะเห็นว่า ในย่านความถี่สูงจะทำให้เสมือนเกิดลัดวงจรที่ตัวเก็บประจุ เป็นผลให้วงจรมีขั้วแบบไม่กลับขั้ว จะมีอัตราขยายเหลือเพียง 1 และวงจรมีขั้วแบบกลับขั้วจะมีอัตราขยายเป็นศูนย์ ถ้าป้อนกลับมากเกินไป จะทำให้ออสซิลเลชันง่าย แต่ถ้าป้อนกลับน้อยไปจะทำให้อัตราขยายสูงเกินไป



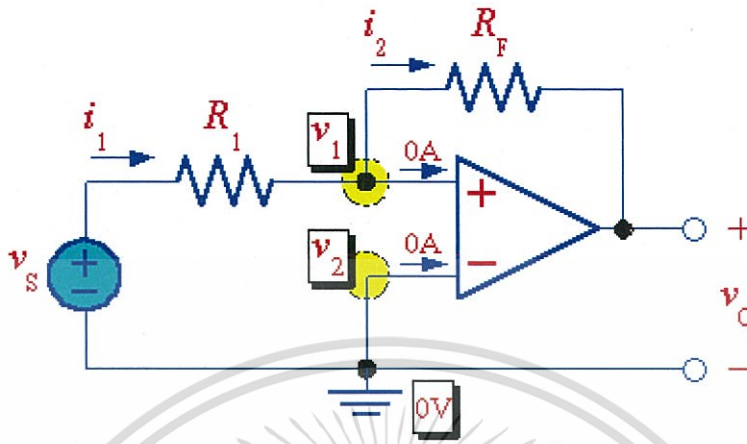
รูปที่ 2.52 แสดงการชดเชยเฟสที่ทำให้สลูว์เรทไม่เลวลง
ที่มา: “OP-AMP” โดย www.living-electronics.blogspot.com

วิธีการชดเชยเฟส โดยไม่ทำให้สลูว์เรทเลวลง แสดงในรูปที่ 2.52 รูป ก. การต่อตัวเก็บประจุจะทำให้สลูว์เรทเลวลง แต่รูป ข. สลูว์เรทไม่เลวลง

ในย่านความถี่ต่ำตัวเก็บประจุขนาด 0.01 microF จะมีอิมพีแดนซ์สูง จนละลายได้ แต่ในย่านความถี่สูงจะเปรียบเหมือนลัดวงจร ทำให้อัตราการขยายของวงจรมีค่าเท่าเดิม คือประมาณ 30 เท่า ขนาดของการป้อนกลับจะลดลง จึงไม่จำเป็นต้องมีการชดเชยเฟส

2.14.8 การประยุกต์ใช้วงจร op-amp

วงจรขยายแบบกลับขั้ว (Inverting Amplifiers)



รูปที่ 2.53 วงจรขยายแบบกลับขั้ว

ที่มา: "OP-AMP" โดย www.living-electronics.blogspot.comKCL ที่โหนด v_1 :

$$i_1 = i_2 \Rightarrow \frac{v_s - v_1}{R_1} = \frac{v_1 - v_o}{R_F} \quad (2.5)$$

แต่ $v_2 = v_1 = 0$ จะได้

$$\frac{v_s}{R_1} = -\frac{v_o}{R_F} \quad (2.6)$$

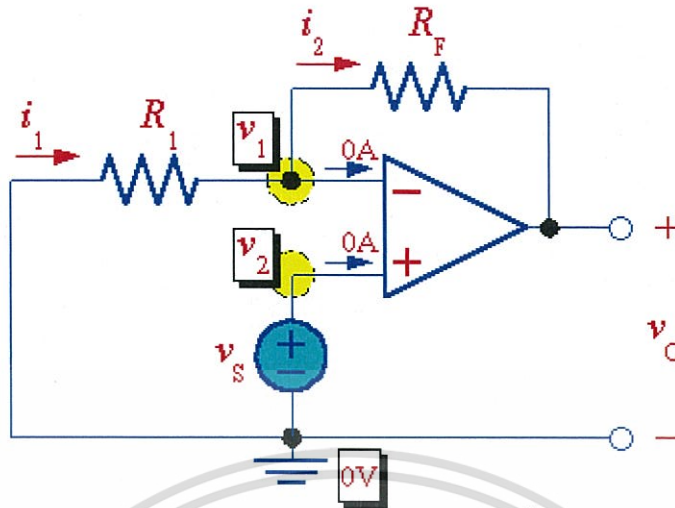
หรือ

$$\frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_F}{R_1} \quad (2.7)$$

จะพบว่าวงจรขยายแบบกลับขั้วนี้มีอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตต่อแรงดันอินพุต (หรือเรียกว่า อัตราขยาย) มีค่าที่ติดลบ โดยค่าอัตราขยายนี้จะขึ้นกับค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจร ส่วนค่าติดลบหมายถึง การที่ เราป้อนสัญญาณอินพุตมีค่าเป็นบวกสัญญาณทางเอาต์พุตจะมีค่าเป็นลบ หรือในทางตรงข้ามถ้าเราป้อนสัญญาณอินพุตมีค่าเป็นลบสัญญาณทางเอาต์พุตจะมีค่าเป็นบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรขยายแบบไม่กลับขั้ว (Non-inverting Amplifiers)



รูปที่ 2.54 วงจรรขยายแบบไม่กลับขั้ว

ที่มา: "OP-AMP" โดย www.living-electronics.blogspot.com

KCL ที่โหนด v_1 :

$$i_1 = i_2 \Rightarrow \frac{0 - v_1}{R_1} = \frac{v_1 - v_o}{R_F} \quad (2.8)$$

แต่ $v_2 = v_1 = v_s$ จะได้

$$-\frac{v_s}{R_1} = \frac{v_s - v_o}{R_F} \quad (2.9)$$

หรือ

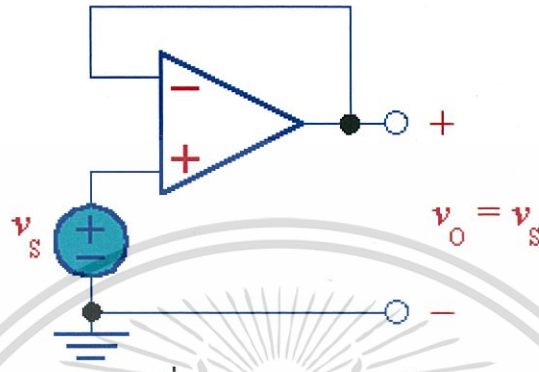
$$\frac{v_o}{v_s} = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad (2.10)$$

จะพบว่าวงจรรขยายแบบไม่กลับขั้วนี้มีอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตต่อแรงดันอินพุต มีค่าเป็นบวก โดยค่าอัตราขยายนี้จะขึ้นกับค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจร ส่วนค่าที่เป็นบวกหมายถึง การที่เราป้อนสัญญาณอินพุตมีค่าเป็นบวกสัญญาณทางเอาต์พุตจะมีค่าเป็นบวกด้วย หรือในทำนองเดียวกันถ้าเราป้อนสัญญาณอินพุตมีค่าเป็นลบสัญญาณทางเอาต์พุตจะมีค่าเป็นลบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower)

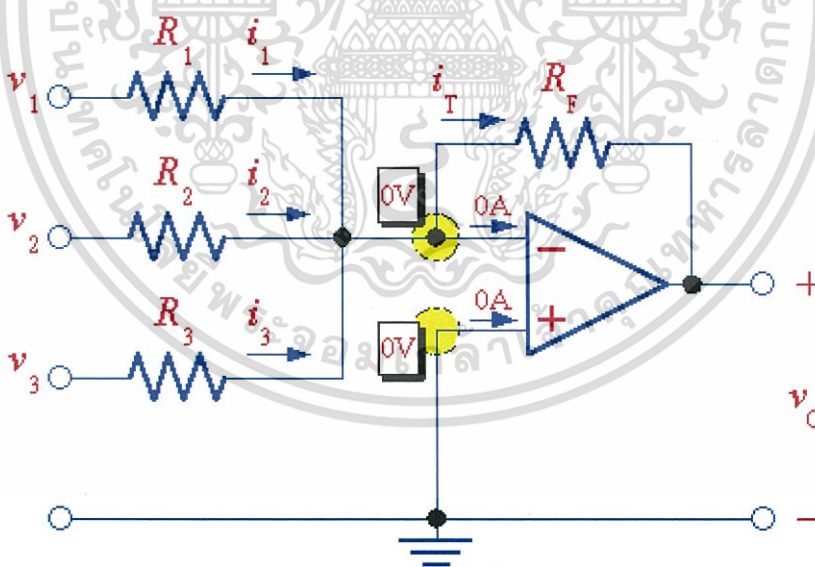
กรณีที่วงจรขยายแบบไม่กลับขั้วกรณีที่มีค่า $R_F = 0$ (ลัดวงจร) และ $R_1 = \infty$ (เปิดวงจร) จะได้วงจรเป็นดังรูปที่ 2.42 โดยวงจรนี้จะมีอัตราขยายเป็น 1 ซึ่งก็คือ $v_o = v_s$ นั่นเอง เราจะเรียก วงจรนี้ว่าวงจรตามแรงดันหรือวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer)



รูปที่ 2.55 วงจรตามแรงดัน

ที่มา: "OP-AMP" โดย www.living-electronics.blogspot.com

วงจรขยายผลบวก (Summing Amplifiers)



รูปที่ 2.56 วงจรขยายผลบวก

ที่มา: "OP-AMP" โดย www.living-electronics.blogspot.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KCL ที่โหนดอินพุตลบของออปแอมป์:

$$i_F = i_1 + i_2 + i_3 \Rightarrow \frac{0 - v_F}{R_F} = \frac{0 - v_1}{R_1} + \frac{0 - v_2}{R_2} + \frac{0 - v_3}{R_3} \quad (2.11)$$

จะได้

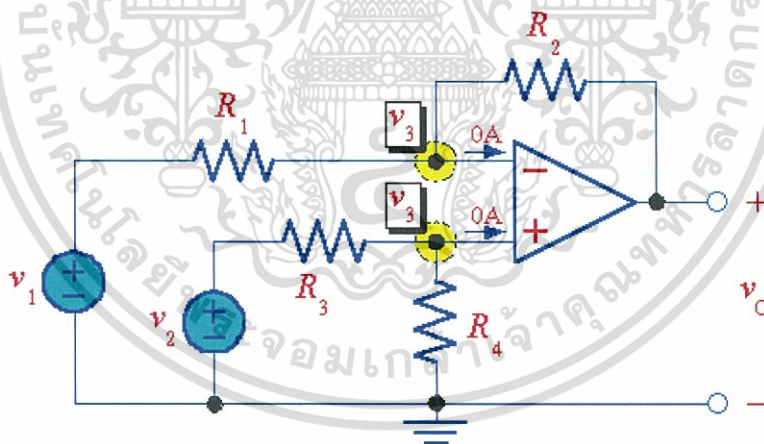
$$v_O = -\frac{R_F}{R_1} v_1 - \frac{R_F}{R_2} v_2 - \frac{R_F}{R_3} v_3 \quad (2.12)$$

ถ้า $R_1 = R_2 = R_3$ จะได้

$$v_O = -\frac{R_F}{R_1} (v_1 + v_2 + v_3) \quad (2.13)$$

จะพบว่าวงจรขยายผลบวกมีค่าเอาต์พุตเป็นผลบวกของแรงดันอินพุตแต่ละค่า ซึ่งมีอัตราขยายเป็นลบที่มีค่าขึ้นกับค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจร

วงจรขยายผลต่าง (Difference Amplifiers)



รูปที่ 2.57 วงจรขยายผลต่าง

ที่มา: "OP-AMP" โดย www.living-electronics.blogspot.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KCL ที่โหนดอินพุตลบของออปแอมป์:

$$\frac{v_1 - v_3}{R_1} = \frac{v_3 - v_o}{R_2} \quad (2.14)$$

KCL ที่โหนดอินพุตบวกของออปแอมป์:

$$\frac{v_2 - v_3}{R_3} = \frac{v_3 - 0}{R_4} \quad (2.15)$$

แก้สมการทั้งสองได้

$$v_o = \frac{R_2 (1 + R_1/R_2)}{R_1 (1 + R_3/R_4)} v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1 \quad (2.16)$$

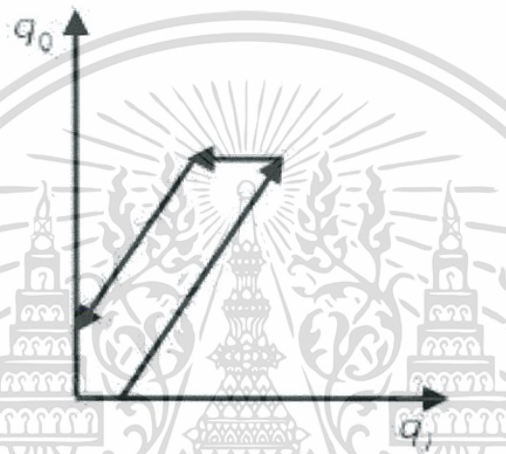
ถ้า $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ จะได้

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1) \quad (2.17)$$

วงจรมีความแตกต่างดังกล่าว เรียกว่า วงจรลบสัญญาณ(subtractor) จะพบว่าวงจรมีค่าเอาต์พุตเป็นผลลบของแรงดันอินพุต ซึ่งมีอัตราขยายเป็นลบที่มีค่าขึ้นกับค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจร

2.15 Hysteresis

ฮิสเทอริซิส (hysteresis) เป็นหนึ่งในคุณลักษณะสถิตของเครื่องมือวัด (static characteristics of instruments) ที่ใช้สำหรับอธิบายการเกิดบริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone/ dead band) มีนิยามคือ เมื่อเครื่องมือวัดได้รับโหลดหรือภาระ (load) จะมีพลังงานสะสมอยู่ภายในเครื่องมือวัด (instrument) และเมื่อนำโหลดออกพบว่า ยังคงมีพลังงานบางส่วนสะสมอยู่ภายใน ตัวอย่างเช่น เครื่องชั่งชนิดสปริง เมื่อเพิ่มน้ำหนักให้กับสปริง ก่อให้เกิดพลังงานกระทำที่สปริงซึ่งสามารถอ่านค่าน้ำหนักของวัตถุได้ค่าหนึ่ง และเมื่อลดน้ำหนักที่กระทำกับสปริง ค่าน้ำหนักที่อ่านได้อาจมีค่าไม่เท่าเดิม ผลของฮิสเตอร์ริซิสแสดงดังรูป



รูปที่ 2.58 ผลของฮิสเตอร์ริซิส

ที่มา: “Hysteresis” โดย นวภัทรา และ ทวีพล, 2555

จากรูปค่าเอาต์พุตที่ได้จากการเพิ่มและการลดโหลดมีค่าไม่เท่าเดิม ซึ่งเป็นผลมาจากพลังงานภายในเครื่องมือวัด เช่น ความเสียดทานภายใน หรือผลจากพลังงานภายนอก เช่น ความเสียดทานระหว่างชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องมือวัด หรือเกิดจากวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก โดยผลของฮิสเตอร์ริซิสสัมพันธ์กับค่าความคลาดเคลื่อน (static error/error) และความแม่นยำ (accuracy) ของเครื่องมือวัด (instrument)

2.16 รีเลย์(Relay)

รีเลย์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแม่เหล็ก เพื่อใช้ในการดึงดูดหน้าสัมผัสของคอนแทคให้เปลี่ยนสถานะ โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด เพื่อทำการปิดหรือเปิดหน้าสัมผัสคล้ายกับสวิตช์ อิเล็กทรอนิกส์ ใช้ในการควบคุมวงจรต่าง ๆ ในงานช่างอิเล็กทรอนิกส์

2.16.1 หน้าที่ของรีเลย์

เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ตรวจสอบสภาพการณ์ของทุกส่วน ในระบบกำลังไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลาหากระบบมีการทำงานที่ผิดปกติ รีเลย์จะเป็นตัวสั่งการให้ตัดส่วนที่ลัดวงจรหรือส่วนที่ทำงานผิดปกติ ออกจากระบบทันที

2.16.2 รีเลย์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนหลัก

1. ส่วนของขดลวด (coil) เหนียวนำกระแสต่ำ ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้แกนโลหะไปกระตุ้นให้หน้าสัมผัสต่อกัน ทำงานโดยการรับแรงดันจากภายนอกต่อคร่อมที่ขดลวดเหนียวนี้ เมื่อขดลวดได้รับแรงดัน (ค่าแรงดันที่รีเลย์ต้องการขึ้นกับชนิดและรุ่นตามี่ผู้ผลิตกำหนด) จะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้แกนโลหะด้านในไปกระตุ้นให้แผ่นหน้าสัมผัสต่อกัน

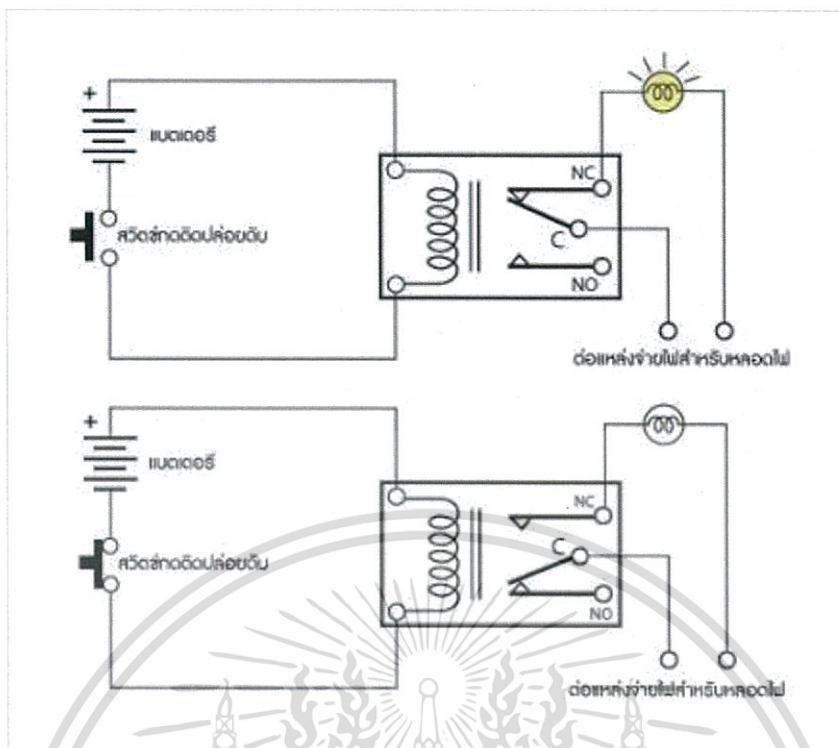
2. ส่วนของหน้าสัมผัส (contact) ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์จ่ายกระแสไฟให้กับอุปกรณ์ที่เราต้องการ

2.16.3 จุดต่อใช้งานมาตรฐาน

จุดต่อ NC ย่อมาจาก normal close หมายความว่าปกติปิด หรือ หากยังไม่จ่ายไฟให้ขดลวดเหนียว หน้าสัมผัสจะติดกัน โดยทั่วไปเรามักต่อจุดนี้เข้ากับอุปกรณ์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการให้ทำงานตลอดเวลา

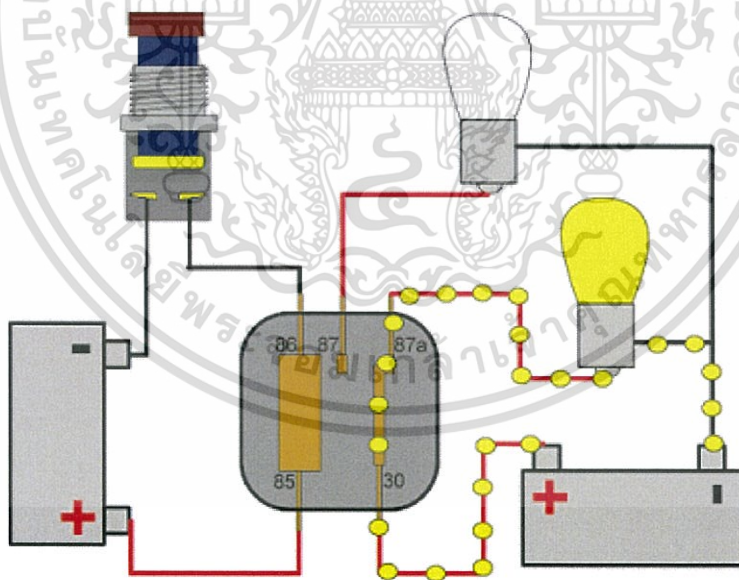
จุดต่อ NO ย่อมาจาก normal open หมายความว่าปกติเปิด หรือหากยังไม่จ่ายไฟให้ขดลวดเหนียว หน้าสัมผัสจะไม่ติดกัน โดยทั่วไปเรามักต่อจุดนี้เข้ากับอุปกรณ์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการควบคุมการเปิดปิดเช่น โคมไฟสนามหนือหน้าบ้าน

จุดต่อ C ย่อมาจาก common คือจุดร่วมที่ต่อมาจากแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ 2.59 ภาพตัวอย่างการทำงานของรีเลย์ ที่ต่อกับหลอดไฟ 1 หลอด

ที่มา: “รีเลย์(Relay)” โดย <http://www.psptech.co.th>



รูปที่ 2.60 ภาพตัวอย่างการทำงานของรีเลย์ ที่ต่อกับหลอดไฟ 2 หลอด

ที่มา: “รีเลย์(Relay)” โดย <http://www.psptech.co.th>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16.4 ประเภทของรีเลย์

แบ่งออกตามลักษณะการใช้งานได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. รีเลย์กำลัง (power relay) หรือมักเรียกกันว่าคอนแทกเตอร์ (Contactor or Magnetic contactor) ใช้ในการควบคุมไฟฟ้ากำลัง มีขนาดใหญ่กว่ารีเลย์ธรรมดา
 2. รีเลย์ควบคุม (control Relay) มีขนาดเล็กกำลังไฟฟ้าต่ำ ใช้ในวงจรควบคุมทั่วไปที่มีกำลังไฟฟ้าไม่มากนัก หรือเพื่อการควบคุมรีเลย์หรือคอนแทกเตอร์ขนาดใหญ่
- **รีเลย์ควบคุม บางที่เรียกกันง่าย ๆ ว่า "รีเลย์"

2.16.5 ชนิดของรีเลย์

การแบ่งชนิดของรีเลย์สามารถแบ่งได้ 11 แบบ คือ ชนิดของรีเลย์แบ่งตามลักษณะของคอยล์ หรือ แบ่งตามลักษณะการใช้งาน (Application) ได้แก่รีเลย์ดังต่อไปนี้

1. รีเลย์กระแส (Current relay) คือ รีเลย์ที่ทำงานโดยใช้กระแสมีทั้งชนิดกระแสขาด (Under-current) และกระแสเกิน (Over current)
2. รีเลย์แรงดัน (Voltage relay) คือ รีเลย์ ที่ทำงานโดยใช้แรงดันมีทั้งชนิดแรงดันขาด (Under-voltage) และ แรงดันเกิน (Over voltage)
3. รีเลย์ช่วย (Auxiliary relay) คือ รีเลย์ที่เวลาใช้งานจะต้องประกอบเข้ากับรีเลย์ชนิดอื่น จึงจะทำงานได้
4. รีเลย์กำลัง (Power relay) คือ รีเลย์ที่รวมเอาคุณสมบัติของรีเลย์กระแส และรีเลย์แรงดันเข้าด้วยกัน
5. รีเลย์เวลา (Time relay) คือ รีเลย์ที่ทำงานโดยมีเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 4 แบบ คือ
 - รีเลย์กระแสเกินชนิดเวลาผกผันกับกระแส (Inverse time over current relay) คือ รีเลย์ ที่มีเวลาทำงานเป็นส่วนกลับกับกระแส
 - รีเลย์กระแสเกินชนิดทำงานทันที (Instantaneous over current relay) คือรีเลย์ที่ทำงานทันทีทันใดเมื่อมีกระแสไหลผ่านเกินกว่าที่กำหนดที่ตั้งไว้
 - รีเลย์แบบดีฟิไนต์ไทม์แล็ก (Definite time lag relay) คือ รีเลย์ ที่มีเวลาการทำงานไม่ขึ้นอยู่กับความมากน้อยของกระแสหรือค่าไฟฟ้าอื่นๆ ที่ทำให้เกิดงานขึ้น
 - รีเลย์แบบอินเวอร์สดีฟิไนต์ไทม์แล็ก (Inverse definite time lag relay) คือ รีเลย์ ที่ทำงานโดยรวมเอาคุณสมบัติของเวลาผกผันกับกระแส (Inverse time) และ แบบดีฟิไนต์ไทม์แล็ก (Definite time lag relay) เข้าด้วยกัน
6. รีเลย์กระแสต่าง (Differential relay) คือ รีเลย์ที่ทำงานโดยอาศัยผลต่างของกระแส
7. รีเลย์มีทิศ (Directional relay) คือรีเลย์ที่ทำงานเมื่อมีกระแสไหลผิดทิศทาง มีแบบรีเลย์กำลังมีทิศ (Directional power relay) และรีเลย์กระแสมีทิศ (Directional current relay)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. รีเลย์ระยะทาง (Distance relay) คือ รีเลย์ระยะทางมีแบบต่างๆ ดังนี้

- รีแอคแตนซ์รีเลย์ (Reactance relay)
- อิมพีแดนซ์รีเลย์ (Impedance relay)
- โมห์รีเลย์ (Mho relay)
- โอห์มรีเลย์ (Ohm relay)
- โพลาริซโมห์รีเลย์ (Polarized mho relay)
- ออฟเซตโมห์รีเลย์ (Off set mho relay)

9. รีเลย์อุณหภูมิ (Temperature relay) คือ รีเลย์ที่ทำงานตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้

10. รีเลย์ความถี่ (Frequency relay) คือ รีเลย์ที่ทำงานเมื่อความถี่ของระบบต่ำกว่าหรือมากกว่าที่ตั้งไว้

11. บุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz 's relay) คือรีเลย์ที่ทำงานด้วยก๊าซ ใช้กับหม้อแปลงที่แช่อยู่ในน้ำมันเมื่อเกิด ฟอลต์ ขึ้นภายในหม้อแปลง จะทำให้น้ำมันแตกตัวและเกิดก๊าซขึ้นภายในไปดันหน้าสัมผัส ให้รีเลย์ทำงาน

2.16.6 ประโยชน์ของรีเลย์

1. ทำให้ระบบส่งกำลังมีเสถียรภาพ (Stability) สูงโดยรีเลย์จะตัดวงจรเฉพาะส่วนที่เกิดผิดปกติ ออกเท่านั้น ซึ่งจะเป็นการลดความเสียหายให้แก่ระบบน้อยที่สุด
2. ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมส่วนที่เกิดผิดปกติ
3. ลดความเสียหายไม่เกิดลุกลามไปยังอุปกรณ์อื่นๆ
4. ทำให้ระบบไฟฟ้าไม่ดับทั้งระบบเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบ

บทที่ 3

การออกแบบระบบ

3.1 หลักการออกแบบระบบ และออกแบบวงจร

3.1.1 หลักการทำงานของระบบ

การทำงานของระบบนี้ คือการชาร์จไฟให้กับแบตเตอรี่ Lithium-Ion โดยคำนึงถึงหลักการในการชาร์จ จะแบ่งช่วงการชาร์จได้เป็น 4 ช่วง ได้แก่

ช่วงที่ 1 ทำการเช็คแรงดันของแบตเตอรี่ ในระบบว่าแต่ละเซลล์มีแรงดันเท่ากันหรือไม่

ช่วงที่ 2 ถ้าหากมีแบตเตอรี่ เซลล์ที่ยังไม่เท่ากันให้ทำการ discharge โดยใช้หลักการ

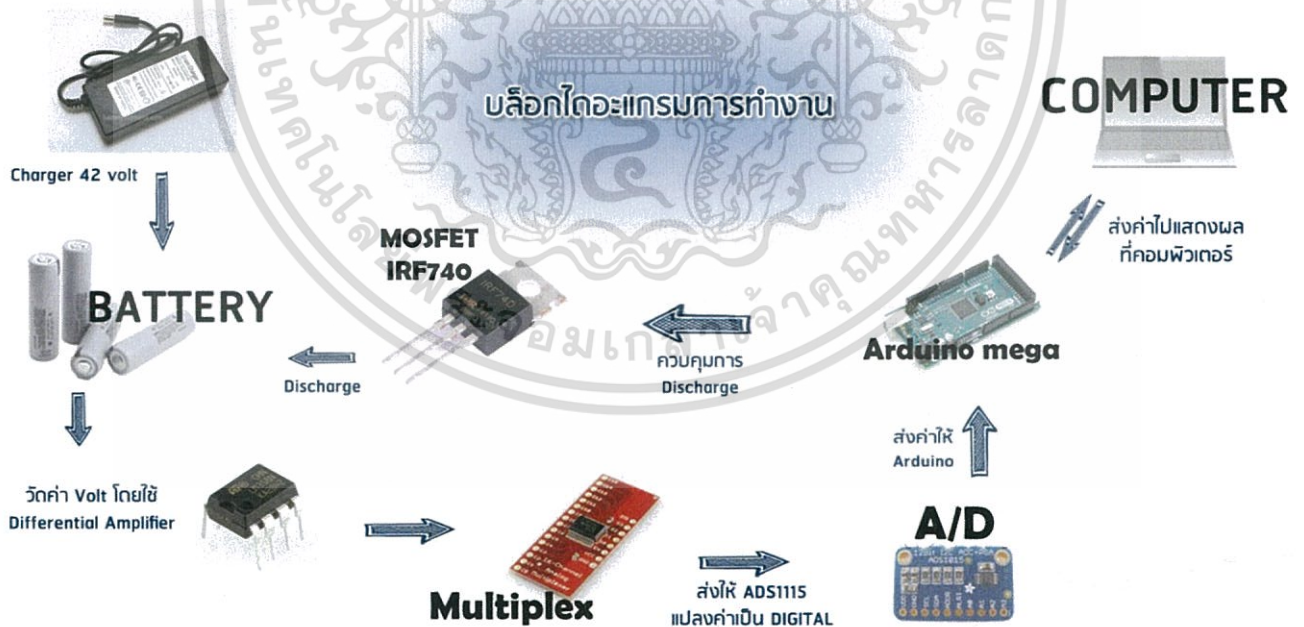
Passive balance charge ซึ่งจะให้แบตเตอรี่เซลล์ที่มีแรงดันที่น้อยที่สุดเป็นเซลล์อ้างอิง

แล้วทำการ discharge แบตเตอรี่ เซลล์อื่นๆ ให้เท่ากับค่าแรงดันเซลล์อ้างอิง

ช่วงที่ 3 ชาร์จแบตเตอรี่ทั้งแพ็ค

ช่วงที่ 4 เมื่อทำชาร์จ ได้แรงดัน 4.2 โวลต์ สั่งให้ระบบทำการตัดการชาร์จโดยอัตโนมัติ

การทำงานของวงจรนี้จะสามารถจ่ายไฟให้กับโหลดได้ โดยวงจรจะวัดโวลต์ของแบตเตอรี่แต่ละก้อนอยู่ตลอดเวลา หากจ่ายไฟจน โวลต์แบตเตอรี่ถึง 3 โวลต์ วงจรจะทำการตัดการจ่ายไฟทันที

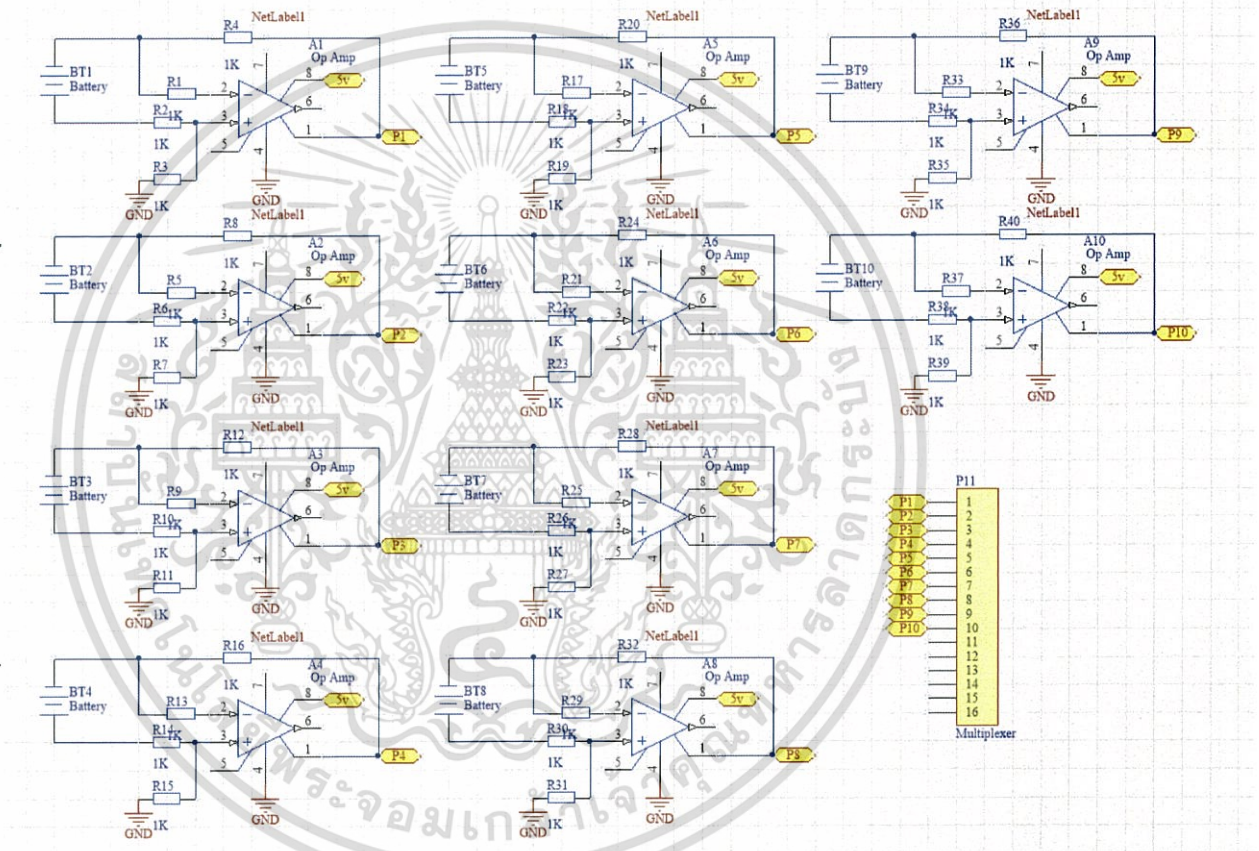


รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

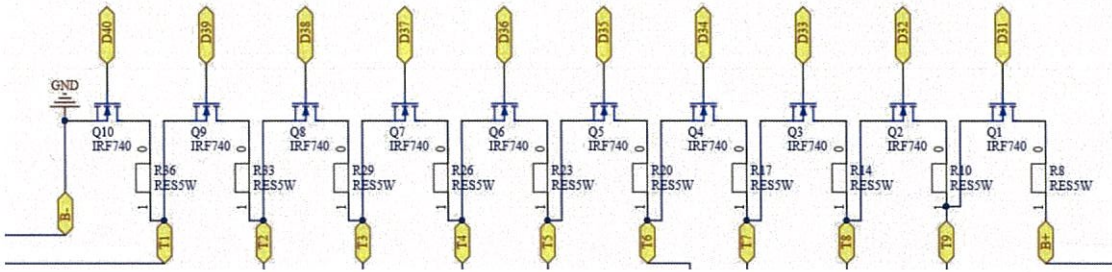
3.1.2 ออกแบบวงจร

3.1.2.1 ส่วนวงจรการวัดแรงดันแบตเตอรี่



รูปที่ 3.2 ส่วนวงจรการวัดแรงดันแบตเตอรี่

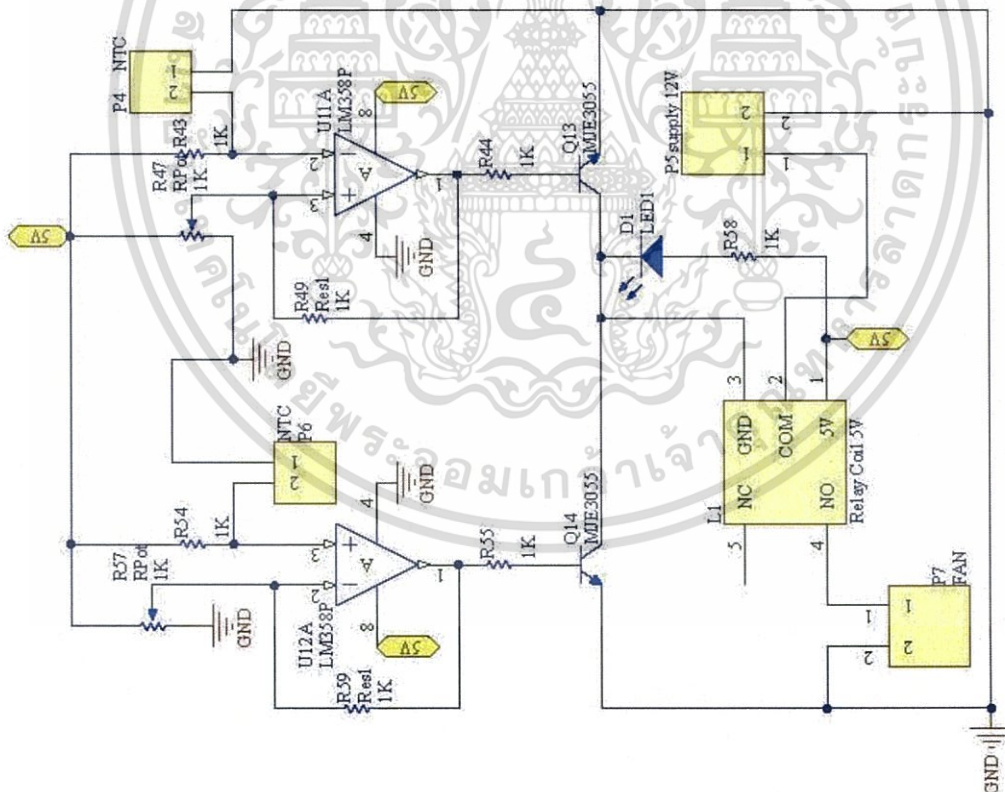
3.1.2.2 ส่วนวงจรการ charge-discharge แบตเตอรี่



รูปที่ 3.3 ส่วนวงจรการ charge-discharge แบตเตอรี่

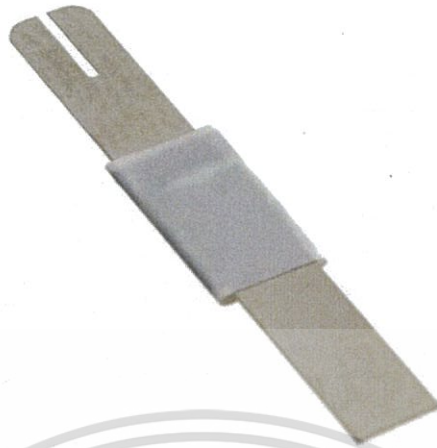
3.1.2.3 วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน

ออกแบบวงจรโดยใช้ ตัวต้านทานที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นลบ (NTC - Negative Temperature Coefficient) ให้เป็นเซนเซอร์อุณหภูมิ หากมี อุณหภูมิเกิน 70 องศาเซลเซียส จะส่ง การให้พัดลมทำงาน



รูปที่ 3.4 ส่วนวงจรการป้องกัน เรืองอุณหภูมิด้วย NTC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 PTC

ที่มา: “PTC” โดย <http://www.tme.eu.com>

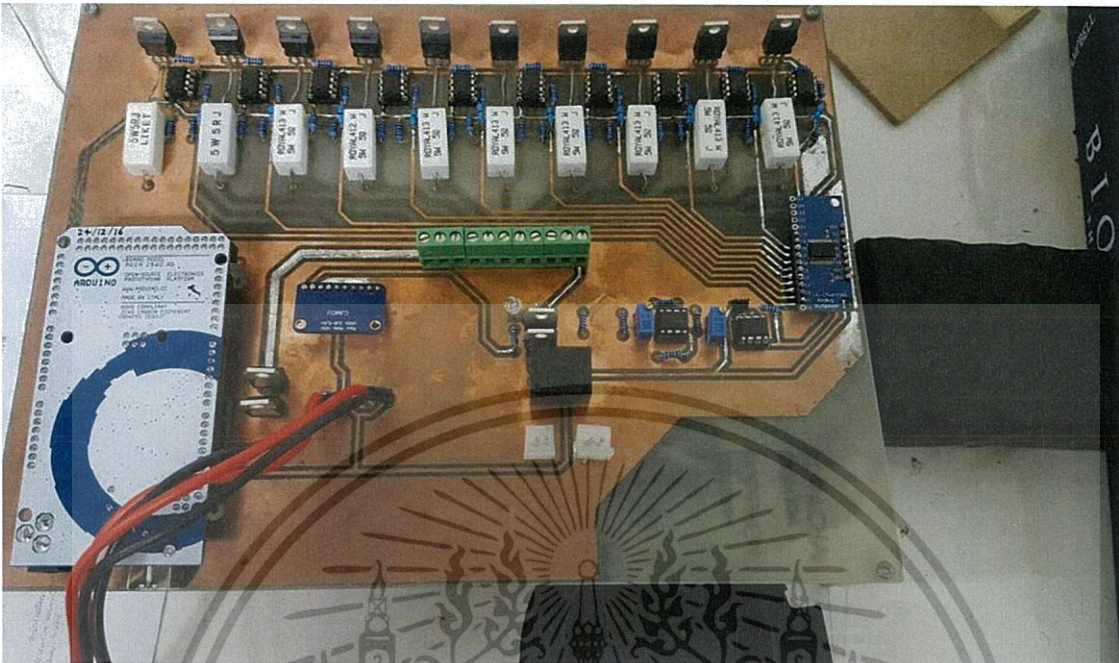
ภายในแบตเตอรี่แพ็คยังมี ตัวต้านทานที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นบวก (PTC - Positive Temperature Coefficient) ใช้เป็น ฟิวส์ (fuse) ที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ เรียกว่า โพลีสวิตช์ (polyswitch) ติดอยู่ด้านในของแบตเตอรี่แพ็ค

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าอุณหภูมิและกระแส คุณสมบัติของ PTC

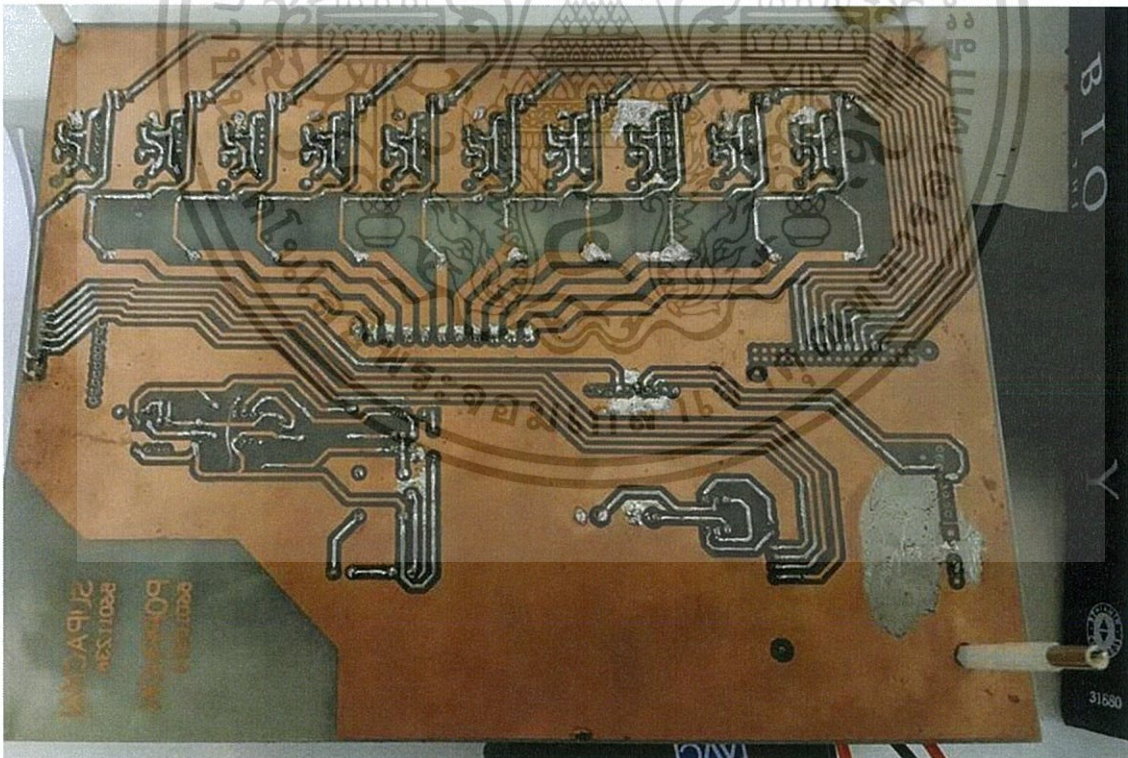
Call Battery protection	PTC Resettable Fuses	Ambient Operating Temperature		
		23°C	40°C	50°C
		4.2A	3.6A	3.3A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.4 วงจรรวม



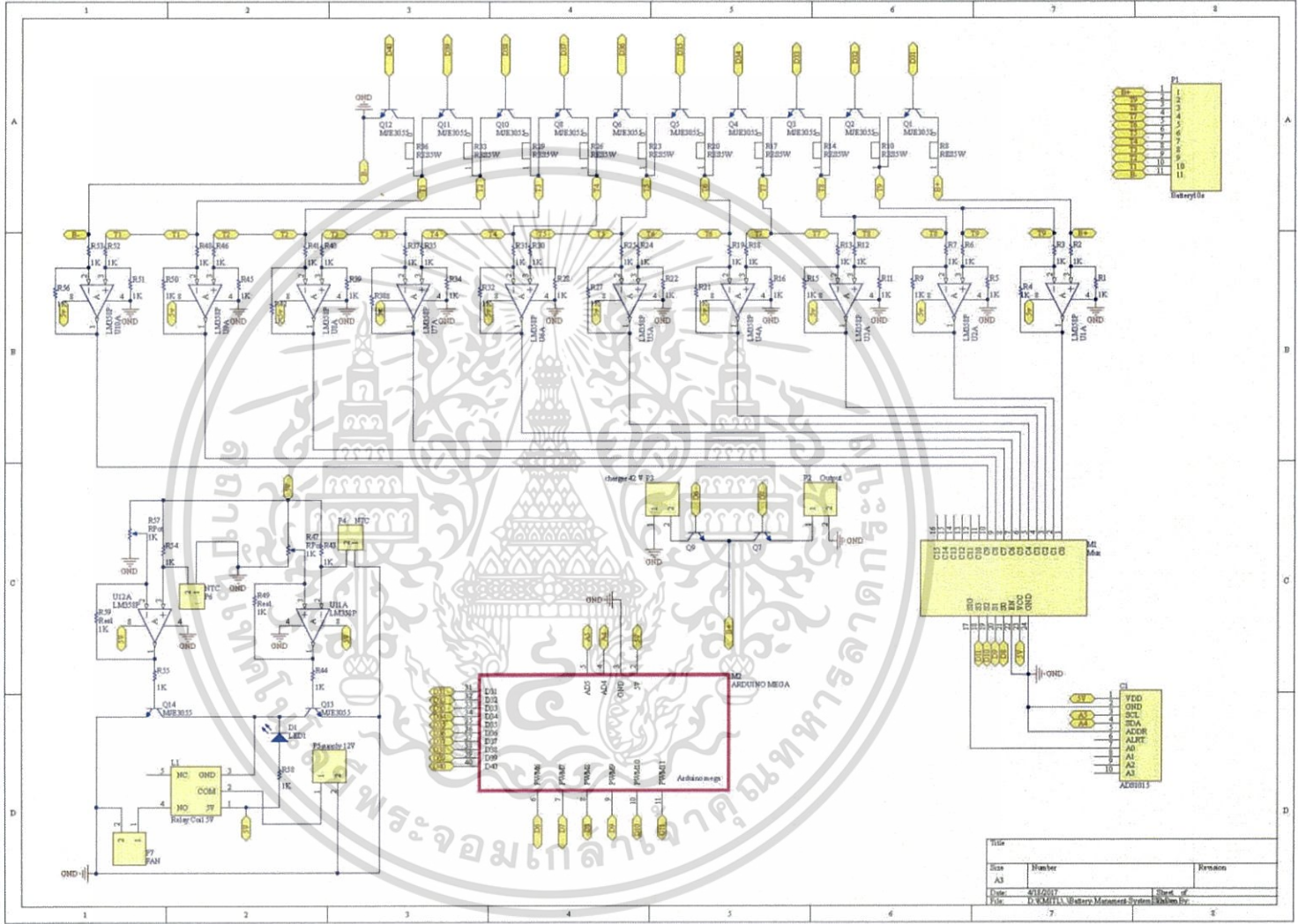
รูปที่ 3.6 วงจรรวม ด้านหน้า



รูปที่ 3.7 วงจรรวม ด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

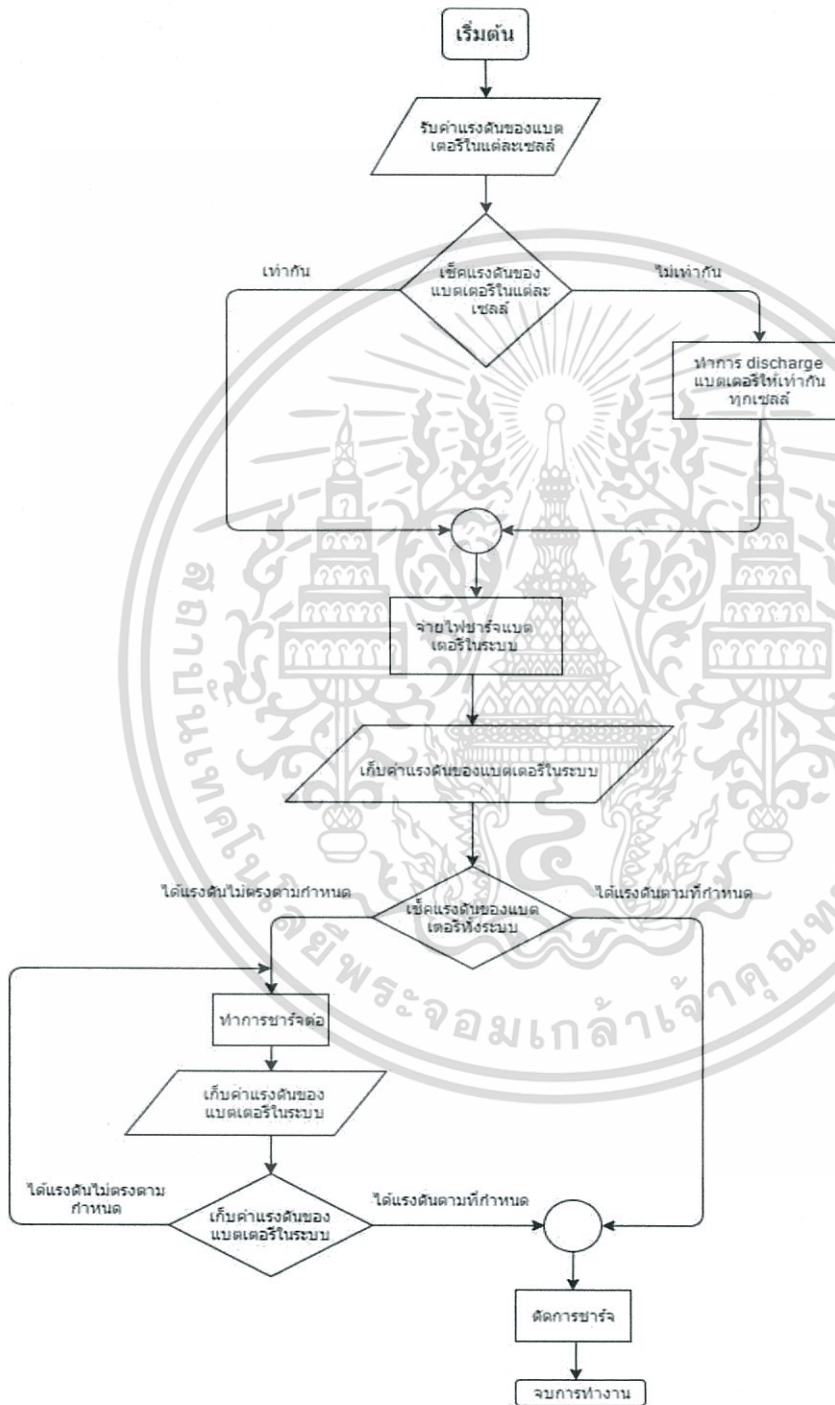
รูปที่ 3.8 schematic วรรณกรรม



3.2 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

การทำงานของระบบ มีขั้นตอนการทำงานดังนี้ เริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมโดยทำการตรวจสอบ เพื่ออนุญาตให้ผู้ใช้งานระบบเข้าสู่ระบบได้

3.2.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรมหลัก



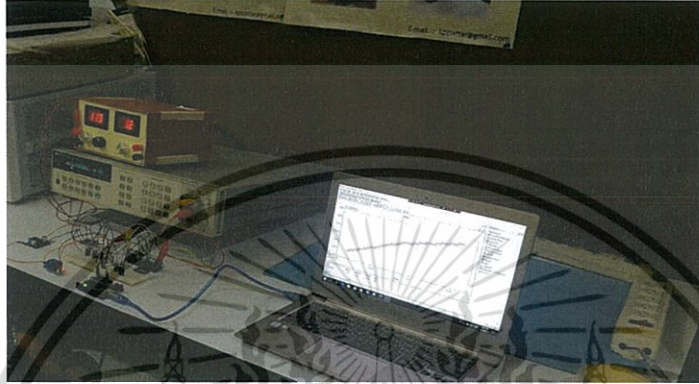
รูปที่ 3.9 แผนผังการทำงานของโปรแกรมหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

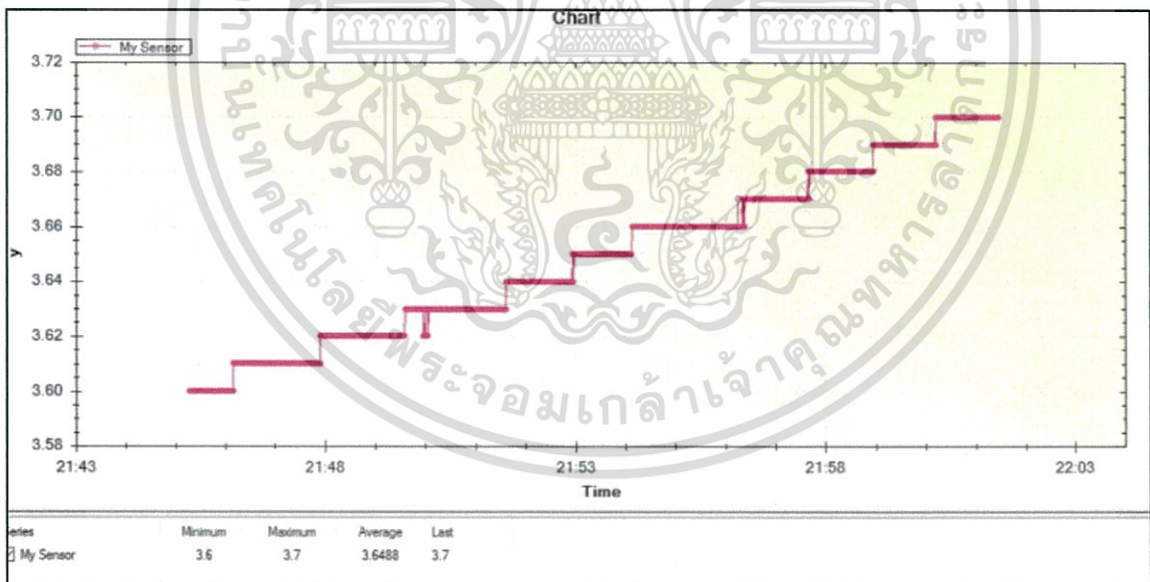
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การทดลองที่ 1 จ่ายไฟให้กับแบตเตอรี่ 1 ก้อน

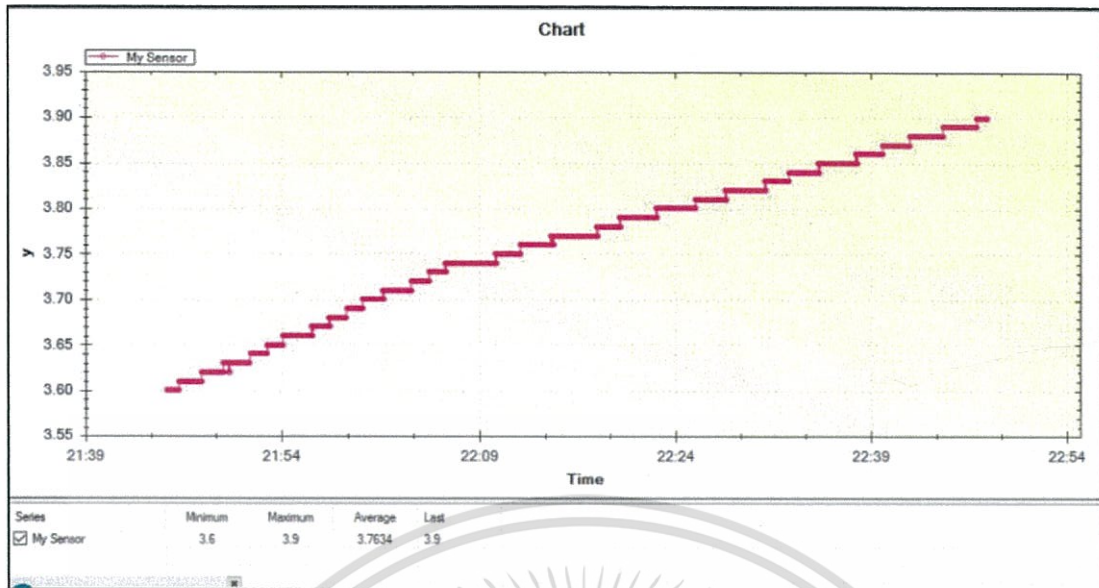


รูปที่ 4.1 รูปทดลองจ่ายไฟ และสังเกตผล

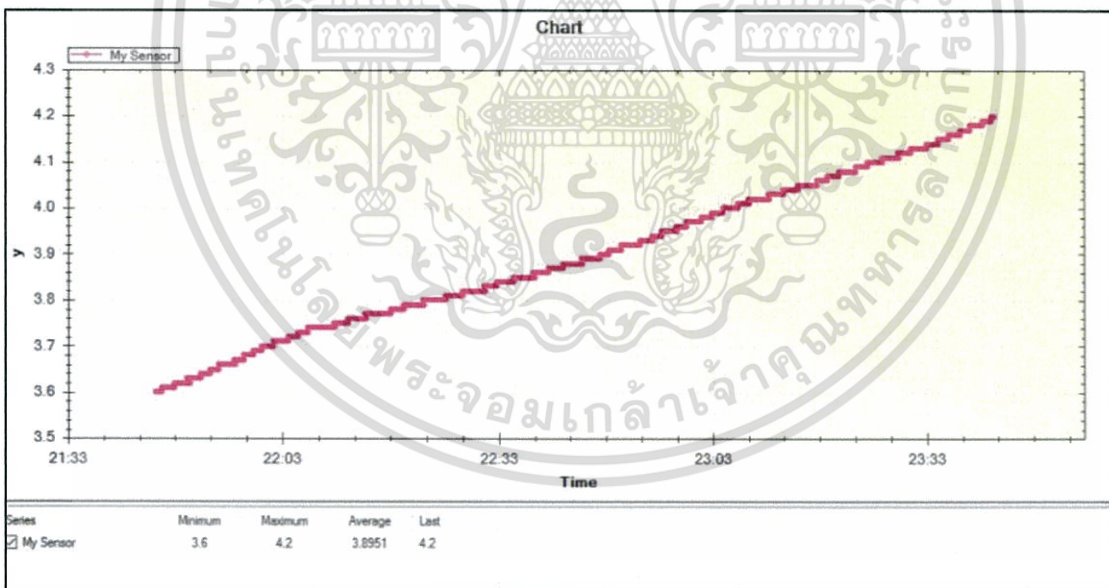


รูปที่ 4.2 รูปกราฟการชาร์ตแบตเตอรี่ ที่แรงดันแบตเตอรี่ 3.6 – 3.7 volt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 รูปกราฟการชาร์ตแบตเตอรี่ ที่แรงดันแบตเตอรี่ 3.6 – 3.9 volt

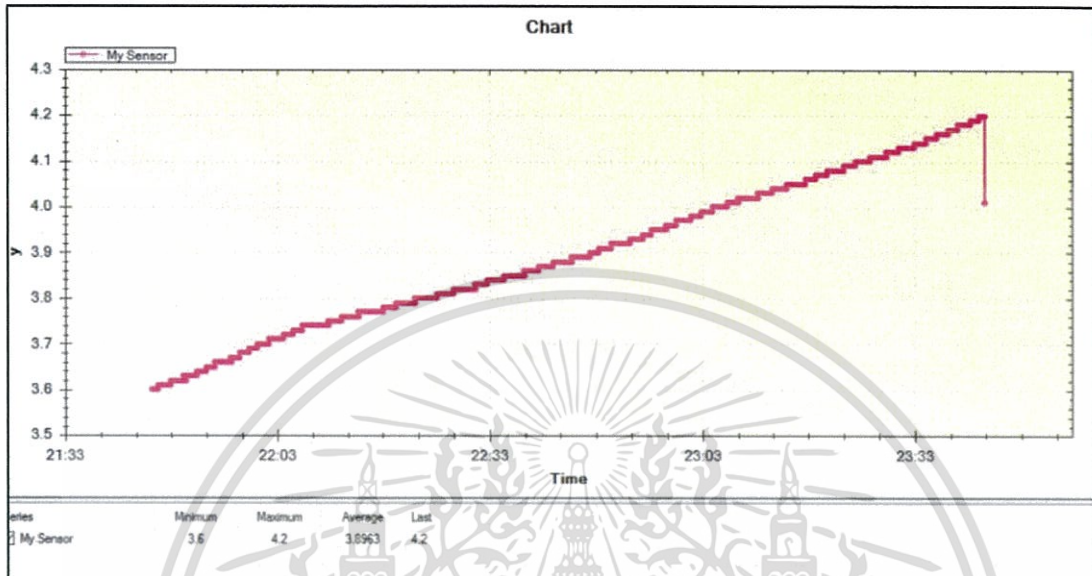


รูปที่ 4.4 รูปกราฟการชาร์ตแบตเตอรี่ ที่แรงดันแบตเตอรี่ 3.6 – 4.2 volt

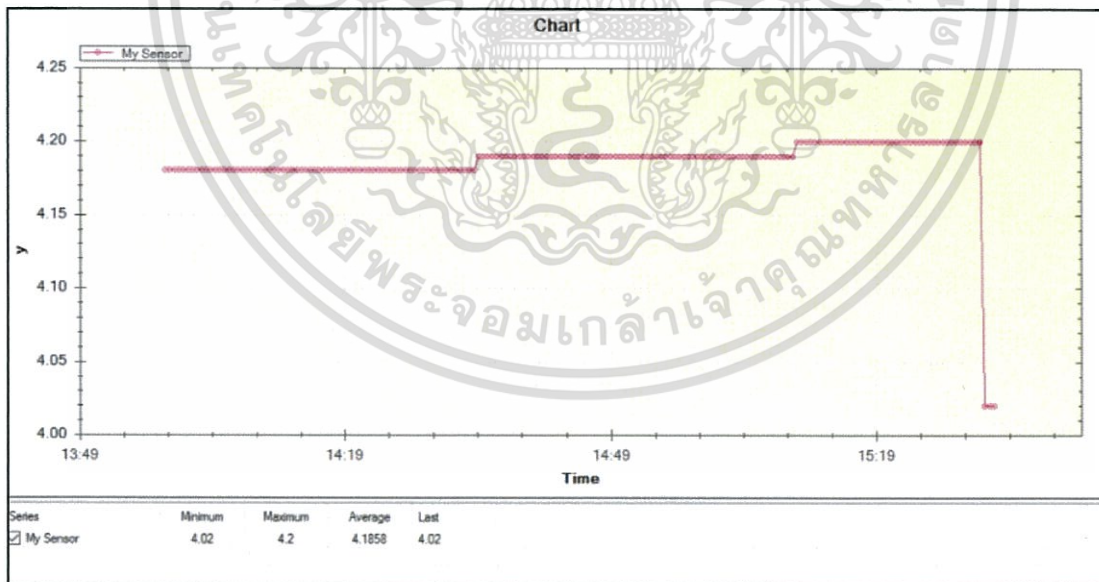
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองที่ 2 หยุดการจ่ายไฟ

เมื่อจ่ายไฟเพื่อชาร์จแบตเตอรี่จนถึงจุดที่เรียกว่า แรงดันขีดความสามารถ ในที่นี้เขียนโปรแกรมให้หยุดชาร์จที่ 4.20 Volt



รูปที่ 4.5 รูปกราฟการหยุดชาร์จแบตเตอรี่ ที่แรงดันแบตเตอรี่ 4.2 volt



รูปที่ 4.6 รูปกราฟการหยุดชาร์จแบตเตอรี่ ที่แรงดันแบตเตอรี่ 4.2 volt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการหยุดการชาร์จ

ครั้งที่	สิ่งที่ทดสอบ	หยุดการจ่ายไฟ
1		/
2		/
3		/
4		/
5		/
6		/

4.3 การทดลองที่ 3 วัดค่าแบตเตอรี่ผ่านวงจร

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันแบตเตอรี่แต่ละก้อน

แบตเตอรี่	ค่าแรงดัน	
	แต่ละเซลล์	แรงดันสะสม
1	3.53	3.53
2	3.32	6.85
3	3.27	10.12
4	3.28	13.4
5	3.3	16.7
6	3.3	20
7	3.5	23.5
8	3.5	27
9	3.58	30.58
10	3.67	34.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดลองที่ 4 วัดค่าแรงดัน ที่ Output ของ op-amp

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันแบตเตอรี่แต่ละก้อน

แบตเตอรี่ก้อนที่	ค่าแรงดัน
1	3.51
2	1.15
3	1.17
4	1.20
5	1.21
6	1.23
7	1.24
8	1.245
9	1.25
10	1.262

4.5 การทดลองที่ 5 วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน (over temperature)

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการทำงานของวงจรป้องกันอุณหภูมิ

ครั้งที่	สิ่งที่ทดลอง	พัดลมเปิดที่อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1		70
2		70
3		70
4		70
5		70
6		70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบระบบการจัดการชาร์จและดิสชาร์จของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นการจำลองการทำงานของระบบการชาร์จของแบตเตอรี่ ทำการควบคุมการจ่ายไฟให้กับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ต่ออนุกรมกันจำนวน 10 ก้อน โดยการแบ่งการทำงานออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

1. ส่วนของการตรวจเช็คแรงดันของแบตเตอรี่ ต้องเชคอยู่ตลอดเวลาเนื่องจาก แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน มีข้อห้ามที่สำคัญ อยู่ 3 อย่างคือ over volt , over current, over temperature ซึ่งหากมีการผิดพลาดอาจทำให้เกิดการระเบิดได้

2. ส่วนของการบาลานซ์แรงดันของแบตเตอรี่ในระบบ ผู้จัดทำใช้หลักการ passive balance ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัด ปลอดภัย และการบาลานซ์เพื่อให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพสูงสุด

3. ส่วนของการควบคุมการจ่ายไฟเพื่อทำการชาร์จไฟให้กับแบตเตอรี่ในระบบ การชาร์จต้องทำนิกถึงค่าแรงดันที่ต้อง เท่ากันระหว่าง แบตเตอรี่ กับ ไฟที่นำมาจ่ายให้ จึงจะอยู่ในสภาวะปกติ หากสูงกว่า อาจจะเป็นการฟาสชาร์จ แต่มีอันตรายสูงมาก และห้ามชาร์จจนแรงดันเกิน 4.2 โวลต์ หรือต่ำกว่า 3.0 โวลต์

4. ส่วนของการควบคุมอุณหภูมิของระบบ จำเป็นเพราะเรื่องการ over temperature เป็นเหตุของอันตราย

ในส่วนการดิสชาร์จผู้จัดทำใช้ โมสเฟต IRF740 ทำงานเป็นสวิทซ์ให้วงจรดิสชาร์จทำงาน เนื่องจากไฟที่เข้า ขา เกต เท่ากับ 5 โวลต์ ที่มาจากเอาต์พุต ทำให้โมสเฟตไม่ทำงานและสามารถทำงานได้เพียงเซลล์แรกที่มีค่าโวลต์เพียง 3.53 โวลต์

สำหรับวงจรป้องกันอุณหภูมิเกินสามารถใช้งานได้ พัฒมทำงานเมื่ออุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

5.2 อุปสรรคและปัญหา

5.2.1 การออกแบบวงจรมีข้อผิดพลาด ตอนออกแบบควรคำนึงถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์ให้ดี

5.2.2 เขียนโปรแกรม Arduino อาจจะไม่ดีเท่าที่ควร

5.2.3 ในวงจรมีความซับซ้อนมาก จึงต้องทำ PCB 2 layer และทำโดยการกัดปรินเอง

จึงมีความยากให้ การบัดกรี และลากลายวงจร

5.2.4 การคายประจุหรือการดิสชาร์จต้องใช้เวลาานาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ข้อเสนอแนะ

ควรคิดและคำนวณให้ดีก่อนการออกแบบและลงมือสร้างจริง รวมทั้งเพิ่มระมัดระวังในการต่อวงจร เพื่อให้ไม่ให้เกิดภัยพิบัติและค่าใช้จ่าย

ควรศึกษาให้มีการชาร์จให้มากกว่านี้ เพื่อให้สามารถใช้เวลาในการชาร์จน้อยกว่านี้ และเนื่องจากผู้จัดทำโครงการนี้ไม่มีความถนัดในการเขียนโปรแกรมมากนัก จึงทำให้โค้ดโปรแกรมที่ได้ยังไม่เสถียร จึงต้องฝึกฝนเพื่อพัฒนาต่อไป

โดยส่วนการดิสชาร์จ ปัจจุบันผู้จัดทำได้ใช้ มอสเฟต IRF740 ทำงานเป็นสวิตซ์ให้วงจรดิสชาร์จทำงาน เนื่องจากไฟที่เข้า ขา เกต เท่ากับ 5 โวลต์ ที่มาจากอากาศโน้ ทำให้มอสเฟตไม่ทำงานและสามารถทำงานได้เพียง เซลล์แรกที่มีค่าโวลต์เพียง 3.53 โวลต์ ผู้จัดทำแนะนำให้วงจรเพิ่มให้ขานั้นมีแรงดัน 42 โวลต์ หรือ อีกวิธีหนึ่งคือเปลี่ยนมอสเฟตเป็น opto

วงจรปัจจุบันใช้กราวด์รวมกันทั้งวงจรซึ่งข้อสันนิษฐานตอนนี้คิดว่าควรแยก กราวด์เป็น 2 ผัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Arduino Team.2559. **ArduinoBoardUno**. แหล่งที่มา : <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. 2 ตุลาคม 2559.
- [2] Henry's Bench.2559. **Arduino 18650 Battery Charger: Project 1**. แหล่งที่มา : <http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-projects-tips-and-more/arduino-18650-battery-charger-project-1/>. 3 ตุลาคม 2559.
- [3] Henry's Bench.2559. **Arduino ADS1115 Module Getting Started Tutorial**. แหล่งที่มา : <http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-voltage-measurements/arduino-ads1115-module-getting-started-tutorial/>. 4 ตุลาคม 2559.
- [4] Henry's Bench.2559. **Arduino LM358 Op Amp PWM to Voltage Converter**. แหล่งที่มา : <http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-projects-Tips-and-more/arduino-lm358-op-amp-pwm-to-voltage-converter/>. 4 ตุลาคม 2559.
- [5] Henry's Bench.2559. **Arduino ADS1115 Differential Voltmeter Tutorial**. แหล่งที่มา : <http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-voltage-Measurements/arduino-ads1115-differential-voltmeter-tutorial/>. 4 ตุลาคม 2559.
- [6] Henry's Bench.2559. **LM2576HV DC-DC Buck Step-down Module LM2576HV High voltage Step down module**. แหล่งที่มา : <https://www.arduinoall.com/product/562/lm2576hv-dc-dc-buck-step-down-module-lm2576hv-high-voltage-step-down-module-2>. 4 ตุลาคม 2559.
- [7] รูปภาพบอร์ด Arduino จาก <http://forefront.io/attachments/uno.jpg> . 4 ตุลาคม 2559.
- [8] Futurlec.2556. **Relay 5v 5 pin**. แหล่งที่มา: <http://www.futurlec.com/Relays/JQC-3FF-05.shtml> 4 มีนาคม 2560.

- [9] Evandmore.2556. NCR18650 Li-ion. แหล่งที่มา:
<http://blog.evandmore.com/lets-talk-about-the-panasonic-ncr18650b/>.
 4 มีนาคม 2560.
- [10] Arduino.2559. Arduino Mega R3 2560. แหล่งที่มา: <https://www.arduinoall.com/p/507>. 4
 มีนาคม 2560.
- [13] Thai embedded.2556. เรียนรู้ ADC Architecture แบบต่างๆ. แหล่งที่มา:
<http://www.thaiembedded.com/blog/?tag=delta-sigma-adc> 4 มีนาคม 2560.
- [14] Psptech.2557. Transistor. แหล่งที่มา: <http://www.psptech.co.th/>
 4 มีนาคม 2560.
- [15] Prakaiporn kik.2558. Multiplexer. แหล่งที่มา: <http://kikmultiplex.blogspot.com/>
 4 มีนาคม 2560.
- [16] Iq-technician.2555. Thermal resistor. แหล่งที่มา:
<http://iq-technician.blogspot.com/2012/03/thermister.html>. 5 มีนาคม 2560.
- [17] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์.2555. ฮิสเทอรีซิส (hysteresis). แหล่งที่มา :
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/4297/hysteresis>. 5 มีนาคม 2560.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY

V_{DS} (V)	400	
$R_{DS(on)}$ (Ω)	$V_{GS} = 10\text{ V}$	0.55
Q_g (Max.) (nC)	63	
Q_{gs} (nC)	9.0	
Q_{gd} (nC)	32	
Configuration	Single	

FEATURES

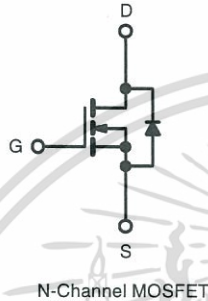
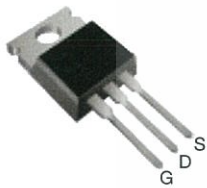
- Dynamic dV/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC


RoHS*
COMPLIANT

DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220AB package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220AB contribute to its wide acceptance throughout the industry.

TO-220AB


ORDERING INFORMATION

Package	TO-220AB
Lead (Pb)-free	IRF740PbF SiHF740-E3
SnPb	IRF740 SiHF740

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)

PARAMETER	SYMBOL	LIMIT	UNIT	
Drain-Source Voltage	V_{DS}	400	V	
Gate-Source Voltage	V_{GS}	± 20		
Continuous Drain Current	V_{GS} at 10 V	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	10	A
		$T_C = 100\text{ }^\circ\text{C}$	6.3	
Pulsed Drain Current ^a	I_{DM}	40		
Linear Derating Factor		1.0	W/ $^\circ\text{C}$	
Single Pulse Avalanche Energy ^b	E_{AS}	520	mJ	
Repetitive Avalanche Current ^a	I_{AR}	10	A	
Repetitive Avalanche Energy ^a	E_{AR}	13	mJ	
Maximum Power Dissipation	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	P_D	125	W
Peak Diode Recovery dV/dt ^c	dV/dt	4.0	V/ns	
Operating Junction and Storage Temperature Range	T_J, T_{stg}	- 55 to + 150	$^\circ\text{C}$	
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s	300 ^d		
Mounting Torque	6-32 or M3 screw		10	lbf · in
			1.1	N · m

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- $V_{DD} = 50\text{ V}$, starting $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $L = 9.1\text{ mH}$, $R_g = 25\text{ }\Omega$, $I_{AS} = 10\text{ A}$ (see fig. 12).
- $I_{SD} \leq 10\text{ A}$, $dI/dt \leq 120\text{ A}/\mu\text{s}$, $V_{DD} \leq V_{DS}$, $T_J \leq 150\text{ }^\circ\text{C}$.
- 1.6 mm from case.

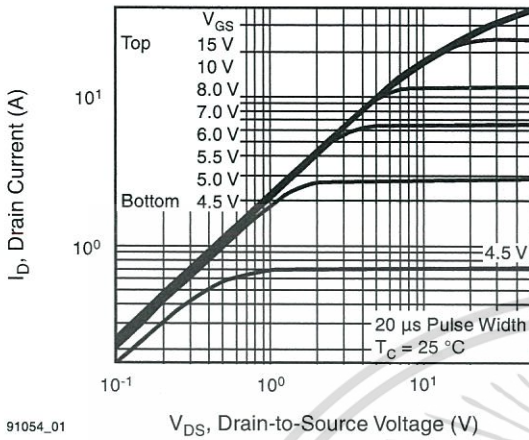
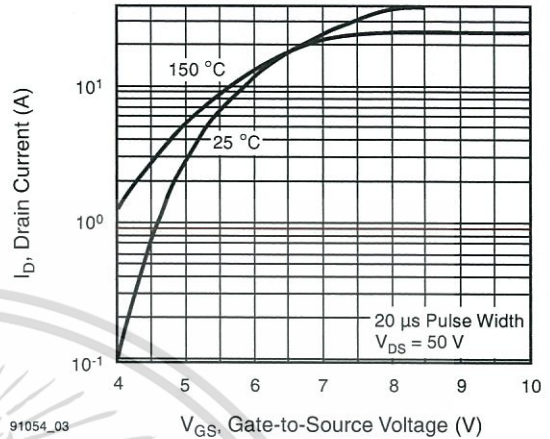
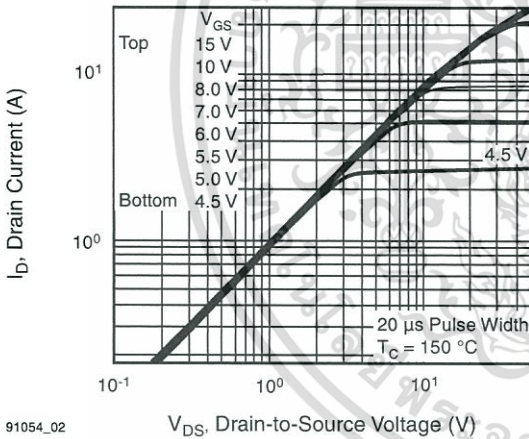
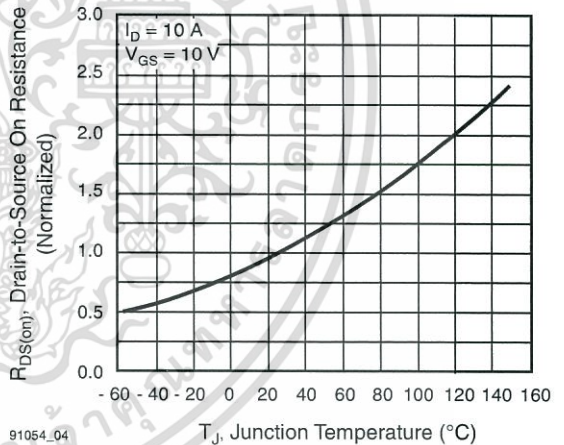
* Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

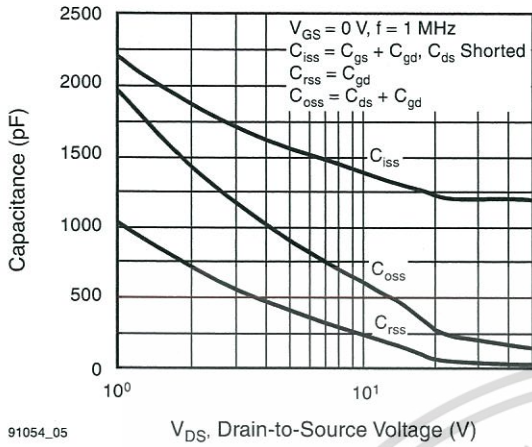
THERMAL RESISTANCE RATINGS						
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT		
Maximum Junction-to-Ambient	R_{thJA}	-	62	°C/W		
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	R_{thCS}	0.50	-			
Maximum Junction-to-Case (Drain)	R_{thJC}	-	1.0			

SPECIFICATIONS ($T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Static						
Drain-Source Breakdown Voltage	V_{DS}	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	400	-	-	V
V_{DS} Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to $25\text{ }^\circ\text{C}, I_D = 1\text{ mA}$	-	0.49	-	V/°C
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}$	-	-	± 100	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = 400\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	25	μA
		$V_{DS} = 320\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}, T_J = 125\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	250	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 6.0\text{ A}^b$	-	-	0.55	Ω
Forward Transconductance	g_{fs}	$V_{DS} = 50\text{ V}, I_D = 6.0\text{ A}^b$	5.8	-	-	S
Dynamic						
Input Capacitance	C_{iss}	$V_{GS} = 0\text{ V},$	-	1400	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}	$V_{DS} = 25\text{ V},$	-	330	-	
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}	$f = 1.0\text{ MHz},$ see fig. 5	-	120	-	
Total Gate Charge	Q_g	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 10\text{ A}, V_{DS} = 320\text{ V},$ see fig. 6 and 13 ^b	-	-	63	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}		-	-	9.0	
Gate-Drain Charge	Q_{gd}		-	-	32	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = 200\text{ V}, I_D = 10\text{ A}$ $R_g = 9.1\text{ }\Omega, R_D = 20\text{ }\Omega,$ see fig. 10 ^b	-	14	-	ns
Rise Time	t_r		-	27	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	50	-	
Fall Time	t_f		-	24	-	
Internal Drain Inductance	L_D	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact	-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	L_S		-	7.5	-	
Drain-Source Body Diode Characteristics						
Continuous Source-Drain Diode Current	I_S	MOSFET symbol showing the integral reverse p - n junction diode	-	-	10	A
Pulsed Diode Forward Current ^a	I_{SM}		-	-	40	
Body Diode Voltage	V_{SD}	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}, I_S = 10\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}^b$	-	-	2.0	V
Body Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}, I_F = 10\text{ A}, di/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}^b$	-	370	790	ns
Body Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}		-	3.8	8.2	μC
Forward Turn-On Time	t_{on}	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S and L_D)				

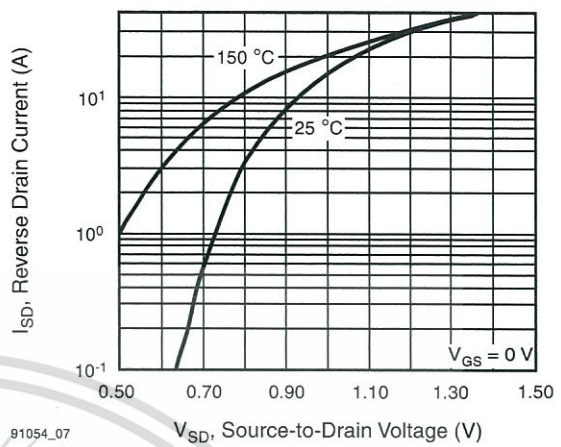
Notes

- a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- b. Pulse width $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.

TYPICAL CHARACTERISTICS (25 °C, unless otherwise noted)

Fig. 1 - Typical Output Characteristics, $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics

Fig. 2 - Typical Output Characteristics, $T_C = 150\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 4 - Normalized On-Resistance vs. Temperature



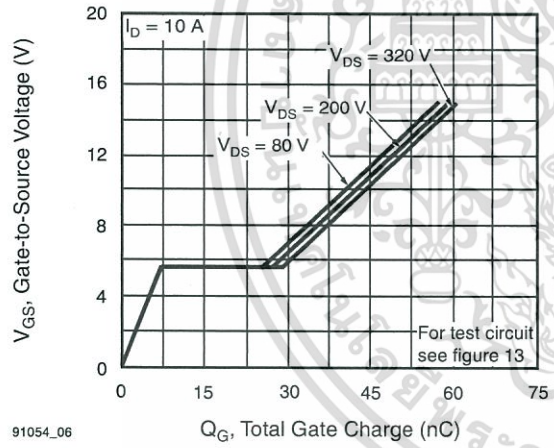
91054_05



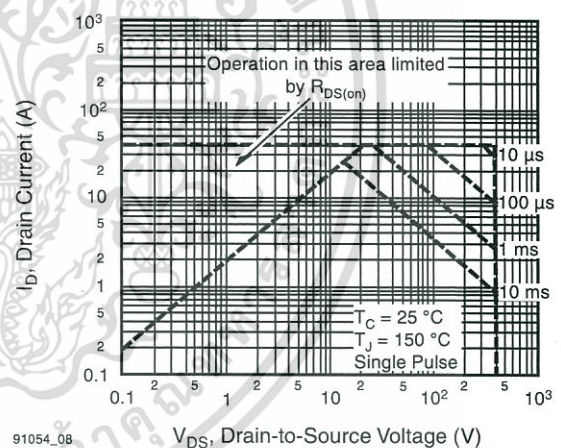
91054_07

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

Fig. 7 - Typical Source-Drain Diode Forward Voltage



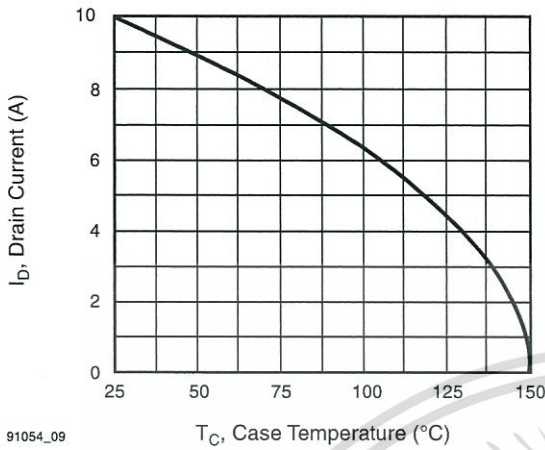
91054_06



91054_08

Fig. 6 - Typical Gate Charge vs. Drain-to-Source Voltage

Fig. 8 - Maximum Safe Operating Area



91054_09

Fig. 9 - Maximum Drain Current vs. Case Temperature

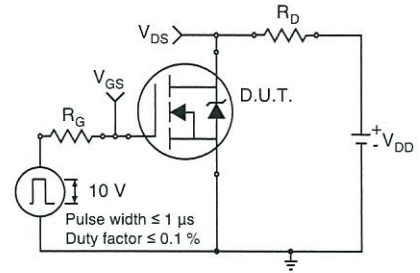


Fig. 10a - Switching Time Test Circuit

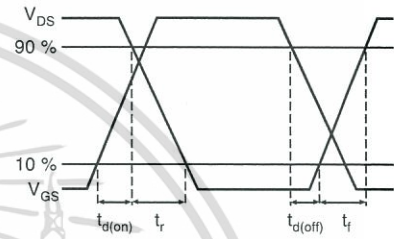
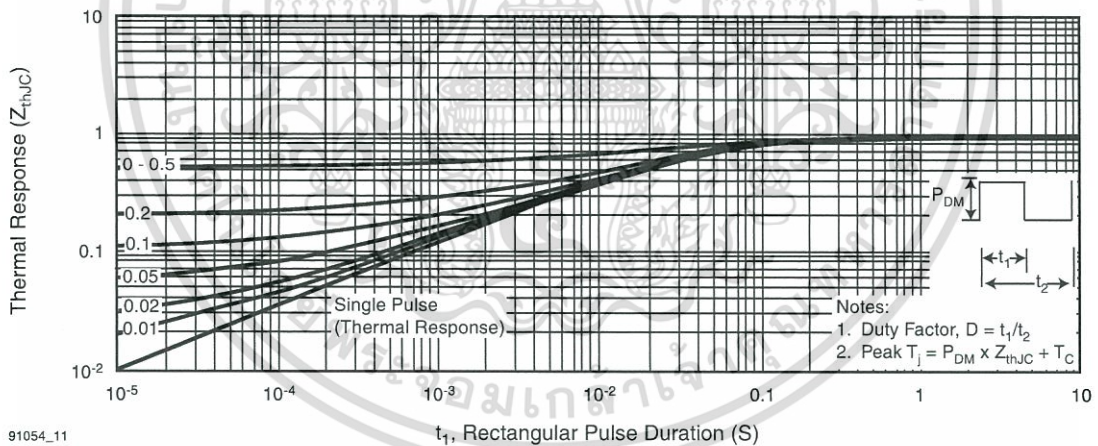


Fig. 10b - Switching Time Waveforms



91054_11

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

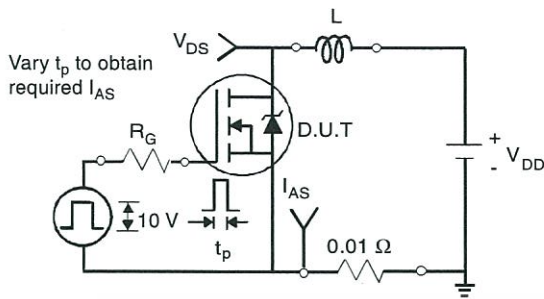


Fig. 12a - Unclamped Inductive Test Circuit

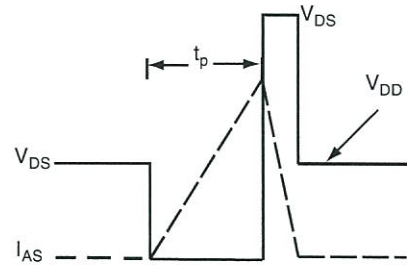


Fig. 12b - Unclamped Inductive Waveforms

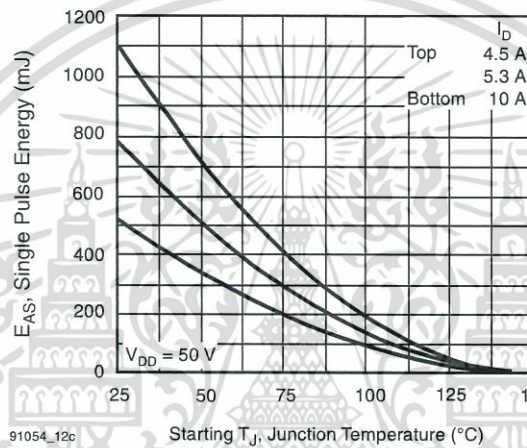


Fig. 12c - Maximum Avalanche Energy vs. Drain Current

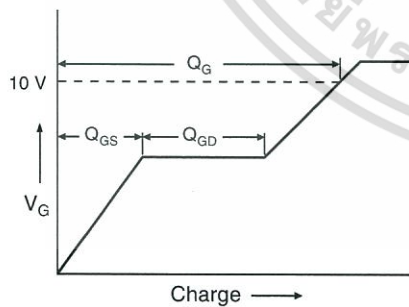


Fig. 13a - Basic Gate Charge Waveform

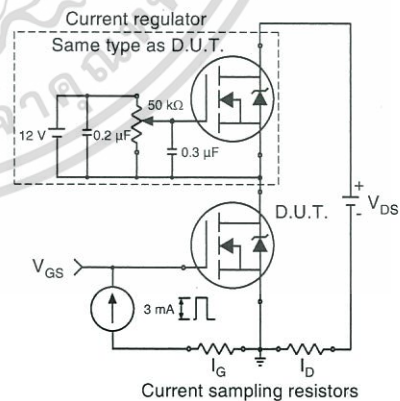
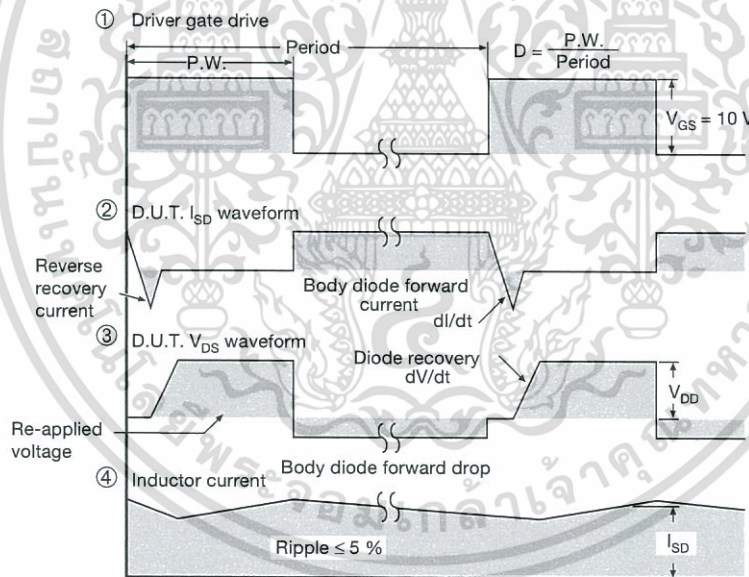
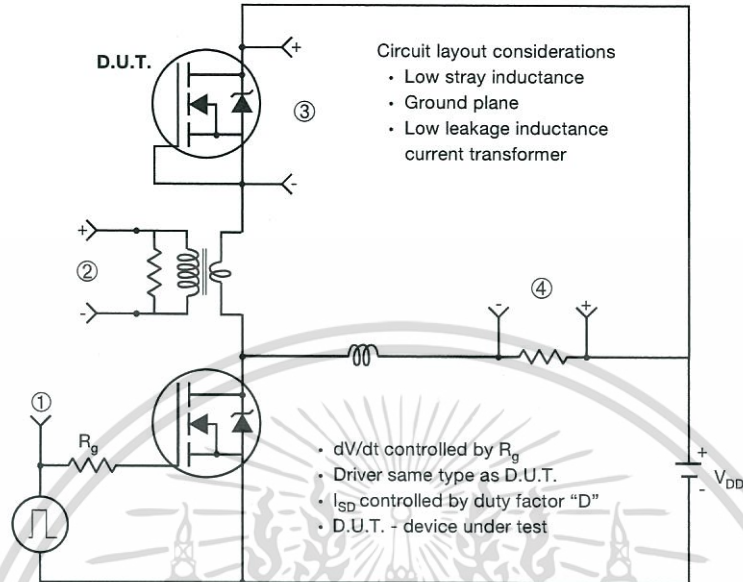


Fig. 13b - Gate Charge Test Circuit

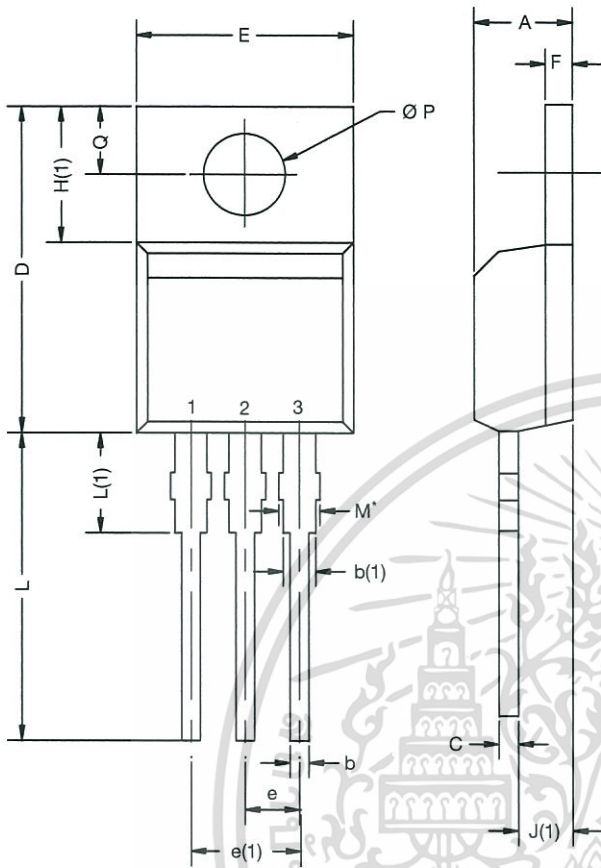
Peak Diode Recovery dV/dt Test Circuit

Note

 a. $V_{GS} = 5 V$ for logic level devices

Fig. 14 - For N-Channel

Vishay Siliconix maintains worldwide manufacturing capability. Products may be manufactured at one of several qualified locations. Reliability data for Silicon Technology and Package Reliability represent a composite of all qualified locations. For related documents such as package/tape drawings, part marking, and reliability data, see www.vishay.com/ppg?91054.

TO-220-1



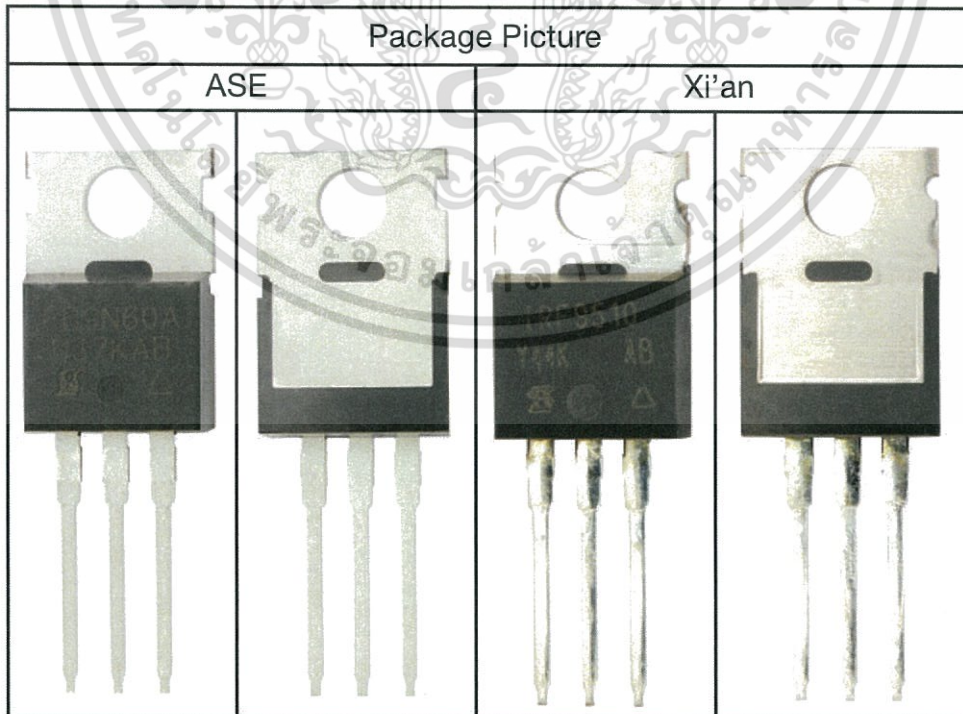
DIM.	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
A	4.24	4.65	0.167	0.183
b	0.69	1.02	0.027	0.040
b(1)	1.14	1.78	0.045	0.070
c	0.36	0.61	0.014	0.024
D	14.33	15.85	0.564	0.624
E	9.96	10.52	0.392	0.414
e	2.41	2.67	0.095	0.105
e(1)	4.88	5.28	0.192	0.208
F	1.14	1.40	0.045	0.055
H(1)	6.10	6.71	0.240	0.264
J(1)	2.41	2.92	0.095	0.115
L	13.36	14.40	0.526	0.567
L(1)	3.33	4.04	0.131	0.159
Ø P	3.53	3.94	0.139	0.155
Q	2.54	3.00	0.100	0.118

ECN: X15-0364-Rev. C, 14-Dec-15
DWG: 6031

Note

- M* = 0.052 inches to 0.064 inches (dimension including protrusion), heatsink hole for HVM

Package Picture



Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and / or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

Table of Contents

1	Features	1		7.3 Feature Description	12
2	Applications	1		7.4 Device Functional Modes	13
3	Description	1	8	Application and Implementation	14
4	Revision History	2		8.1 Application Information	14
5	Pin Configuration and Functions	3		8.2 Typical Applications	14
6	Specifications	4	9	Power Supply Recommendations	24
	6.1 Absolute Maximum Ratings	4	10	Layout	24
	6.2 ESD Ratings	4		10.1 Layout Guidelines	24
	6.3 Recommended Operating Conditions	5		10.2 Layout Example	24
	6.4 Thermal Information	5	11	Device and Documentation Support	25
	6.5 Electrical Characteristics: LM158A, LM358A, LM158, LM258	5		11.1 Related Links	25
	6.6 Electrical Characteristics: LM358, LM2904	7		11.2 Trademarks	25
	6.7 Typical Characteristics	9		11.3 Electrostatic Discharge Caution	25
7	Detailed Description	12	12	Mechanical, Packaging, and Orderable Information	25
	7.1 Overview	12			
	7.2 Functional Block Diagram	12			

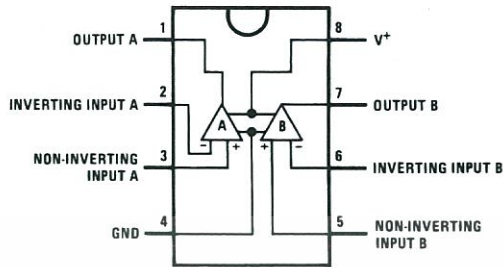
4 Revision History

NOTE: Page numbers for previous revisions may differ from page numbers in the current version.

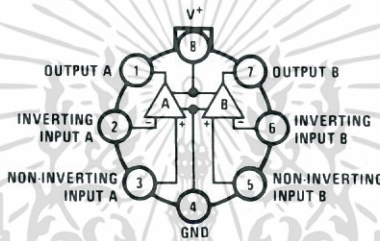
Changes from Revision H (March 2013) to Revision I	Page
<ul style="list-style-type: none"> • Added <i>Pin Configuration and Functions</i> section, <i>ESD Ratings</i> table, <i>Feature Description</i> section, <i>Device Functional Modes</i>, <i>Application and Implementation</i> section, <i>Power Supply Recommendations</i> section, <i>Layout</i> section, <i>Device and Documentation Support</i> section, and <i>Mechanical, Packaging, and Orderable Information</i> section 	1
Changes from Revision G (March 2013) to Revision H	Page
<ul style="list-style-type: none"> • Changed layout of National Data Sheet to TI format 	25

5 Pin Configuration and Functions

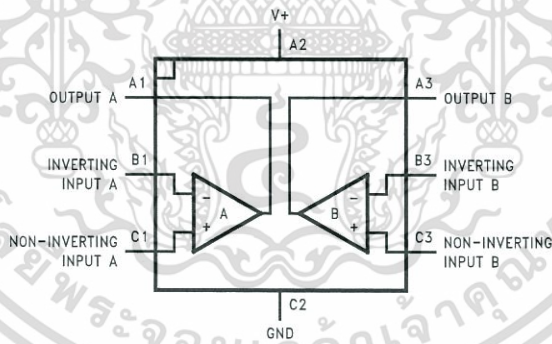
**D, P, and NAB Package
8-Pin SOIC, PDIP, and CDIP
Top View**



**LMC Package
8-Pin TO-99
Top View**



**YPB Package
8-Pin DSBGA
Top View**



Pin Functions

PIN			TYPE	DESCRIPTION
D/P/LMC NO.	DSBGA NO.	NAME		
1	A1	OUTA	O	Output, Channel A
2	B1	-INA	I	Inverting Input, Channel A
3	C1	+INA	I	Non-Inverting Input, Channel A
4	C2	GND / V-	P	Ground for Single supply configurations. negative supply for dual supply configurations
5	C3	+INB	I	Output, Channel B
6	B3	-INB	I	Inverting Input, Channel B
7	A3	OUTB	O	Non-Inverting Input, Channel B
8	A2	V+	P	Positive Supply

6 Specifications

6.1 Absolute Maximum Ratings

 See ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾.

		LM158, LM258, LM358, LM158A, LM258A, LM358A		LM2904		UNIT	
		MIN	MAX	MIN	MAX		
Supply Voltage, V^+		32		26		V	
Differential Input Voltage		32		26		V	
Input Voltage		-0.3	32	-0.3	26	V	
Power Dissipation ⁽⁴⁾	PDIP (P)	830		830		mW	
	TO-99 (LMC)	550				mW	
	SOIC (D)	530		530		mW	
	DSBGA (YPB)	435				mW	
Output Short-Circuit to GND (One Amplifier) ⁽⁵⁾	$V^+ \leq 15\text{ V}$ and $T_A = 25^\circ\text{C}$		Continuous		Continuou s		
Input Current ($V_{IN} < -0.3\text{V}$) ⁽⁶⁾		50		50		mA	
Temperature		-55	125			$^\circ\text{C}$	
	PDIP Package (P): Soldering (10 seconds)	260		260		$^\circ\text{C}$	
	SOIC Package (D)	Vapor Phase (60 seconds)	215		215		$^\circ\text{C}$
		Infrared (15 seconds)	220		220		$^\circ\text{C}$
Lead Temperature	PDIP (P): (Soldering, 10 seconds)	260		260		$^\circ\text{C}$	
	TO-99 (LMC): (Soldering, 10 seconds)	300		300		$^\circ\text{C}$	
Storage temperature, T_{stg}		-65	150	-65	150	$^\circ\text{C}$	

- (1) *Absolute Maximum Ratings* indicate limits beyond which damage to the device may occur. *Recommended Operating Conditions* indicate conditions for which the device is intended to be functional, but specific performance is not ensured. For ensured specifications and the test conditions, see the Electrical Characteristics.
- (2) Refer to RETS158AX for LM158A military specifications and to RETS158X for LM158 military specifications.
- (3) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the TI Sales Office/Distributors for availability and specifications.
- (4) For operating at high temperatures, the LM358/LM358A, LM2904 must be derated based on a 125°C maximum junction temperature and a thermal resistance of 120°C/W for PDIP, 182°C/W for TO-99, 189°C/W for SOIC package, and 230°C/W for DSBGA, which applies for the device soldered in a printed circuit board, operating in a still air ambient. The LM258/LM258A and LM158/LM158A can be derated based on a $+150^\circ\text{C}$ maximum junction temperature. The dissipation is the total of both amplifiers—use external resistors, where possible, to allow the amplifier to saturate or to reduce the power which is dissipated in the integrated circuit.
- (5) Short circuits from the output to V^+ can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of V^+ . At values of supply voltage in excess of +15 V, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.
- (6) This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input diode clamps. In addition to this diode action, there is also lateral NPN parasitic transistor action on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the op amps to go to the V^+ voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration that an input is driven negative. This is not destructive and normal output states will re-establish when the input voltage, which was negative, again returns to a value greater than -0.3 V (at 25°C).

6.2 ESD Ratings

		VALUE	UNIT
$V_{(ESD)}$	Electrostatic discharge	Human-body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 ⁽¹⁾	± 250 V

- (1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

	MIN	MAX	UNIT
Supply Voltage (V+ - V-):LM158, LM258, LM358	3 (±1.5)	32 (±16)	V
Supply Voltage (V+ - V-):LM2904	3 (±1.5)	26 (±13)	V
Operating Temperature: LM158	-55	125	°C
Operating Temperature: LM258	-25	85	°C
Operating Temperature: LM358	0	70	°C
Operating Temperature: LM2904	-40	85	°C

6.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾	LM158-N, LM258-N, LM358-N	LM158-N	LM2904-N, LM358-N			UNIT
	LMC	NAB	YPB	D	P	
	8 PINS					
R _{θJA} Junction-to-ambient thermal resistance	155	132	230	189	120	°C/W

(1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *IC Package Thermal Metrics* application report, [SPRA953](#).

6.5 Electrical Characteristics: LM158A, LM358A, LM158, LM258

V⁺ = +5.0 V, See⁽¹⁾, unless otherwise stated

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM158A			LM358A			LM158, LM258			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	See ⁽²⁾ , T _A = 25°C		1	2		2	3		2	5	mV
Input Bias Current	I _{IN(+)} or I _{IN(-)} , T _A = 25°C, V _{CM} = 0 V, ⁽³⁾		20	50		45	100		45	150	nA
Input Offset Current	I _{IN(+)} - I _{IN(-)} , V _{CM} = 0V, T _A = 25°C		2	10		5	30		3	30	nA
Input Common-Mode Voltage Range	V ⁺ = 30 V, ⁽⁴⁾ (LM2904, V ⁺ = 26V), T _A = 25°C		0	V ⁺ -1.5		0	V ⁺ -1.5		0	V ⁺ -1.5	V
Supply Current	Over Full Temperature Range R _L = ∞ on All Op Amps										
	V ⁺ = 30V (LM2904 V ⁺ = 26V)		1	2		1	2		1	2	mA
	V ⁺ = 5V		0.5	1.2		0.5	1.2		0.5	1.2	mA
Large Signal Voltage Gain	V ⁺ = 15 V, T _A = 25°C, R _L ≥ 2 kΩ, (For V _O = 1 V to 11 V)		50	100		25	100		50	100	V/mV
Common-Mode Rejection Ratio	T _A = 25°C, V _{CM} = 0 V to V ⁺ -1.5 V		70	85		65	85		70	85	dB
Power Supply Rejection Ratio	V ⁺ = 5 V to 30 V (LM2904, V ⁺ = 5 V to 26 V), T _A = 25°C		65	100		65	100		65	100	dB

(1) These specifications are limited to -55°C ≤ T_A ≤ +125°C for the LM158/LM158A. With the LM258/LM258A, all temperature specifications are limited to -25°C ≤ T_A ≤ 85°C, the LM358/LM358A temperature specifications are limited to 0°C ≤ T_A ≤ 70°C, and the LM2904 specifications are limited to -40°C ≤ T_A ≤ 85°C.

(2) V_O = 1.4 V, R_S = 0 Ω with V⁺ from 5 V to 30 V; and over the full input common-mode range (0 V to V⁺ - 1.5 V) at 25°C. For LM2904, V⁺ from 5 V to 26 V.

(3) The direction of the input current is out of the IC due to the PNP input stage. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.

(4) The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V (at 25°C). The upper end of the common-mode voltage range is V⁺ - 1.5 V (at 25°C), but either or both inputs can go to 32 V without damage (26 V for LM2904), independent of the magnitude of V⁺.

Electrical Characteristics: LM158A, LM358A, LM158, LM258 (continued)
 $V^+ = +5.0\text{ V}$, See⁽¹⁾, unless otherwise stated

PARAMETER		TEST CONDITIONS	LM158A			LM358A			LM158, LM258			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Power Supply		$V^+ = 5\text{ V to }30\text{ V}$										
Rejection Ratio		(LM2904, $V^+ = 5\text{ V to }26\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)										
		65	100		65	100		65	100		dB	
Amplifier-to-Amplifier Coupling		$f = 1\text{ kHz to }20\text{ kHz}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (Input Referred), See ⁽⁵⁾										
		-120			-120			-120			dB	
Output Current	Source	$V_{IN}^+ = 1\text{ V}$,										
		$V_{IN}^- = 0\text{ V}$,										
		$V^+ = 15\text{ V}$,										
	$V_O = 2\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$											
	Sink	$V_{IN}^- = 1\text{ V}$, $V_{IN}^+ = 0\text{ V}$										
		$V^+ = 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$,										
$V_O = 2\text{ V}$												
		20	40		20	40		20	40		mA	
		$V_{IN}^- = 1\text{ V}$,										
		$V_{IN}^+ = 0\text{ V}$										
		$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_O = 200\text{ mV}$,										
		$V^+ = 15\text{ V}$										
		12	50		12	50		12	50		μA	
Short Circuit to Ground		$T_A = 25^\circ\text{C}$, See ⁽⁶⁾ , $V^+ = 15\text{ V}$										
		40			40			40			mA	
Input Offset Voltage		See ⁽²⁾										
		4			5			7			mV	
Input Offset Voltage Drift		$R_S = 0\Omega$										
		7			7			7			$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
Input Offset Current		$I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$										
		30			75			100			nA	
Input Offset Current Drift		$R_S = 0\Omega$										
		10			10			10			$\text{pA}/^\circ\text{C}$	
Input Bias Current		$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$										
		40			40			40			nA	
Input Common-Mode Voltage Range		$V^+ = 30\text{ V}$, See ⁽⁴⁾ (LM2904, $V^+ = 26\text{ V}$)										
		0		$V^+ - 2$	0		$V^+ - 2$	0		$V^+ - 2$	V	
Large Signal Voltage Gain		$V^+ = +15\text{ V}$										
		$(V_O = 1\text{ V to }11\text{ V})$										
		$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$										
		25			15			25			V/mV	
Output	V_{OH}	$V^+ = +30\text{ V}$										
Voltage		$R_L = 2\text{ k}\Omega$										
		26			26			26			V	
		(LM2904, $V^+ = 26\text{ V}$)										
		27	28		27	28		27	28		V	
Swing		$V^+ = 5\text{ V}$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$										
		5			5			5			20	
Output Current	Source	$V_{IN}^+ = +1\text{ V}$, $V_{IN}^- = 0\text{ V}$,										
		$V^+ = 15\text{ V}$, $V_O = 2\text{ V}$										
	Sink	$V_{IN}^- = +1\text{ V}$, $V_{IN}^+ = 0\text{ V}$,										
		$V^+ = 15\text{ V}$, $V_O = 2\text{ V}$										
		10	20		10	20		10	20		mA	
		10	15		5	8		5	8		mA	

(5) Due to proximity of external components, insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequencies.

(6) Short circuits from the output to V^+ can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of V^+ . At values of supply voltage in excess of +15 V, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

6.6 Electrical Characteristics: LM358, LM2904

$V^+ = +5.0\text{ V}$, See⁽¹⁾, unless otherwise stated

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM358			LM2904			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	See ⁽²⁾ , $T_A = 25^\circ\text{C}$		2	7		2	7	mV
Input Bias Current	$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{CM} = 0\text{ V}$, See ⁽³⁾		45	250		45	250	nA
Input Offset Current	$I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$, $V_{CM} = 0\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$		5	50		5	50	nA
Input Common-Mode Voltage Range	$V^+ = 30\text{ V}$, See ⁽⁴⁾ (LM2904, $V^+ = 26\text{ V}$), $T_A = 25^\circ\text{C}$	0		$V^+ - 1.5$	0		$V^+ - 1.5$	V
Supply Current	Over Full Temperature Range							
	$R_L = \infty$ on All Op Amps							
	$V^+ = 30\text{ V}$ (LM2904 $V^+ = 26\text{ V}$)		1	2		1	2	mA
	$V^+ = 5\text{ V}$		0.5	1.2		0.5	1.2	mA
Large Signal Voltage	$V^+ = 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$							
Gain	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$, (For $V_O = 1\text{ V}$ to 11 V)	25	100		25	100		V/mV
Common-Mode Rejection Ratio	$T_A = 25^\circ\text{C}$,	65	85		50	70		dB
	$V_{CM} = 0\text{ V}$ to $V^+ - 1.5\text{ V}$							
Power Supply Rejection Ratio	$V^+ = 5\text{ V}$ to 30 V	65	100		50	100		dB
	(LM2904, $V^+ = 5\text{ V}$ to 26 V), $T_A = 25^\circ\text{C}$							
Amplifier-to-Amplifier Coupling	$f = 1\text{ kHz}$ to 20 kHz , $T_A = 25^\circ\text{C}$ (Input Referred), See ⁽⁵⁾			-120			-120	dB
Output Current	Source	$V_{IN^+} = 1\text{ V}$,	20	40	20	40	mA	
		$V_{IN^-} = 0\text{ V}$,						
		$V^+ = 15\text{ V}$,						
		$V_O = 2\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$						
	Sink	$V_{IN^-} = 1\text{ V}$, $V_{IN^+} = 0\text{ V}$	10	20	10	20		
		$V^+ = 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$,						
		$V_O = 2\text{ V}$						
		$V_{IN^-} = 1\text{ V}$,						
	$V_{IN^+} = 0\text{ V}$	12	50	12	50	μA		
	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_O = 200\text{ mV}$,							
	$V^+ = 15\text{ V}$							
Short Circuit to Ground	$T_A = 25^\circ\text{C}$, See ⁽⁶⁾ , $V^+ = 15\text{ V}$	40	60		40	60	mA	
Input Offset Voltage	See ⁽²⁾			9		10	mV	
Input Offset Voltage Drift	$R_S = 0\ \Omega$		7		7		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
Input Offset Current	$I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$			150		45	200	nA
Input Offset Current Drift	$R_S = 0\ \Omega$		10		10		$\text{pA}/^\circ\text{C}$	
Input Bias Current	$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$	40	500		40	500	nA	

(1) These specifications are limited to $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$ for the LM158/LM158A. With the LM258/LM258A, all temperature specifications are limited to $-25^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85^\circ\text{C}$, the LM358/LM358A temperature specifications are limited to $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq 70^\circ\text{C}$, and the LM2904 specifications are limited to $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85^\circ\text{C}$.

(2) $V_O = 1.4\text{ V}$, $R_S = 0\ \Omega$ with V^+ from 5 V to 30 V ; and over the full input common-mode range (0 V to $V^+ - 1.5\text{ V}$) at 25°C . For LM2904, V^+ from 5 V to 26 V .

(3) The direction of the input current is out of the IC due to the PNP input stage. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.

(4) The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V (at 25°C). The upper end of the common-mode voltage range is $V^+ - 1.5\text{ V}$ (at 25°C), but either or both inputs can go to 32 V without damage (26 V for LM2904), independent of the magnitude of V^+ .

(5) Due to proximity of external components, insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequencies.

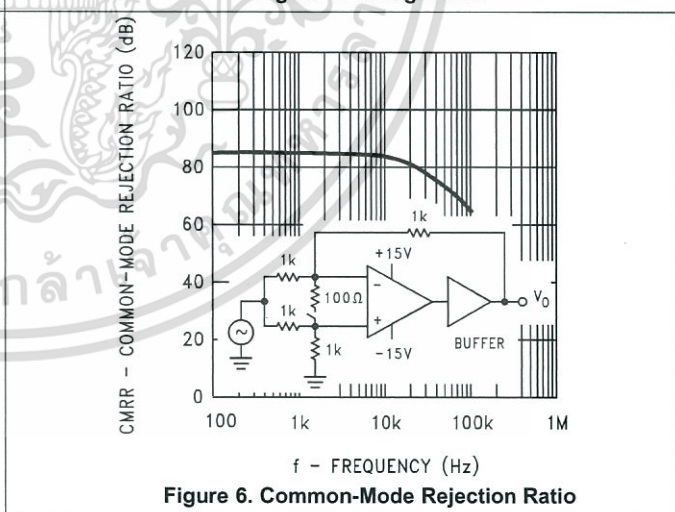
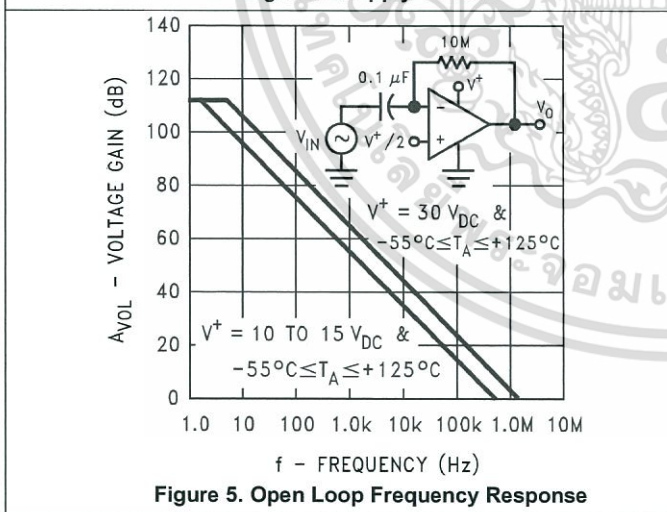
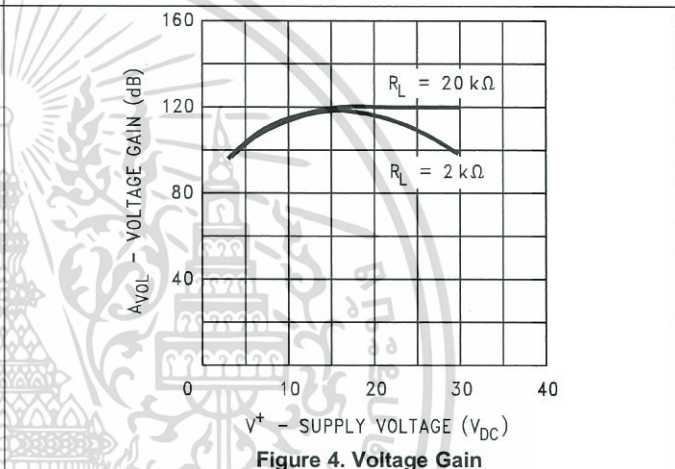
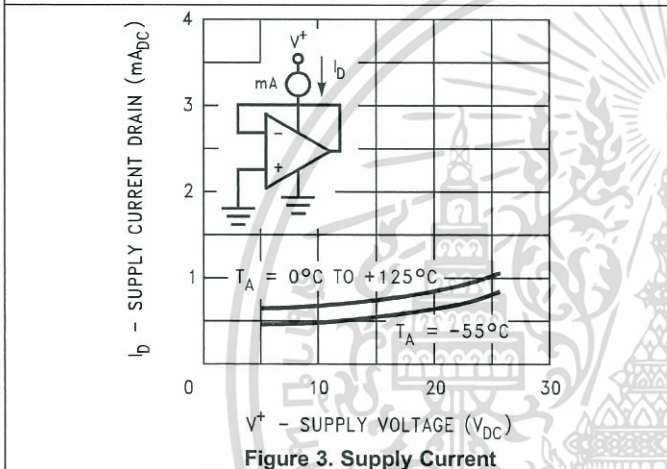
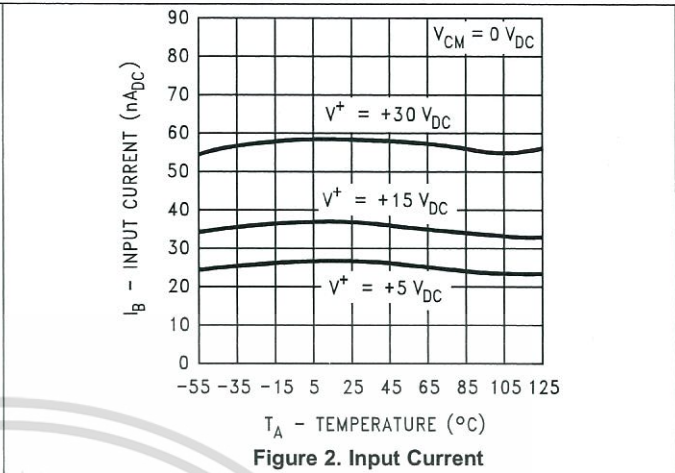
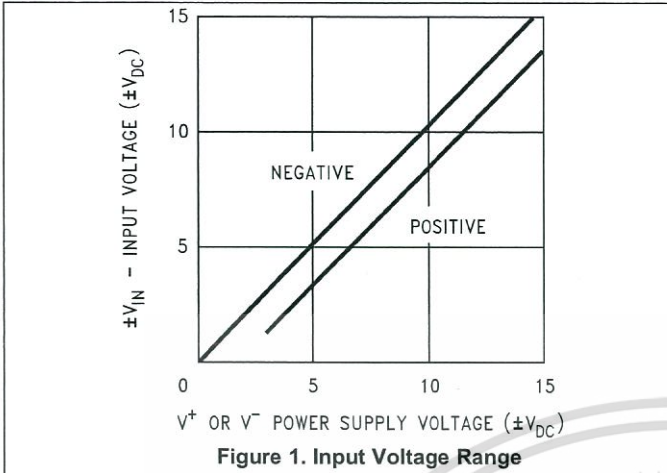
(6) Short circuits from the output to V^+ can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of V^+ . At values of supply voltage in excess of $+15\text{ V}$, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

Electrical Characteristics: LM358, LM2904 (continued)
 $V^+ = +5.0\text{ V}$, See⁽¹⁾, unless otherwise stated

PARAMETER		TEST CONDITIONS		LM358			LM2904			UNIT
				MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Common-Mode Voltage Range		$V^+ = 30\text{ V}$, See ⁽⁴⁾ (LM2904, $V^+ = 26\text{ V}$)		0		$V^+ - 2$	0		$V^+ - 2$	V
Large Signal Voltage Gain		$V^+ = +15\text{ V}$		15			15			V/mV
		$(V_O = 1\text{ V to } 11\text{ V})$								
		$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$								
Output Voltage	V_{OH}	$V^+ = 30\text{ V}$	$R_L = 2\text{ k}\Omega$	26			22			V
		(LM2904, $V^+ = 26\text{ V}$)	$R_L = 10\text{ k}\Omega$	27	28		23	24		V
Swing	V_{OL}	$V^+ = 5\text{ V}$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$			5	20		5	100	mV
Output Current	Source	$V_{IN}^+ = 1\text{ V}$, $V_{IN}^- = 0\text{ V}$,		10	20		10	20		mA
		$V^+ = 15\text{ V}$, $V_O = 2\text{ V}$								
	Sink	$V_{IN}^- = 1\text{ V}$, $V_{IN}^+ = 0\text{ V}$,		5	8		5	8		mA
		$V^+ = 15\text{ V}$, $V_O = 2\text{ V}$								



6.7 Typical Characteristics



Typical Characteristics (continued)

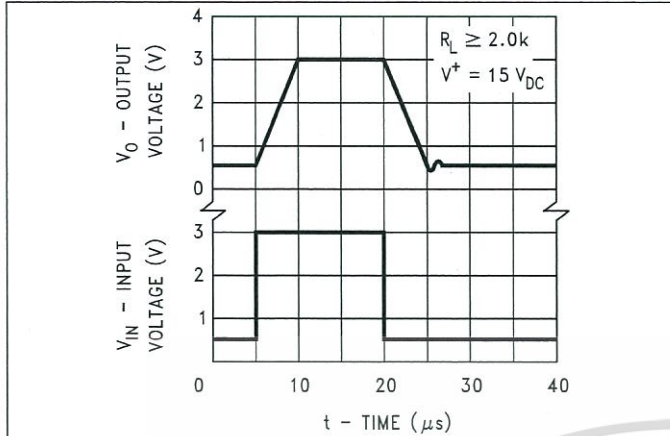


Figure 7. Voltage Follower Pulse Response

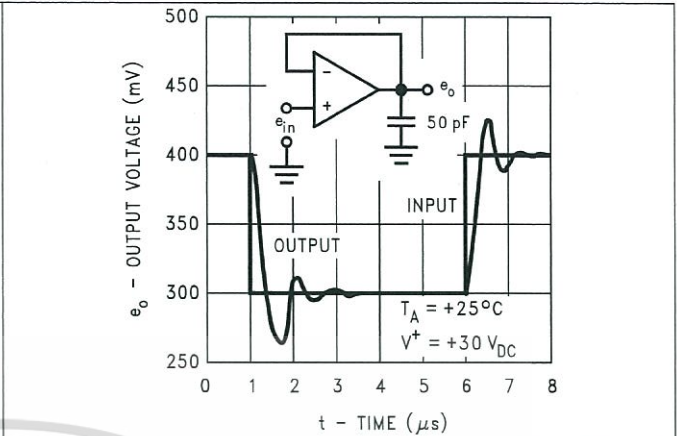


Figure 8. Voltage Follower Pulse Response (Small Signal)

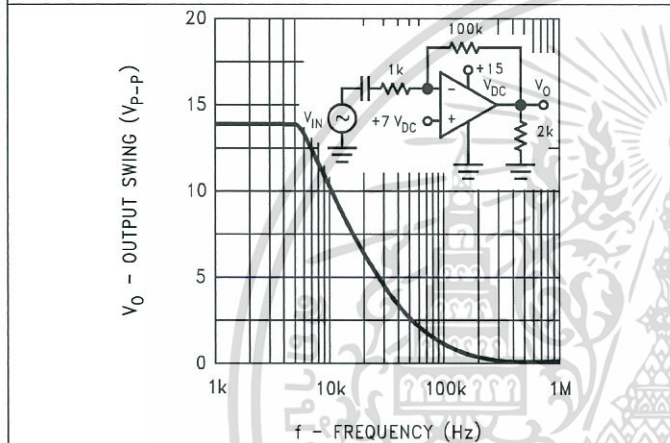


Figure 9. Large Signal Frequency Response

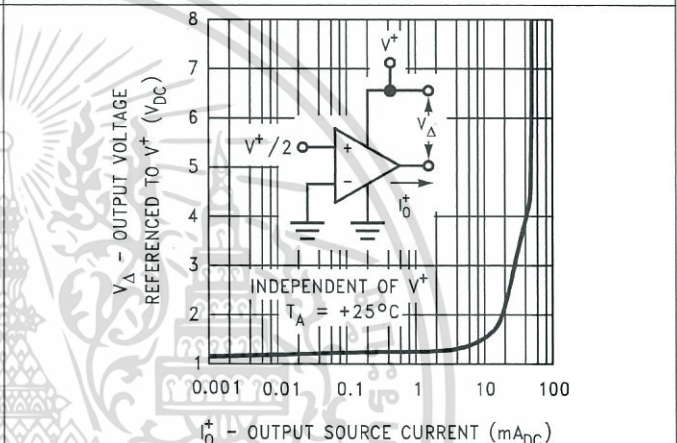


Figure 10. Output Characteristics Current Sourcing

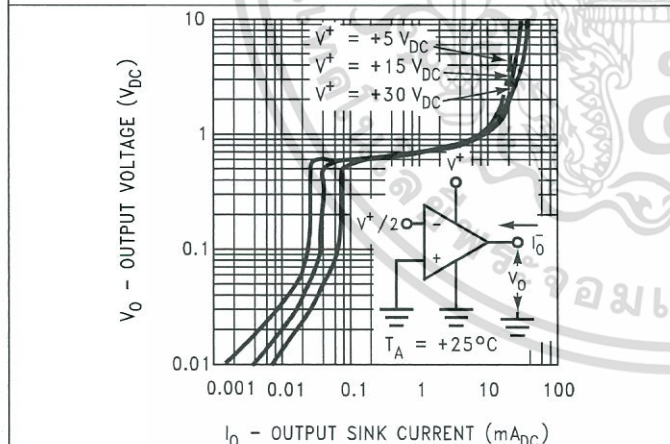


Figure 11. Output Characteristics Current Sinking

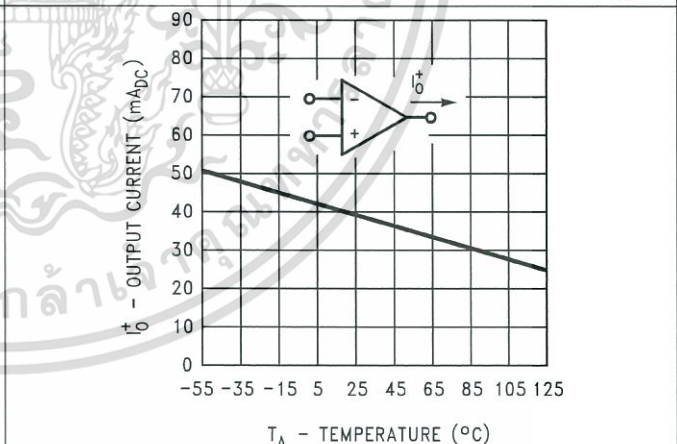


Figure 12. Current Limiting

Typical Characteristics (continued)

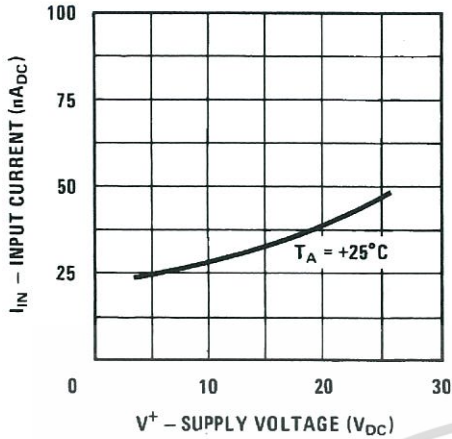


Figure 13. Input Current (LM2902 Only)

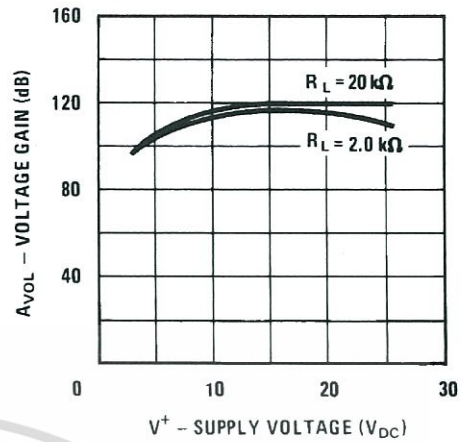


Figure 14. Voltage Gain (LM2902 Only)



7 Detailed Description

7.1 Overview

The LM158 series are operational amplifiers which can operate with only a single power supply voltage, have true-differential inputs, and remain in the linear mode with an input common-mode voltage of $0 V_{DC}$. These amplifiers operate over a wide range of power supply voltage with little change in performance characteristics. At 25°C amplifier operation is possible down to a minimum supply voltage of $2.3 V_{DC}$.

Large differential input voltages can be easily accommodated and, as input differential voltage protection diodes are not needed, no large input currents result from large differential input voltages. The differential input voltage may be larger than V^+ without damaging the device. Protection should be provided to prevent the input voltages from going negative more than $-0.3 V_{DC}$ (at 25°C). An input clamp diode with a resistor to the IC input terminal can be used.

7.2 Functional Block Diagram

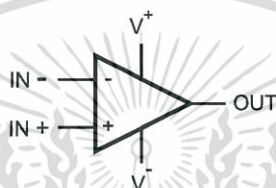


Figure 15. (Each Amplifier)

7.3 Feature Description

The amplifier's differential inputs consist of a non-inverting input (+IN) and an inverting input (-IN). The amplifier amplifies only the difference in voltage between the two inputs, which is called the differential input voltage. The output voltage of the op-amp V_{out} is given by Equation 1:

$$V_{OUT} = A_{OL} (IN+ - IN-)$$

where

- A_{OL} is the open-loop gain of the amplifier, typically around 100dB (100,000x, or 10uV per Volt). (1)

To reduce the power supply current drain, the amplifiers have a class A output stage for small signal levels which converts to class B in a large signal mode. This allows the amplifiers to both source and sink large output currents. Therefore both NPN and PNP external current boost transistors can be used to extend the power capability of the basic amplifiers. The output voltage needs to raise approximately 1 diode drop above ground to bias the on-chip vertical PNP transistor for output current sinking applications.

For ac applications, where the load is capacitively coupled to the output of the amplifier, a resistor should be used, from the output of the amplifier to ground to increase the class A bias current and prevent crossover distortion. Where the load is directly coupled, as in dc applications, there is no crossover distortion.

Capacitive loads which are applied directly to the output of the amplifier reduce the loop stability margin. Values of 50 pF can be accommodated using the worst-case non-inverting unity gain connection. Large closed loop gains or resistive isolation should be used if larger load capacitance must be driven by the amplifier.

The bias network of the LM158 establishes a drain current which is independent of the magnitude of the power supply voltage over the range of $3 V_{DC}$ to $30 V_{DC}$.

Output short circuits either to ground or to the positive power supply should be of short time duration. Units can be destroyed, not as a result of the short circuit current causing metal fusing, but rather due to the large increase in IC chip power dissipation which will cause eventual failure due to excessive junction temperatures. Putting direct short-circuits on more than one amplifier at a time will increase the total IC power dissipation to destructive levels, if not properly protected with external dissipation limiting resistors in series with the output leads of the amplifiers. The larger value of output source current which is available at 25°C provides a larger output current capability at elevated temperatures (see *Typical Characteristics*) than a standard IC op amp.

7.4 Device Functional Modes

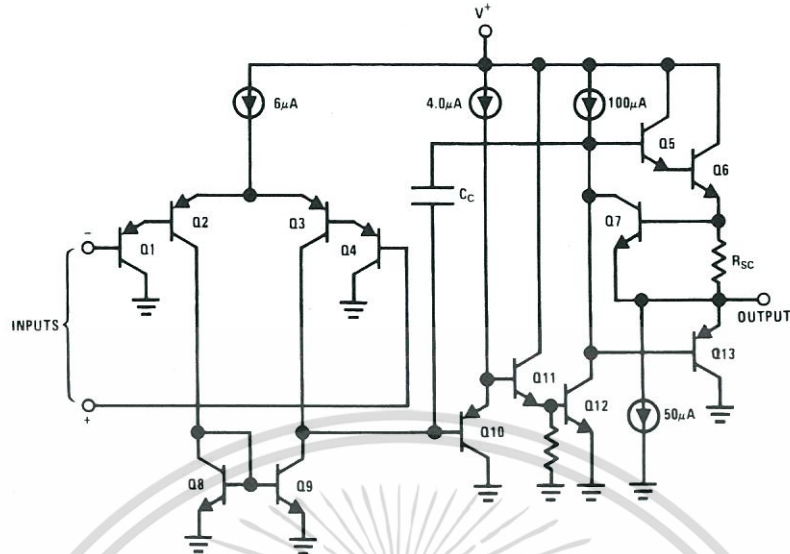


Figure 16. Schematic Diagram

The circuits presented in the *Typical Single-Supply Applications* emphasize operation on only a single power supply voltage. If complementary power supplies are available, all of the standard op-amp circuits can be used. In general, introducing a pseudo-ground (a bias voltage reference of $V^+/2$) will allow operation above and below this value in single power supply systems. Many application circuits are shown which take advantage of the wide input common-mode voltage range which includes ground. In most cases, input biasing is not required and input voltages which range to ground can easily be accommodated.

BV10S1P-29TD

Inspection Report

Item	Voltage	Impedance
Cell Battery Pack (10S1P)	37.04V	399mΩ

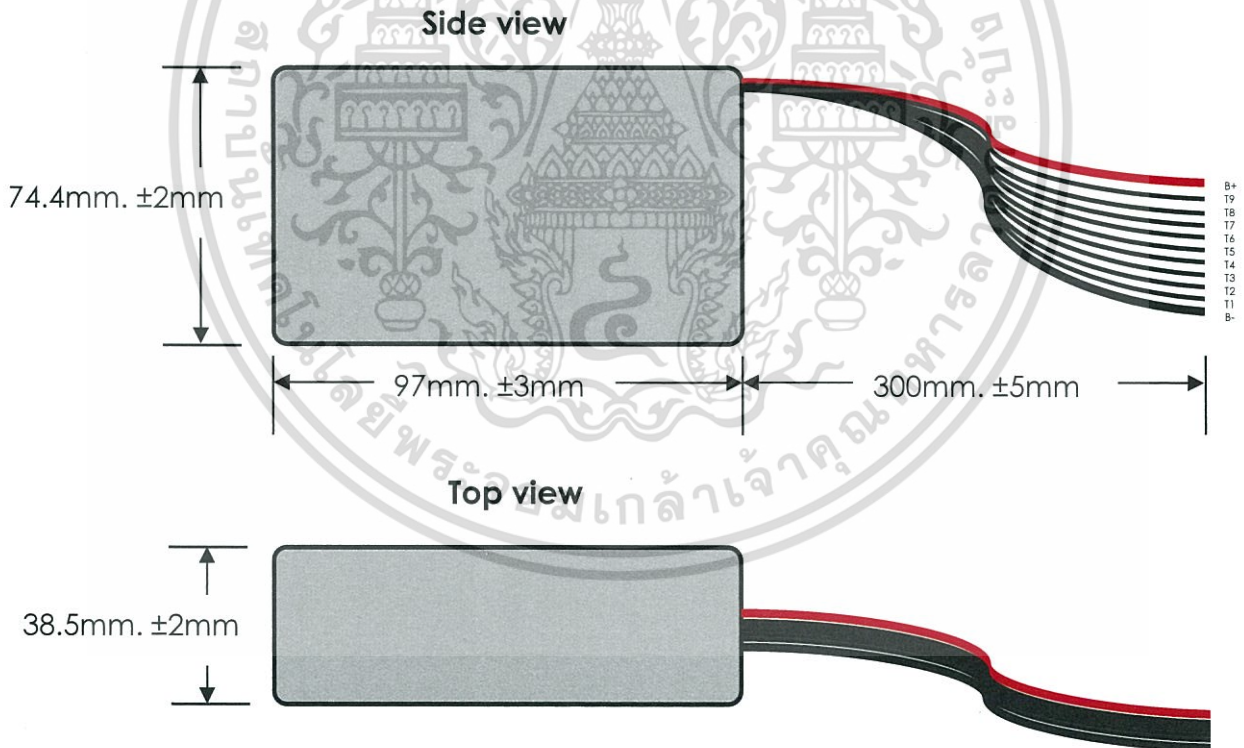
Battery Capacity

Item	Typical	Minimum
NCR18650TD	2900mAh	2755mAh

Battery protection

Call Battery protection	PTC Resettable Fuses	Ambient Operating Temperature		
		23°C	40°C	50°C
		4.2A	3.6A	3.3A

Battery Pack Dimension



Item	Wire Spec	Symbol
Output B+	Red Color, 18AWG	
Output B-	Black Color, 18AWG	
Tab1-9 (T1-T9)	Black Color, 20AWG	

Weight

เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งผู้ผลิตเพื่อขอเปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Battery Pack: 0.53Kg.

Panasonic

Lithium Ion NCR18650B

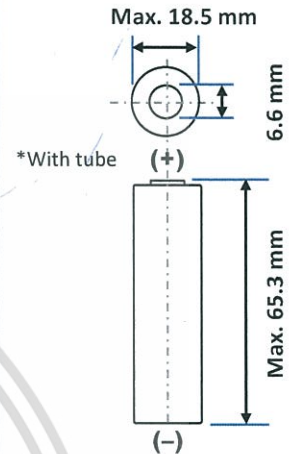
Features & Benefits

- High energy density
- Long stable power and long run time
- Ideal for notebook PCs, boosters, portable devices, etc.

Specifications

Rated capacity ⁽¹⁾	Min. 3200mAh
Capacity ⁽²⁾	Min. 3250mAh Typ. 3350mAh
Nominal voltage	3.6V
Charging	CC-CV, Std. 1625mA, 4.20V, 4.0 hrs
Weight (max.)	48.5 g
Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C
Energy density ⁽³⁾	Volumetric: 676 Wh/l Gravimetric: 243 Wh/kg

Dimensions

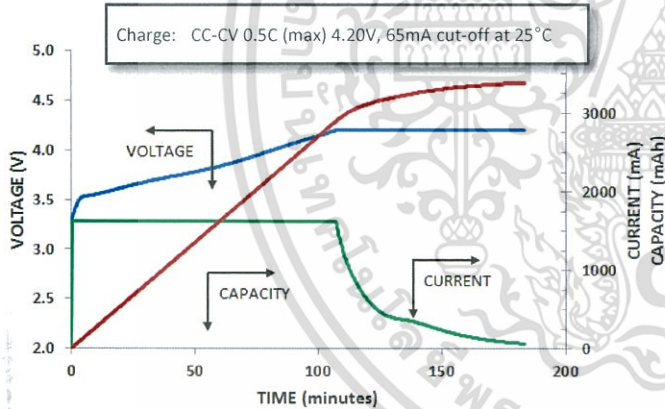


For Reference Only

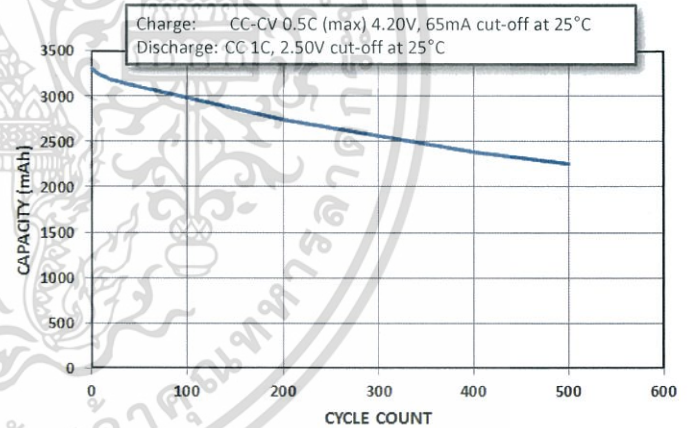
* At temperatures below 10°C, charge at a 0.25C rate.

⁽¹⁾ At 20°C ⁽²⁾ At 25°C ⁽³⁾ Energy density based on bare cell dimensions

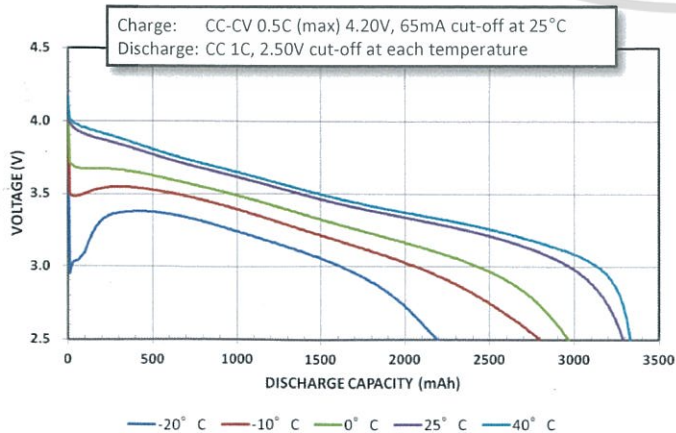
Charge Characteristics



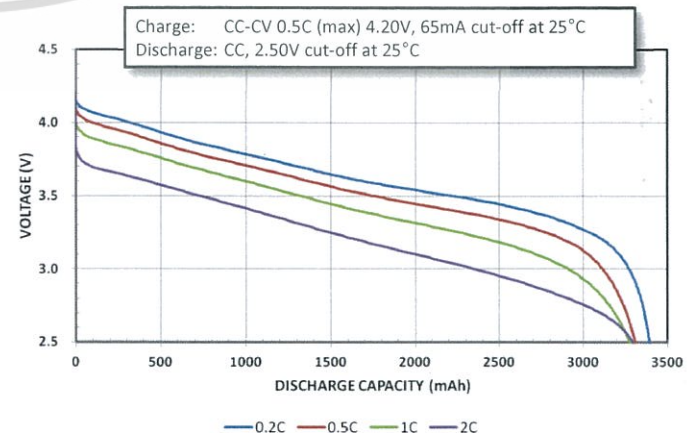
Cycle Life Characteristics



Discharge Characteristics (by temperature)



Discharge Characteristics (by rate of discharge)



The data in this document is for descriptive purposes only and is not intended to make or imply any guarantee or warranty.

For more information on how Panasonic can assist you with your battery power solution needs, visit us at www.panasonic.com/industrial/batteries-oem, e-mail secsales@us.panasonic.com, or call (469) 362-5600.