

ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด
และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรตีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์

HYBRID ENERGY STORAGES SYSTEM BETWEEN ULTRACAPACITOR
AND LI-ION BATTERY BY DC-DC CONVERTER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด
และแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรตีซีตีซีคอนเวอร์เตอร์

HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM BETWEEN ULTRACAPACITOR
AND LI-ION BATTERY BY DC-DC CONVERTER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM BETWEEN ULTRACAPACITOR
AND LI-ION BATTERY BY DC-DC CONVERTER



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด
และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์

HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM BETWEEN ULTRACAPACITOR
AND LI-ION BATTERY BY DC-DC CONVERTER



อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย

อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาพลังงานไฟฟ้า

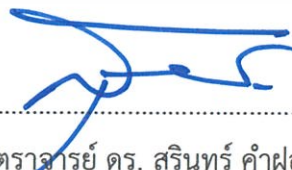
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด
และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยใช้วงจรตีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์

ผู้จัดทำ



1. นายภาสกร ราชเดิม
2. นายสรวิทย์ ทาใหญ่
3. นางสาวสิริภา ธรรมรัตน์
4. นางสาวดวงกมล อุ่นอุดมรักษ์


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด และแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรตีซีตีซีคอนเวอร์เตอร์

นายภาสกร ราชเดิม
นายสรวัฒน์ ท่าใหญ่
นางสาวสิริฎา ธรรมรัตน์
นางสาวดวงกมล อุ่นอุดมรักษ์
รศ.ดร. สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรตีซีตีซีคอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด คือมีความหนาแน่นของกำลังไฟสูง ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการอัดและคายประจุได้รวดเร็ว ในทางกลับกันแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนนั้นมีข้อดีคือมีความหนาแน่นของพลังงานไฟสูง เป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้าได้นาน ดังนั้นจึงจะเป็นประโยชน์อย่างมาก หากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำทั้งสองแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้ามาใช้ผสมผสานกัน เนื่องจากจะทำให้ได้ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่างกันได้ โดยในการผสมผสานทั้งสองแหล่งกักเก็บพลังงานจะประยุกต์ใช้วงจรตีซีตีซีคอนเวอร์เตอร์ ชนิดบีก-บูสต์ในการเชื่อมต่อ พิกัดคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอมีขนาดแรงดันที่ 96 โวลต์ สามารถจ่ายกำลังได้สูงสุดที่ 1 กิโลวัตต์ จากการทดลองสามารถนำระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าทั้งสองมาใช้ร่วมกันได้และสามารถอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดได้ในเวลา 14 นาที ที่พิกัดแรงดัน 168 โวลต์ 4.93 กิโลวัตต์ และถ่ายโอนพลังงานจากการคายประจุของตัวเก็บไฟฟ้าแบบยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนในช่วงบีกได้ตั้งแต่ช่วง 168 โวลต์จนถึง 96 โวลต์ที่ดิวิตไซเคิล 90 เปอร์เซนต์ และเปลี่ยนมาทำงานในช่วงบูสต์ได้ในช่วง 96 โวลต์จนถึง 64 โวลต์ที่ดิวิตไซเคิล 20 เปอร์เซนต์ โดยใช้พิกัดแรงดันที่ 96 โวลต์ กระแสที่ 10 แอมแปร์ ใช้เวลาทั้งสิ้น 5 ชั่วโมง 11 นาที ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้าที่มีความต้องการระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่มีข้อจำกัดในด้านในการอัดประจุไฟฟ้าที่รวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM BETWEEN ULTRACAPACITOR AND LI-ION BATTERY BY DC-DC CONVERTERS

Phatsakorn	Rachderm	
Sorrawat	Tayai	
Sirida	Thammarat	
Doungkamon	Unudormrak	
Assoc. Prof. Dr. Surin Khomfoi	Advisor	
Chaitat	Maneeinn	Advisor
Year 2016		

ABSTRACT

This thesis presents a system of a combination of two energy storages which consist of ultracapacitors and lithium-ion batteries by applying DC-DC converters. The basic characteristic of ultracapacitor is a great power density, which implies the ability to charge and discharge faster over a short period of time. On the other hand, the battery has much higher energy density allowing the battery to store more energy over a long period of time. In this thesis, the combination of a battery and an ultracapacitor in a hybrid energy storages system would be very useful because of the high efficiency and the ability to transfer energy between them. In this hybrid energy storages system, the Buck-Boost DC-DC converter has been applied. The converters which are presented in this thesis is worked at the rated 96 volts and can produce a maximum power up to 1 kW. From the experiment, the combination of the two energy sources is available and can charge the ultracapacitors within 14 minutes at the rated of 168 volts 4.93 kW. As the rated voltage of 96 volts 10 amperes, the system can transfer the energy from the ultracapacitors to lithium-ion batteries in buck mode at the rated of 168 to 96 volts with a duty of 90 percent and able to change in boost mode at the rated of 96 to 64 volts with a duty of 20 percent within 5 hours and 11 minutes. The experimental results can show the combination ability between two energy storages. The system can also store higher energy density and higher power density. This hybrid energy storages system can be applied to the electric vehicles that need to reduce gross weight, and this hybrid energy storages system also has the special qualification of fast charging.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากความกรุณาของ รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย และอาจารย์ชัยทัต มณีอินทร์ ที่กรุณาเป็นที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ให้คำปรึกษาและแนะนำ แนวทางการศึกษาวิจัย รวมถึงตรวจสอบความเรียบร้อยของปริญญานิพนธ์ จึงขอกราบขอบพระคุณ ท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

ขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่าน ที่ได้มอบวิชาความรู้ให้แก่กลุ่มของข้าพเจ้า ตั้งแต่เริ่มเข้าศึกษาปริญญาตรี

ขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยประยุกต์ใช้พลังงานทดแทน (REAL LAB) ที่เอื้อเพื่อ สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในระหว่างการจัดทำงานวิจัย และขอขอบคุณที่ทุกระดับการศึกษา ปริญญาเอกและปริญญาโททุกท่านที่ช่วยให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือดูแลเอาใจใส่ในทุกด้านอย่าง ดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ปฎิพัทธ์ ทวนทอง อาจารย์ประจำภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะ ครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาให้กลุ่มของข้าพเจ้าได้เข้า เยี่ยมชมโครงการวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

สุดท้ายนี้กลุ่มของข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดคือ บิดา มารดา รวมถึงทุกคนในครอบครัว ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ทุกเวลา ทำให้กลุ่มของ ข้าพเจ้าสามารถทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำระลึกในพระคุณและ กราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	3
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	3
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 ระบบกักเก็บพลังงาน (ESS: Energy Storage Systems)	6
2.3 พารามิเตอร์ที่บ่งชี้ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงาน	7
2.3.1 อัตราการคายประจุหรืออัตราการชาร์จ (Discharge rate or c-rate)	7
2.3.2 ค่าความลึกของการคายประจุแบตเตอรี่และสถานะการอัดประจุเริ่มต้น (Deep of Discharge: DOD and State of Charge: SOC)	8
2.3.3 รอบการใช้งาน (Cycle)	9
2.3.4 ค่าความหนาแน่นของพลังงาน (Energy density)	10
2.4 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม (Lithium Battery)	11
2.4.1 ที่มาของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมแบตเตอรี่ลิเทียมเป็นแบตเตอรี่	11
2.4.2 ชนิดของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม	12
2.5 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Ultracapacitor)	18
2.5.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดคืออะไร	19
2.5.2 คุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าชนิดอื่น	21
2.5.3 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเหมาะกับการใช้งานด้านใดบ้าง	22
2.6 ยานพาหนะพลังงานไฟฟ้า	24
2.7 ระดับการอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้า	26
2.7.1 เครื่องอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้าระดับ 1 (Level 1 Charging)	26
2.7.2 เครื่องอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้าระดับ 2 (Level 2 Charging)	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.7.3 เครื่องอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้าระดับ 3 (Level 3 Charging)	26
2.8 วงจรตีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์	27
2.8.1 Bidirectional DC-DC Converter	28
2.9 สรุป	30
บทที่ 3 การออกแบบและการทดลอง	31
3.1 บทนำ	31
3.2 การออกแบบวงจรไฟฟ้าในการเชื่อมต่อกันของแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน	31
3.3 ข้อมูลระบบกักเก็บพลังงานที่ใช้ทำการทดลอง	32
3.3.1 ข้อมูลแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้ทำการทดลอง	32
3.3.2 ข้อมูลตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้ทำการทดลอง	33
3.4 โปรแกรม PLC ของ บริษัท Siemens	35
3.5 การออกแบบวงจรกำลัง	35
3.5.1 วงจร Buck-Boost converter สำหรับการเชื่อมต่อกันของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน	35
3.6 การออกแบบวงจรไฟฟ้ากำลังผ่านโปรแกรม PSIM Simulation	36
3.6.1 ผลการทดลอง	38
3.7 สรุป	39
บทที่ 4 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ	40
4.1 บทนำ	40
4.2 การออกแบบและสร้างชิ้นงานจริง	40
4.3 ชุดวงจรกำลัง	40
4.3.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจำลอง	40
4.3.2 โมดูล บั๊ก-บูสต์ คอนเวอร์เตอร์	41
4.4 การออกแบบวงจรควบคุม	44
4.4.1 ชุดวงจรควบคุมสำหรับควบคุมกระแสป้อนกลับและแรงดันป้อนกลับ	44
4.4.2 PLC (Programmable Logic Controller) model S7-1200 CPU1211C	47
4.5 การออกแบบการเขียนโปรแกรมควบคุม	48
4.5.1 โหมดการอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่	48
4.5.2 โหมดการอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่	48
4.6 สรุป	49

	หน้า
บทที่ 5 ผลการทดลอง	50
5.1 บทนำ	50
5.2 ผลการทดสอบ	50
5.2.1 หน้าจอแสดงผลการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยัง แบตเตอรี่	50
5.2.2 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน	51
5.3 สรุป	57
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	58
6.1 บทสรุป	58
6.2 ข้อเสนอแนะและปัญหาที่พบ	59
6.3 แนวทางการพัฒนา	59
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์	63
ภาคผนวก ข โปรแกรมที่ใช้ควบคุม	69
ภาคผนวก ค ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์	82
ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการ	116
ประวัติผู้เขียน	121



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การใช้พลังงานในอดีตและแนวโน้มความต้องการในอนาคตกรณี BAU	1
1.2 เป้าการอนุรักษ์พลังงานในรายภาคเศรษฐกิจ	2
2.1 รูปแบบของเทคโนโลยีในการกักเก็บพลังงาน	7
2.2 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อระยะเวลาการคายประจุที่อัตราการคายประจุต่างๆ	8
2.3 แสดงค่าSOC และ DOD ของช่วงการใช้งานต่างๆ	9
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกของการคายประจุแบตเตอรี่ (DEEP OF DISCHARGE) ที่ใช้ต่อจำนวนรอบการใช้งาน (CYCLE) ของแบตเตอรี่	10
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าชนิดต่างๆ	11
2.6 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต	13
2.7 โครงสร้างของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนโคบอลต์ออกไซด์	13
2.8 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมชนิดไอออนโคบอลต์ออกไซด์	14
2.9 โครงสร้างของลิเทียมไอออนแมงกานีสออกไซด์	14
2.10 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแมงกานีสออกไซด์	15
2.11 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์	15
2.12 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์	16
2.13 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไททาเนต	17
2.14 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ	17
2.15 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดรูปทรงต่างๆ	18
2.16 ลักษณะการกระจายตัวของประจุขณะกำลังอัดประจุ (ซ้าย) เมื่ออัดประจุจนเต็ม (กลาง) และเมื่อคายประจุ (ขวา)	19
2.17 ลักษณะภายในของตัวเก็บประจุทรงกระบอก (ซ้าย) และทรงเหลี่ยม (ขวา)	20
2.18 ค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (ซ้าย) และตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ขวา) ขณะอัดและคายประจุ	21
2.19 ILLUSTRATION OF BIDIRECTIONAL POWER FLOW	29
2.20 BASIC BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER WITH BUCK AND BOOST STRUCTURE	29
3.1 ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรตีซิติซีคอนเวอร์เตอร์	31
3.2 ข้อมูลทางเทคนิคของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	32
3.3 ข้อมูลทางเทคนิคของตัวเก็บประจุยิ่งยวด	33
3.4 หน่วยประมวลผล SIMATIC S7-1200 ของบริษัท SIEMENS	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 วงจร BUCK-BOOST CONVERTER สำหรับการเชื่อมต่อกันของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน	36
3.6 การจำลองวงจรกำลังไฟฟ้า ช่วงการอัดประจุจากเครื่องอัดประจุไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ยังยวดผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	36
3.7 การจำลองวงจรกำลังไฟฟ้า ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ยังยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	37
3.8 การจำลองวงจรกำลังไฟฟ้า ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ยังยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและภาระทางไฟฟ้าผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	37
3.9 การจำลองวงจรกำลังไฟฟ้า ช่วงการถ่ายโอนประจุจากแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนไปยังภาระทางไฟฟ้า ผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	37
3.10 การจำลองวงจรภายในของดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ยังยวดและวงจรควบคุมแรงดันคงที่ผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	38
3.11 การจำลองวงจรภายในของดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ระหว่างแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและวงจรควบคุมแรงดันคงที่ผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	38
3.12 กราฟผลการทดลองค่าแรงดันทางไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน	39
4.1 เครื่องต้นแบบทั้งหมด	40
4.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า PCR4000LE (AC POWER SOURCE)	41
4.3 กราฟจำลองการคายประจุของตัวเก็บประจุที่ยังยวด โดยใช้โปรแกรม WAVY	41
4.4 โมดูล อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ดีซี-เอซี	42
4.5 ไดอะแกรมแสดงการทำงานภายในของโมดูล	42
4.6 ขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ	44
4.7 ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า GY-712	44
4.8 ไดอะแกรมแสดงการทำงานภายในของตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า GY-712	45
4.9 ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและไดอะแกรมของตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า	45
4.10 วงจรชั้บเกต	46
4.11 วงจรลดระดับแรงดัน	46
4.12 NOT GATE	47
4.13 หน่วยประมวลผล SIMATIC S7-1200 ของบริษัท SIEMENS	47
4.14 วงจรควบคุมทั้งหมดโดยใช้ PLC	48
4.15 ไดอะแกรมการอัดประจุเข้าแบตเตอรี่ของ PLC	48
4.16 ไดอะแกรมของวงจรกำลังและวงจรควบคุม	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 หน้าจอแสดงผลการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่	50
5.2 กราฟการอัดประจุไฟฟ้าให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวด	52
5.3 กราฟการคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดโดยจำลองผ่านโปรแกรม WAVY	52
5.4 กราฟแรงดันในโหมดบ๊ัก	53
5.5 กราฟกระแสในโหมดบ๊ัก	53
5.6 กราฟสัญญาณ DUTY CYCLE ทำงานที่ 90% เพื่อไปขับสวิตช์	54
5.7 กราฟแรงดันในโหมดบูสต์	54
5.8 กราฟกระแสในโหมดบูสต์	55
5.9 กราฟสัญญาณ DUTY CYCLE ทำงานที่ 20% เพื่อไปขับสวิตช์	55
5.10 กราฟแสดงการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่	56
5.11 กราฟการคายประจุของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและ SOC	57



สารบัญตาราง

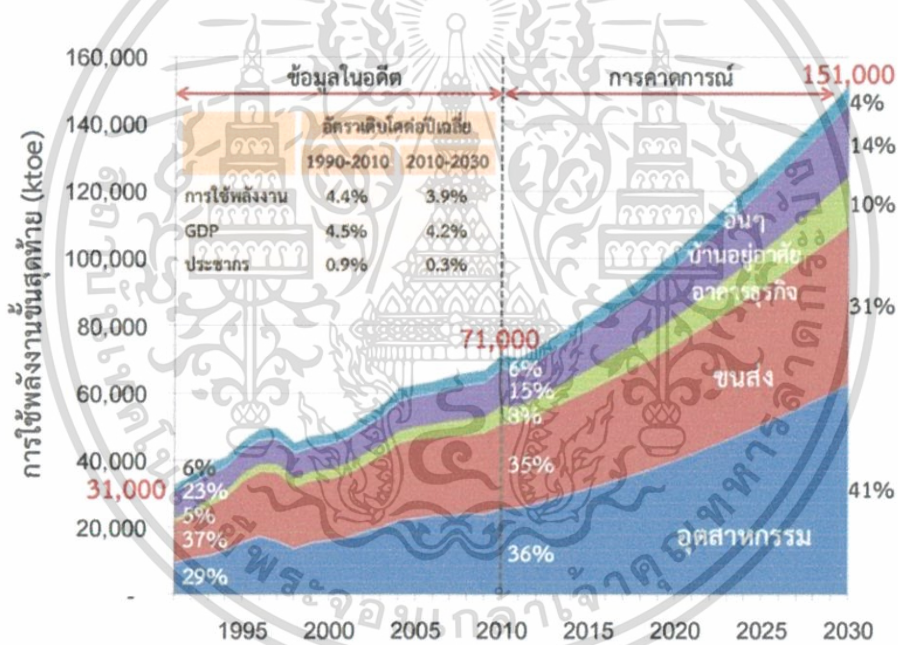
ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	4
2.1 เปรียบเทียบรายละเอียดทางเทคนิคของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในตลาด	21
2.2 คุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเทียบกับแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุชนิดอื่น	22
2.3 ยานพาหนะพลังงานไฟฟ้า	24
2.3 ยานพาหนะพลังงานไฟฟ้า (ต่อ)	25
2.4 เปรียบเทียบระดับการอัดประจุของพาหนะพลังงานไฟฟ้า	27



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

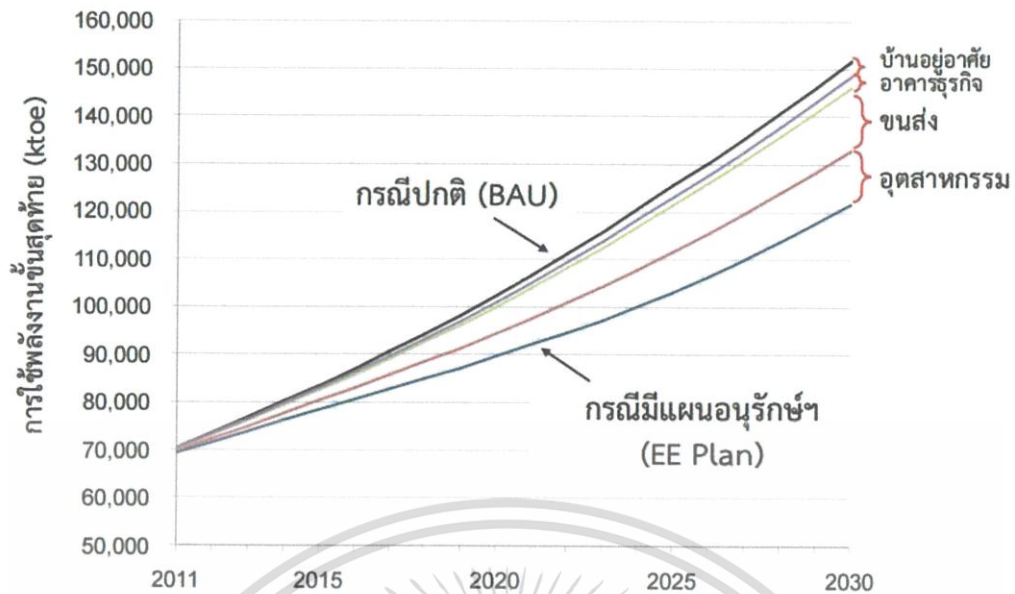
ในปัจจุบันพลังงานเข้ามามีความสำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวันของคนทั่วไปและยังมีส่วนสำคัญการขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจของประเทศเพราะไม่ว่าจะเป็นกระบวนการในกลไกการผลิตก็ล้วนแล้วแต่ต้องพึ่งพาพลังงานทั้งสิ้น ซึ่งปัจจุบันปัญหาเรื่องการขาดแคลนพลังงานนั้นมีมากขึ้นเรื่อยๆ ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าการต้องการพลังงานในด้านต่างๆมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มมากขึ้นไม่ว่าจะเป็น ภาคอุตสาหกรรม บ้านพักที่อยู่อาศัย อาคารธุรกิจและภาคการขนส่ง โดยเฉพาะด้านการขนส่งที่มีแนวโน้มว่าจะมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นในระดับที่ใกล้เคียงกับภาคอุตสาหกรรม เพราะการขนส่งถือเป็นหัวใจหลักของภาคเศรษฐกิจและในอนาคตปัญหาของการขาดแคลนพลังงานนั้นก็มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทางกระทรวงพลังงานจึงได้มีการวางแผนอนุรักษ์พลังงานขึ้นเพื่อรองรับปัญหาการขาดแคลนพลังงานที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคต จากรูปที่ 1.1 แสดงถึงความต้องการพลังงานจะเพิ่มขึ้นจาก 71,000 ktoe ในปี 2553 เป็น 151,000 ktoe ในปี 2573 คิดเป็น 2.1



รูปที่ 1.1 การใช้พลังงานในอดีตและแนวโน้มความต้องการในอนาคตกรณี BAU [1]

เป้าหมายในการอนุรักษ์พลังงานในแต่ละภาคเศรษฐกิจเพิ่มขึ้นในทุกปี จึงเป็นเหตุจำเป็นที่ทำให้ต้องมองหาพลังงานทางเลือกชนิดอื่นที่ไม่ใช่พลังงานที่ผลิตมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เพราะเชื้อเพลิงฟอสซิลนั้นเป็นเชื้อเพลิงใช้แล้วหมดไปและยังก่อให้เกิดมลพิษอีกด้วยอีกทั้งยังมีราคาที่ปรับตัวสูงขึ้นอยู่ตลอดเวลา พลังงานทางเลือกจึงเข้ามามีบทบาทมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นการผลิตพลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น ซึ่งก็สอดคล้องกับนวัตกรรมของเทคโนโลยีในสมัยปัจจุบันที่ได้มีการออกแบบให้พัฒนาไปในทิศทางเดียวกันกับพลังงานตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ รถยนต์ที่เริ่มมีการเปลี่ยนจากการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมาใช้พลังงานไฟฟ้า (Electric Vehicle : EV)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 เป้าการอนุรักษ์พลังงานในรายภาคเศรษฐกิจ [1]

แต่เนื่องจากในปัจจุบันแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้ายังมีข้อจำกัดหลายอย่าง ตัวอย่างเช่น ช่วงเวลาการอัดประจุและช่วงเวลาการคายประจุที่ช้า มีอายุใช้งานจำกัด จึงต้องมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ใหม่ การศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อตอบสนองความต้องการและลักษณะในการใช้งานที่ทำให้ระบบกักเก็บพลังงานมีคุณภาพมากขึ้น

โครงการนี้จึงได้นำเสนอถึงการศึกษาร่วมกันของแหล่งกักเก็บพลังงาน 2 แหล่ง (Hybrid Energy Source) เพื่อหาการทำงานร่วมกันของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อจะสามารถลดเวลาในการอัดประจุลงได้ เนื่องจากนำตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้ในระบบกักเก็บพลังงานซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญและเป็นองค์ประกอบหลักในการอัดประจุไฟฟ้าลงไปยังขั้วของตัวเก็บประจุไฟฟ้า จึงทำให้ลดเวลาในการอัดประจุลงได้ นอกจากนี้การศึกษาคู่ผสมสมบัติของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อที่จะนำมาซึ่งการหาวิธีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับการนำแหล่งกักเก็บพลังงานทั้ง 2 แหล่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาความเหมาะสมในการใช้งานร่วมกันของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสานคือ แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด
2. เพื่อศึกษาวงจรไฟฟ้าในการเชื่อมต่อกันของแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน
3. เพื่อลดเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าของแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้า
4. เพื่อเพิ่มช่วงการทำงานของแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
5. เพื่อนำมาประยุกต์ในการผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการใช้งานร่วมกันของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อลดเวลาการอัดประจุของแหล่งกักเก็บพลังงานสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากมีรถยนต์พลังงานไฟฟ้าในระดับอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้น จึงต้องพัฒนาระบบกักเก็บพลังงานของระบบต่างๆ ให้ใช้เวลาในการอัดประจุที่ลดลง และในขณะเดียวกันต้องมีพลังงานที่เพียงพอต่อการใช้งานด้วย โดยการศึกษาวงจรอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อนำไปสู่การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังไฟฟ้าของแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสานได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาคุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Li-ion Battery) และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด (Ultracapacitor)
2. ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการใช้งานร่วมกันระหว่างแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้าประสิทธิภาพ
3. ศึกษาถึงกระบวนการอัดประจุและการคายประจุของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้าประสิทธิภาพที่นำมาใช้งานร่วมกัน
4. ศึกษาและออกแบบระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสานสำหรับการใช้งานร่วมกันของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด
5. ศึกษาและออกแบบวงจรอินเทอร์เฟสระหว่างแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้าประสิทธิภาพ
6. จำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม PSIM
7. จัดเตรียมและจัดหาอุปกรณ์ในงานวิจัย
8. ทำการทดลองและสรุปผล
9. รวบรวมข้อมูลการทดลองและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ทางผู้จัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทำความเข้าใจในทฤษฎี ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ พร้อมทั้งดำเนินงานในส่วนของการทดสอบและออกแบบ โดยมีระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่ สิงหาคม 2559 ถึง พฤษภาคม 2560 รวมเป็นเวลา 10 เดือน โดยมีแผนการดำเนินโครงการดังนี้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูล, คุณสมบัติ, รุ่นและราคาของ Ultracapacitor และ Battery แต่ละชนิด และหาวงจร Interface ระหว่าง Ultracapacitor และ Battery										
2. ศึกษาวงจร Interface ทดลอง Simulink วงจร										
3. ปรับแก้ไขวงจรเพื่อนำไป ทำการ Simulation										
4. ทำการ Simulation วงจรในโปรแกรม PSIM										
5. หาข้อผิดพลาดในการ Simulation และแก้ไข										
6. ทำการทดสอบประสิทธิภาพของวงจร										
7. เปรียบเทียบผลตอบสนองกับผลการ Simulation วงจรInterface ในโปรแกรม PSIM										
8. บันทึกผลการทดลองและสรุปผลงานวิจัย										
9. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้รู้คุณลักษณะของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและตัวเก็บประจุฟ้ายิ่งยวด
2. สามารถนำข้อมูลคุณลักษณะที่ศึกษาได้มาออกแบบวงจรที่เชื่อมต่อกันระหว่างแหล่งกักเก็บไฟฟ้าแบบผสมผสาน ทำให้ได้แหล่งกักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง
3. การทำงานร่วมกันของแหล่งกักเก็บพลังงาน2แหล่งทำให้สามารถลดเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าได้ และได้ช่วงการทำงานที่เพิ่มขึ้นของรถพลังงานไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาของระบบกักเก็บพลังงาน และเนื้อหาองค์ความรู้เกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานที่จำเป็นต่อการศึกษาคำนำตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาใช้ร่วมกับแบตเตอรี่ โดยจะมุ่งเน้นศึกษาไปที่แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน เพื่อพัฒนาแหล่งกักเก็บพลังงานสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

2.2 ระบบกักเก็บพลังงาน (ESS: Energy Storage Systems)

ระบบกักเก็บพลังงาน คือ การกักเก็บพลังงานส่วนเกินจากที่ผลิตได้ แล้วนำมาใช้ในวันจำเป็น เพื่อรักษาสมดุลของการผลิตกับการบริโภคพลังงานที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับแล้วก็คล้ายคลึงกับการออมทรัพย์เพื่อเก็บสำรองไว้ใช้เมื่อยามขาดแคลน แต่แตกต่างกันตรงที่รูปแบบเทคโนโลยีของระบบการเก็บสะสมทางพลังงานนั้นมีหลากหลายรูปแบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแหล่งพลังงานตั้งต้นกับการนำไปประยุกต์ใช้

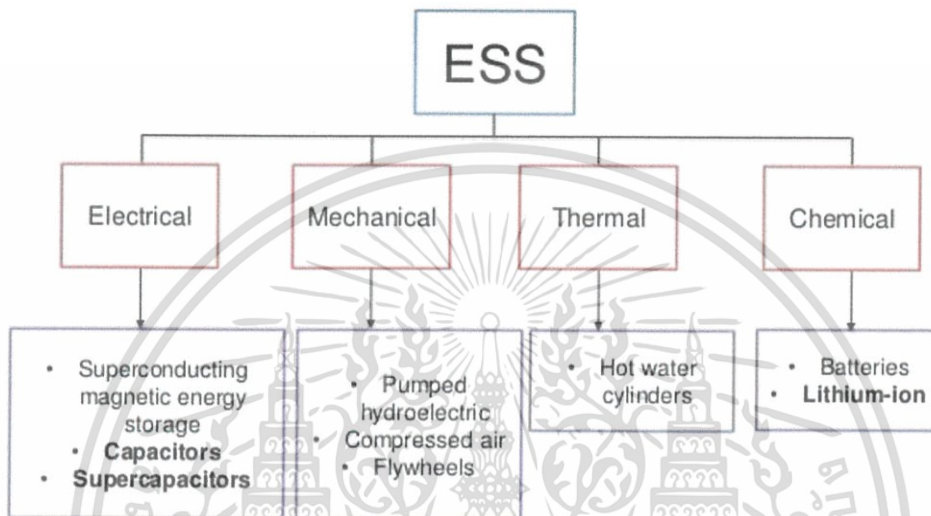
เมื่อจำแนกตามลักษณะรูปแบบของพลังงานที่บริโภคกันอยู่ในชีวิตประจำวัน โดยผ่านองค์ความรู้ของเราในรูปแบบของเทคโนโลยี สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ พลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า (Thermal and Electricity) สำหรับแหล่งพลังงานที่เรานำมาใช้เพื่อผลิตพลังงานทั้ง 2 รูปแบบนี้ มาจากแหล่งพลังงานฟอสซิล (Primary Energy Sources) และแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Secondary Energy Sources) โดยระบบกักเก็บพลังงานนี้จะมีหน้าที่สำคัญในการเสริมสร้างเสถียรภาพให้แก่ระบบการผลิตพลังงาน ณ ช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งมีอัตราการบริโภคพลังงานที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

เทคโนโลยีของระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage Technology) ที่นำมาเก็บพลังงานตั้งต้นนี้ สามารถจำแนกได้ตามรูปแบบของพลังงานที่นำมาใช้ในชีวิตประจำวัน อันได้แก่ พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยรูปแบบของเทคโนโลยีในการกักเก็บพลังงานสามารถจำแนกเป็น 5 กลุ่มใหญ่ ดังรูปที่ 1 โดยเทคโนโลยีของการกักเก็บพลังงานที่เก่าแก่นั้นเกิดขึ้นเมื่อ 1 พันล้านปีมาแล้ว ด้วยจุดประสงค์ที่นำไปประยุกต์ใช้ในการเกษตร และการป้องกันอาณาเขต โดยเทคโนโลยีที่ใช้นั้นมีรูปแบบที่ไม่ซับซ้อนมากนักเมื่อเทียบกับปัจจุบัน เช่น การกักเก็บน้ำไว้บนที่สูง เพื่อขยายพื้นที่เพาะปลูกให้มากขึ้น หรือการนำก้อนหินไปเก็บรวมกันบนบ่อมปรการ เพื่อใช้เป็นอาวุธในสงครามปกป้องอาณาเขต เป็นต้น แต่เมื่อมีการค้นพบพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีความสะดวกสบายในการใช้งาน จึงทำให้เกิดการพัฒนาเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆให้สอดคล้องกับรูปแบบของพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งระบบของการกักเก็บพลังงานก็มีความซับซ้อนมากขึ้นตามลำดับ [2]

ระบบกักเก็บพลังงานมีความจำเป็นสำหรับระบบไฟฟ้าในอนาคตเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากระบบกักเก็บพลังงานสามารถส่งเสริมให้ระบบผลิตไฟฟ้ามีเสถียรภาพและรักษาคุณภาพไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ยังเป็นส่วนสนับสนุนการเปลี่ยนโหลดทางไฟฟ้าไปสู่ช่วงเวลาที่เหมาะสม (Load Shifting) โดยระดับความไวในการจ่ายไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้าหลักมีตั้งแต่ ระดับมิลลิวินาที (ms) ระดับวินาที (s) ระดับนาที่ ไปจนถึงระดับชั่วโมง ทั้งนี้ บทบาทและวัตถุประสงค์ของระบบกักเก็บพลังงานแต่ละประเภทนั้นแตกต่างกันออกไป ระบบกักเก็บพลังงาน

สามารถถูกติดตั้งให้ทำงานร่วมกับองค์ประกอบต่างๆของระบบไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงานช่วยให้ระบบไฟฟ้าในทุกภาคส่วนมีเสถียรภาพ โดยจะทำหน้าที่เก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินในกรณีที่มีการผลิตไฟฟ้ามากกว่าความต้องการ ณ ขณะนั้น ในทางตรงกันข้าม เมื่อมีความต้องการไฟฟ้าสูงกว่าการผลิตไฟฟ้าในขณะนั้น ระบบกักเก็บพลังงานจะจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบ เป็นการรักษาคุณภาพไฟฟ้าและรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า [3]

Energy Storage Systems



รูปที่ 2.1 รูปแบบของเทคโนโลยีในการกักเก็บพลังงาน [4]

2.3 พารามิเตอร์ที่บ่งชี้ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงาน

2.3.1 อัตราการคายประจุหรืออัตราการซีเรท (Discharge rate or c-rate)

อัตราการคายประจุหรืออัตราการคายประจุ หรือที่เรียกว่า ซีเรท คือหน่วยของการอัดและคายประจุ จะคิดเป็นจำนวนเท่าของความจุของแบตเตอรี่ เป็นค่าที่บอกสมรรถนะทางด้านความจุของแบตเตอรี่เปรียบเทียบกับค่ากลาง เพื่ออธิบายถึงความจุที่มีค่าแตกต่างกัน เช่น ถ้ามีแบตเตอรี่ ขนาด 80 Ah คำว่า 1C คือ 80 Ah, คำว่า 0.5C คือ 40 Ah และคำว่า 2C คือ 160 Ah เป็นต้น

ค่าซีเรทของแบตเตอรี่ที่สูงยังเป็นการแสดงถึงความสามารถของแบตเตอรี่ที่สามารถจ่ายกระแสออกมามากกว่าค่าปกติ แบตเตอรี่ชนิดนี้ก็จะจะเป็นแบตเตอรี่แบบพิเศษ เช่น

คายประจุ ที่ 1C ก็คือมีการคายประจุกระแสที่ 80 แอมป์ ซึ่งจะใช้งานได้ 1 ชั่วโมง

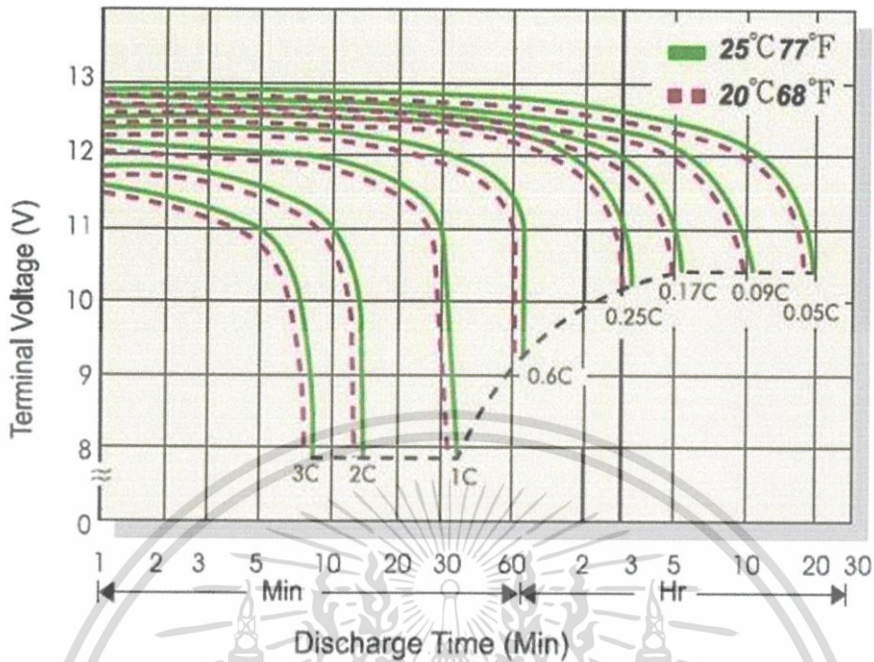
คายประจุ ที่ 0.5C ก็คือมีการคายประจุกระแสที่ 40 แอมป์ ซึ่งจะใช้งานได้ 2 ชั่วโมง

คายประจุ ที่ 2C ก็คือมีการคายประจุกระแสที่ 160 แอมป์ซึ่งจะใช้งานได้ 30 นาที

แบตเตอรี่ก็จะหมด การคายประจุที่ซีเรทมากขึ้นประสิทธิภาพจะลดลงและยังเป็นการบั่นทอนอายุการใช้งานของแบตเตอรี่อีกด้วย เช่นขนาด 80Ah ถ้า discharge ที่ 1C ในทางปฏิบัติแล้วมันจะจ่ายกระแสได้ไม่ถึง 1 ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการคายประจุที่อัตราการคายประจุใดๆนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ด้วย เช่น แบตเตอรี่ตะกั่วกรดไม่ควรเกิน 0.2C หรือ 20% ของความจุ เพราะฉะนั้นในทางปฏิบัติไม่ควรจะคายประจุในอัตราที่มากกว่า 1C เพราะ แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นหากคายประจุเล็กน้อยแล้วอัดประจุ จะทำให้อายุการใช้งานยืนยาวกว่าการคายประจุมากๆ หรือใช้ประจุจนหมดแล้วจึงอัดประจุทีเดียว [5]



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อระยะเวลาการคายประจุที่อัตราการคายประจุต่างๆ

2.3.2 ค่าความลึกของการคายประจุแบตเตอรี่และสถานการณ์อัดประจุเริ่มต้น

(Deep of Discharge: DOD and State of Charge: SOC)

สถานการณ์อัดประจุเริ่มต้น (State of Charge: SOC) คือ ค่าที่บอกความจุของแบตเตอรี่ในแต่เวลาที่ใช้งาน มีค่าเป็นอัตราส่วนระหว่างความจุของแบตเตอรี่ในขณะนั้นต่อความจุของแบตเตอรี่เมื่อประจุเต็ม เช่น แบตเตอรี่มี SOC 100% หมายความว่าแบตเตอรี่อยู่ในสถานะประจุเต็ม แบตเตอรี่มี SOC 50% หมายความว่าแบตเตอรี่มีความจุเหลืออยู่ 50%

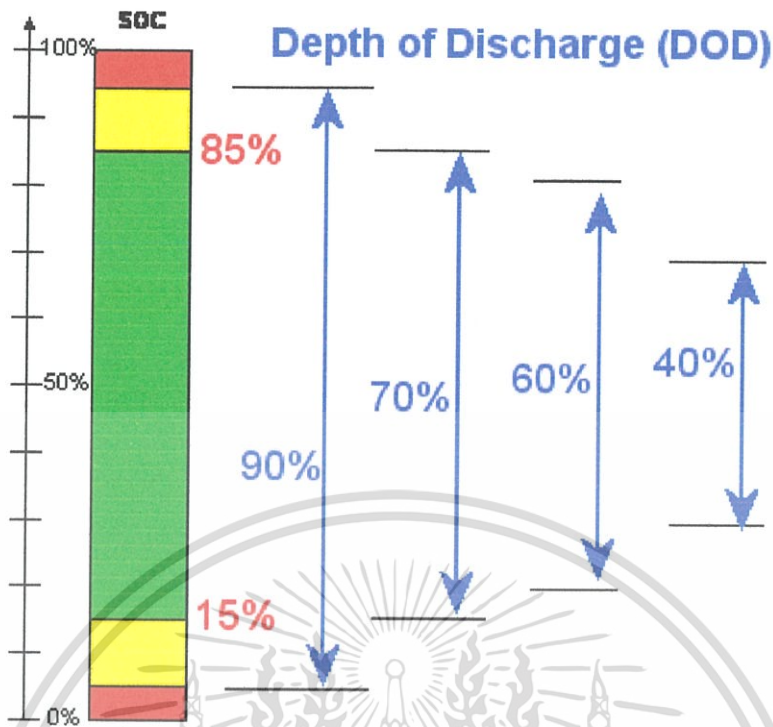
ค่าความลึกของการคายประจุแบตเตอรี่ (Deep of Discharge: DOD) คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ที่บ่งบอกถึงอัตราการคายประจุของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นการแสดงว่าแบตเตอรี่ได้คายพลังงานไปเท่าไร ณ ขณะนั้น

เมื่อแบตเตอรี่มีประจุเต็ม ค่า DOD จะมีค่าเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ และค่าสถานะอัดประจุเริ่มต้น (State of Charge: SOC) จะมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อแบตเตอรี่มีการคายประจุค่า DOD จะมีค่าเพิ่มขึ้น และค่า SOC จะลดลง ตามอัตราส่วนที่คายประจุ ซึ่งทั้งสองพารามิเตอร์มีความสัมพันธ์กัน ดังสมการที่ 2.1

$$DOD = 1 - SOC \quad (2.1)$$

โดยทั่วไปการใช้งานแบตเตอรี่เพื่อให้มีอายุการใช้งานที่นานนั้น เราไม่ควรให้งานจนกระทั่งแบตเตอรี่หมด นั่นคือค่า SOC = 0% หรือพูดอีกในนึ่งได้ว่า เราควรให้งานแบตเตอรี่อยู่ในช่วงค่า DOD ไม่ถึง 100% ดังแสดงในรูปที่ 2.3

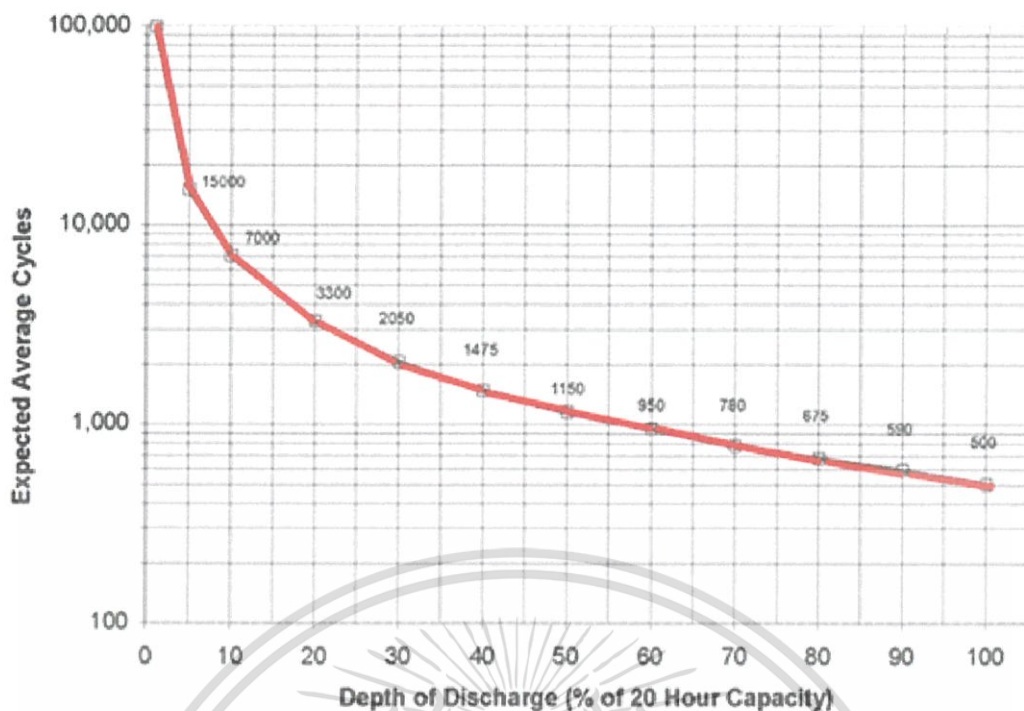
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงค่าSOC และ DOD ของช่วงการใช้งานต่างๆ

2.3.3 รอบการใช้งาน (Cycle)

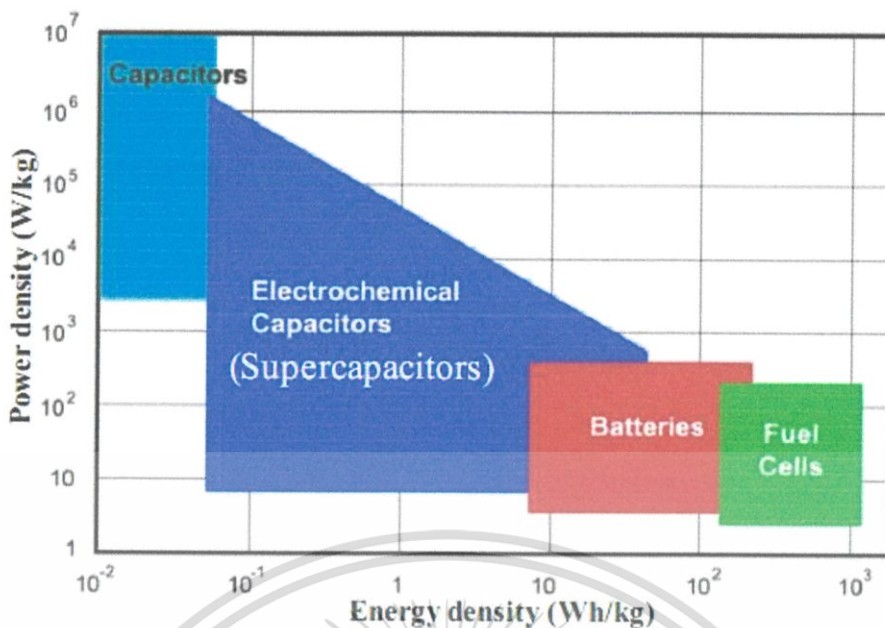
เมื่อชาร์จประจุแบตเตอรี่จนเต็ม แล้วนำไปใช้งาน และนำกลับมาชาร์จประจุใหม่จนเต็มอีกครั้งหนึ่งเรียกรอบการใช้งาน ในการใช้งานมีรอบการใช้งานสองลักษณะคืองานที่มีการคายประจุเล็กน้อย (Shallow cycle) และงานที่มีการคายประจุมาก (Deep cycle) การใช้งานแบตเตอรี่แบบไหนนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของเซลล์ และส่วนใหญ่จะไม่ใช้จนหมด การใช้งานที่มีการคายประจุมาก มักมีการคายประจุมากกว่า 50% ต่อรอบการใช้งานขึ้นไป รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกของการคายประจุแบตเตอรี่ (Deep of Discharge: DOD) ที่ใช้ต่อจำนวนรอบการใช้งาน (Cycle) ของแบตเตอรี่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้งานของแบตเตอรี่ที่ค่าความลึกของการคายประจุแบตเตอรี่นั้นเป็นลดทอนอายุการใช้งานของแบตเตอรี่



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกของการคายประจุแบตเตอรี่ (Deep of Discharge) ที่ใช้ต่อจำนวนรอบการใช้งาน (Cycle) ของแบตเตอรี่ [6]

2.3.4 ค่าความหนาแน่นของพลังงาน (Energy density)

ค่าความหนาแน่นของพลังงาน คือ ค่าที่ใช้วัดความสามารถการจ่ายพลังงานต่อน้ำหนักของแบตเตอรี่มวลหนึ่งกิโลกรัมของวัสดุหรือระบบกักเก็บพลังงาน มีหน่วยเป็น วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม (WH/kg) เช่น แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด มีขนาดเป็น 20-30 WH/kg แบตเตอรี่แบบลิเทียมโพลิเมอร์ มีขนาดเป็น 160 WH/kg จะเห็นได้ว่า ถ้าแบตเตอรี่แบบลิเทียมโพลิเมอร์มีน้ำหนักเท่ากับแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดหนึ่งกิโลกรัม แบตเตอรี่แบบลิเทียมโพลิเมอร์สามารถจ่ายพลังงานได้มากกว่าห้าเท่า จากรูปที่ 2.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าชนิดต่างๆ [7]

2.4 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม (Lithium Battery)

2.4.1 ที่มาของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม แบตเตอรี่ลิเทียมเป็นแบตเตอรี่ที่มีการประดิษฐ์ขึ้นมาในปี ค.ศ.1970 โดยเริ่มมาจากการผลิตเซลล์ปฐมภูมิ (Primary Cell) ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดเซลล์ปฐมภูมิคือแบตเตอรี่ชนิดใช้แล้วทิ้ง โดยเหตุผลหลักที่ลิเทียมเป็นองค์ประกอบหลักเนื่องมาจากลิเทียม เป็นโลหะที่เบาที่สุดที่สามารถให้แรงดันไฟฟ้าได้สูงที่สุด โดยเมื่อเทียบความหนาแน่นของพลังงานแล้วถือว่ามีความหนาแน่นของพลังงานสูงในน้ำหนักที่เท่ากัน โดยเริ่มแรกโลหะชนิดลิเทียมมีข้อจำกัดในการอัดประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่เนื่องจากโลหะลิเทียมมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีเป็นอย่างมากซึ่งทำให้มีอันตรายในการใช้สูง ภายหลังจึงได้มีการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมให้อยู่ในรูปของลิเทียมไอออนแทนโลหะชนิดลิเทียม ทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งานมากขึ้น ภายหลังในปี ค.ศ.1991 บริษัท Sony จึงเป็นผู้นำ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนออกสู่ตลาดเป็นเจ้าแรก

โดยแบตเตอรี่ในเซลล์ของลิเทียมไอออนมีค่าความหนาแน่นทางพลังงานสูงกว่าเซลล์ชนิดนิกเกิล แคดเมียม ถึง 2-3 เท่า จึงทำให้ปัจจุบันนี้แบตเตอรี่ในเซลล์ในแพ็คเกจแบตเตอรี่จึงใช้เพียงแค่ว่าเซลล์เดียวก็สามารถให้พลังงานกับมือถือได้อย่างเพียงพอและไม่มีปัญหาเรื่องความจำของแบตเตอรี่ จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องล้างแบตเตอรี่ (การใช้แบตเตอรี่ให้หมด) อย่างที่ต้องทำในแบตเตอรี่รุ่นก่อนๆ [8]

โดยข้อจำกัดของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม คือมีความไวต่อปฏิกิริยาสูง จึงต้องให้มีการจำกัดการใช้งานอยู่ในช่วงแรงดัน, อุณหภูมิ, และกระแส ที่เหมาะสม ดังนั้นภายในแพ็คเกจแบตเตอรี่จึงต้องมี วงจรจำกัดแรงดันสูงสุดและต่ำสุด วงจรป้องกันกระแสเกิน และวงจรวัดอุณหภูมิขณะใช้งานอยู่ไม่ให้เกินขีดความสามารถของแบตเตอรี่ ซึ่งด้วยปัจจัยที่กล่าวมานี้ทำให้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมมีราคาที่สูง ทำให้มี ข้อจำกัดในด้านเศรษฐศาสตร์ว่าคุ้มค่าต่อการลงทุนใช้หรือไม่

อีกหนึ่งประเด็นที่น่าสนใจก็คือ อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลิเทียม ซึ่งปกติแล้วผู้ผลิตเซลล์ แบตเตอรี่มักไม่พูดถึงเรื่องการใช้งานเลย ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วแบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ (Secondary Cell) จะสูญเสียความจุไปตามเวลาหลังจากกระบวนการผลิตอยู่แล้วดังนั้นไม่ว่าจะใช้งานอย่างต่อเนื่องหรือไม่ก็ตามก็จะใช้งานไม่ได้หลังจากผ่านไป 2-3 ปี ดังนั้นถ้าต้องการเก็บรักษาแบตเตอรี่ไว้เป็นเวลานานจึงต้อง รักษาแบตเตอรี่ไว้ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมซึ่งจะกล่าวต่อไปภายหลัง

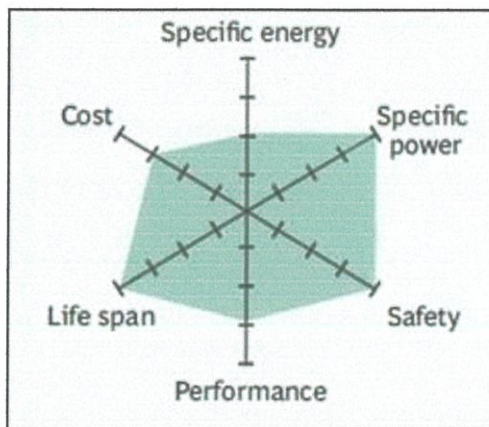
2.4.2 ชนิดของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ ประเภทแรกคือแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน (Lithium-ion Battery) ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นสารออกไซด์ผสมกับลิเทียม และประเภทที่สองคือแบตเตอรี่โพลีเมอร์ซึ่งมีรายละเอียดแบ่งตามประเภทดังนี้ [9]

2.4.2.1 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion) เป็นแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูง มีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้มีความมั่นใจได้ว่ามีความปลอดภัยต่อการนำไปใช้งานสูง ดังเช่นที่เห็นในการใช้งานในปัจจุบันเช่น โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น โดยแบตเตอรี่ชนิดนี้มีวงจรป้องกันต่างๆ (Protection Circuits) เพื่อที่จะจำกัดแรงดัน จำกัดกระแส ขณะทำการอัดและคายประจุไฟฟ้า รวมไปถึงวงจรที่ใช้ในการตรวจสอบอุณหภูมิว่ามีช่วงการใช้งานอุณหภูมิที่เหมาะสมหรือไม่ โดยข้อดีของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ มีความหนาแน่นของพลังงานสูง ค่าดูแลรักษาต่ำ ไม่มีผลกระทบต่อความจำของแบตเตอรี่ และมีผลจากการคายประจุของตัวเอง (Self Discharge) ต่ำ โดยแบตเตอรี่ชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นการใช้งานกับพวกอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น คอมพิวเตอร์ โน้ตบุ๊ก โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น สามารถแบ่งแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ได้เป็นชนิดย่อย ๆ ดังนี้ [10]

1. แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต (Lithium-ion Phosphate : LiFePO₄ or LFP)

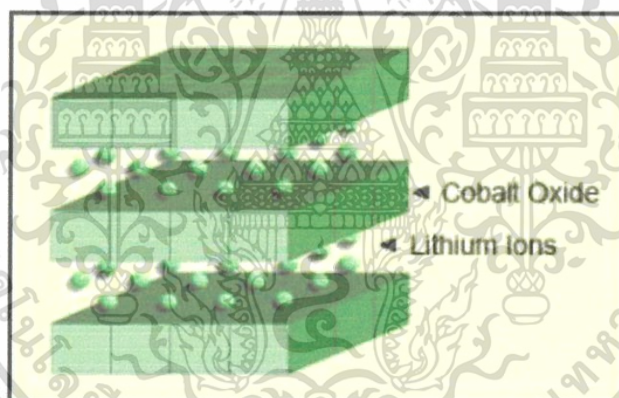
เป็นแบตเตอรี่ตระกูลลิเทียมไอออนถูกคิดค้นขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2534 มีข้อดีที่โดดเด่นคือด้านความปลอดภัย เนื่องจากมีความเสถียรกว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนธรรมดา นอกจากนี้ยังมีความทนทานเนื่องจากมี วงจรอายุสูงถึง 2000 รอบทำให้สามารถใช้งานได้ยาวนาน แต่ข้อเสียที่ชัดเจนคือมีความจุต่ำกว่าแบตเตอรี่ ลิเทียมไอออนธรรมดาถึง 40% ดังนั้นที่แบตเตอรี่ขนาดเท่ากัน แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟตจะมี ความจุที่ต่ำกว่า จึงทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้ไม่นิยมนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้พกพา นอกจากนี้ คือแบตเตอรี่ชนิดนี้มีแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนธรรมดา ซึ่งถ้านำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องออกแบบวงจรอัดกระแสใหม่ จึงเป็นอีกเหตุผลที่ไม่นิยมใช้ในอุปกรณ์ประเภทพกพา แต่จะได้รับความนิยมในงานด้านอื่น ๆ เช่น รถยนต์ไฟฟ้า จักรยานไฟฟ้า และอุปกรณ์ทางวิศวกรรม เป็นต้น รูปที่ 2.6 จะแสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าใช้จ่าย, อายุการใช้งาน, ความ หนาแน่นของพลังงาน รวมไปถึงความปลอดภัยเพื่อใช้ในการพิจารณาว่าเหมาะสมแก่การลงทุนและการใช้ งานหรือไม่



รูปที่ 2.6 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต [10]

2. แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Cobalt Oxide)

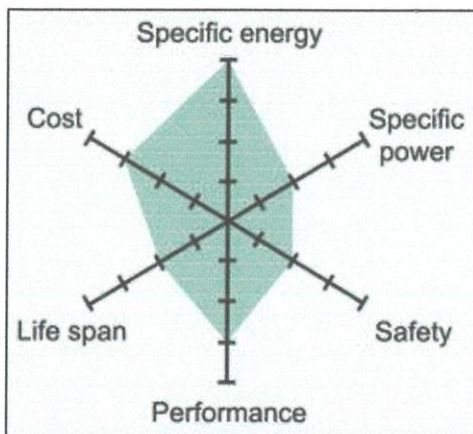
เป็นแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูงนิยมนำมาใช้ในพวกโทรศัพท์มือถือ, คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก, กล้องดิจิทัล โดยภายในแบตเตอรี่ประกอบไปด้วยโคบอลต์ออกไซด์ในฝั่งแคโทด (Cathode) และแกรไฟต์คาร์บอน (Graphite Carbon) ในฝั่งแอโนด (Anode) แต่ข้อจำกัดของการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดนี้ คือ มีช่วงอายุการใช้งานค่อนข้างสั้น มีช่วงการใช้งานอุณหภูมิค่อนข้างแคบ ทนอุณหภูมิสูงไม่ได้ และจำกัด ประเภทของโหลดการใช้งาน



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนโคบอลต์ออกไซด์ [10]

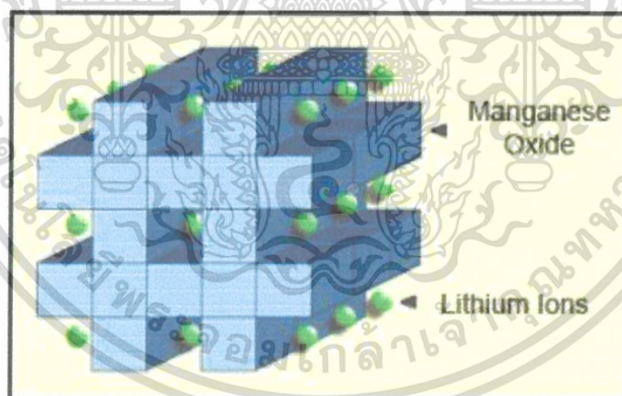
นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังไม่สามารถทนกระแสไฟฟ้าสูงได้ ดังนั้นการบังคับอัดประจุ เพื่อให้แบตเตอรี่เต็มในเวลารวดเร็วจะทำให้เกิดอุณหภูมิสูงเกินและความเครียดไปตามมา ส่งผลให้เกิด ความเสียหายต่อตัวแบตเตอรี่ได้ดังนั้นการใช้งานแบตเตอรี่นี้ควรจะใช้ในการอัดประจุที่ปลอดภัย (1C) รูปที่ 2.8 จะแสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าใช้จ่าย, อายุการใช้งาน, ความหนาแน่นของพลังงาน รวมไปถึงความปลอดภัยเพื่อใช้ในการพิจารณาว่าเหมาะสมแก่การลงทุนและการใช้งานหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมชนิดไอออนโคบอลต์ออกไซด์ [10]

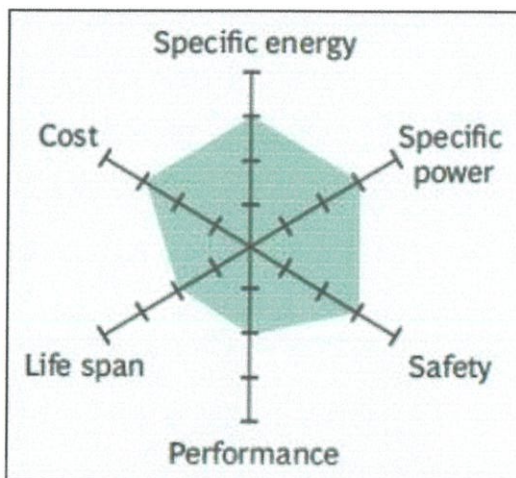
3. แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดแมงกานีสออกไซด์ (Lithium Manganese Oxide) มีการศึกษาและนำออกมาสู่ตลาดในปี ค.ศ. 1983 โดยใช้แมงกานีสออกไซด์ด้านแคโทด โดยได้มีการพัฒนามาเรื่อยๆ ทำให้มีความต้านทานภายในที่ต่ำ มีความสามารถในการทนความร้อนได้สูง และมีการพัฒนาเกี่ยวกับความปลอดภัยอยู่เสมอ แต่มีข้อจำกัดคือมีรอบการใช้งานค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้มีอายุการใช้งานต่ำไปด้วยเนื่องด้วยแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่มีความต้านทานภายในต่ำจึงทำให้ตัวแบตเตอรี่ มีคุณสมบัติที่สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้เร็ว และสามารถคายประจุแบตเตอรี่ที่กระแสสูงได้ โดย แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแมงกานีสออกไซด์นั้นนิยมใช้ในอุปกรณ์ด้านพลังงาน, อุปกรณ์ทางการแพทย์ , และอุปกรณ์จำพวกยานพาหนะ เป็นต้น



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของลิเทียมไอออนแมงกานีสออกไซด์ [10]

โดยในด้านของความสามารถในการจุนั้นแบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีความจุที่ต่ำกว่า แบตเตอรี่ ชนิดลิเทียมโคบอลต์ รูปที่ 2.10 จะแสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าใช้จ่าย, อายุการใช้งาน, ความหนาแน่นของพลังงาน รวมไปถึงความปลอดภัยเพื่อใช้ในการพิจารณาว่าเหมาะสมแก่การลงทุนและการใช้งานหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

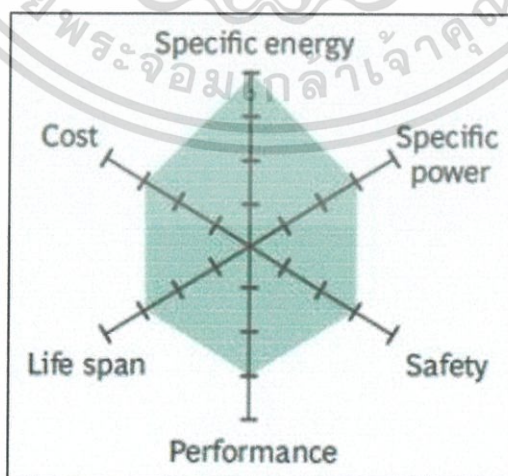


รูปที่ 2.10 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแมงกานีสออกไซด์ [10]

4. แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide)

เกิดเนื่องมาจากผู้พัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนี้ได้ เล็งเห็นว่าการนำนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์มาใช้ในด้านแคโทดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้น มีความคล้ายคลึงกับการใช้ลิเทียมคู่กับแมงกานีส โดยจุดเด่นของแบตเตอรี่ชนิดนี้อยู่ที่ความเป็นเกลือจากแมงกานีส โดยรู้กันดีอยู่แล้วว่านิเกิลให้พลังงานที่สูงแต่มีความเสถียรต่ำ แมงกานีสที่เพิ่มเข้ามาจะช่วยปรับปรุงในด้านของโครงสร้าง ซึ่งส่งผลให้แบตเตอรี่ที่ได้มีความต้านทานภายในที่ต่ำทำให้ทำงานได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้แบตเตอรี่มีโครงสร้างภายในที่แข็งแรงยิ่งขึ้น แต่ข้อเสียที่ตามมาคือจะทำให้ความหนาแน่นของพลังงานต่ำลงนั่นเอง

สำหรับการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดนี้นิยมใช้งานกับจักรยานพลังงานไฟฟ้า , รถไฟฟ้า และ ยานพาหนะต่างๆ โดยด้านแคโทดจะมีส่วนผสม ของแมงกานีสและโคบอลต์ รูปที่ 2.11 จะแสดงถึงการ เปรียบเทียบระหว่าง ค่าใช้จ่าย, อายุการใช้งาน, ความหนาแน่นของพลังงาน รวมไปถึงความปลอดภัยเพื่อ ใช้ในการพิจารณาว่าเหมาะสมแก่การลงทุนและการใช้งานหรือไม่

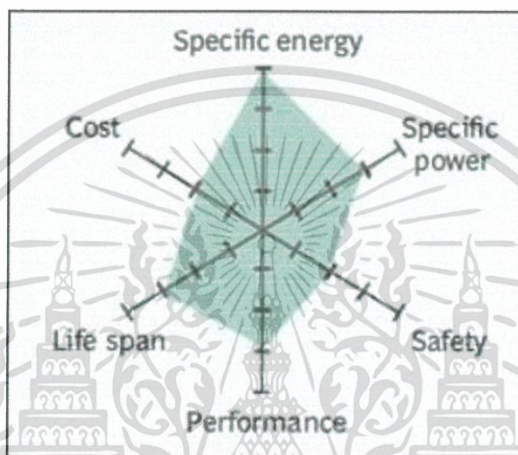


รูปที่ 2.11 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์

[10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

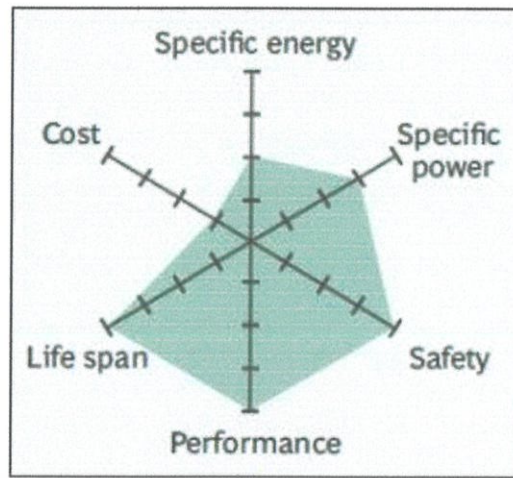
แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมนิเกิลโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide) มีการคิดค้นขึ้นมาในปี ค.ศ. 1999 ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวคล้ายกับ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide : LiNiMnCoO₂ or NMC) นั่นคือมีคุณสมบัติทางด้านพลังงานสูง มีอายุการใช้งานสูง โดยได้มีการนำไปใช้ในรถ po9N ไฟฟ้าของบริษัท Tesla ซึ่งคุณสมบัติเด่นของแบตเตอรี่ประเภทนี้คือ มีความปลอดภัยสูงและราคาต่ำกว่าประเภทอื่น รูปที่ 2.12 จะแสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าใช้จ่าย, อายุการใช้งาน, ความหนาแน่นของพลังงาน รวมไปถึงความปลอดภัยเพื่อใช้ในการพิจารณาว่าเหมาะสมแก่การลงทุนและการใช้งานหรือไม่



รูปที่ 2.12 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ [10]

5. แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไททาเนต (Lithium Titanate)

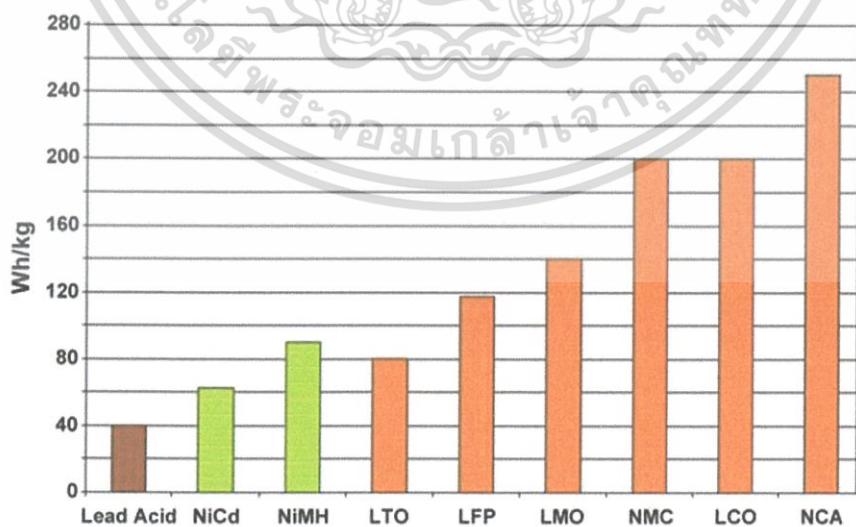
มีการคิดค้นขึ้นมาในปี ค.ศ. 1980 ซึ่งนำมาใช้แทนแกรไฟต์ในด้านแอโนด ซึ่งคุณสมบัติเด่นของมันคือสามารถอัดและคายประจุได้เร็วขึ้นที่กระแสสูงถึง 10C ซึ่งถือว่าสูงกว่าลิเทียมไอออนธรรมดา และยังมีความปลอดภัยสูง ในการคายประจุนั้นมีกระบวนการที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่ข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือมีราคาค่อนข้างสูง ซึ่งอาจทำให้ไม่คุ้มค่ากับการลงทุน และมีความหนาแน่นของพลังงานค่อนข้างต่ำ รูปที่ 2.13 จะแสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าใช้จ่าย, อายุการใช้งาน, ความหนาแน่นของพลังงาน รวมไปถึงความปลอดภัยเพื่อใช้ในการพิจารณาว่าเหมาะสมแก่การลงทุนและการใช้งานหรือไม่



รูปที่ 2.13 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไททาเนต [10]

2.4.2.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนโพลิเมอร์ (Lithium-ion Polymer) แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนโพลิเมอร์ถูกพัฒนาขึ้นมาในปี ค.ศ. 1970 โดยมีสองแบบคือแบบแข็ง และแบบแห้ง คล้ายฟิล์มพลาสติก โดยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดโพลิเมอร์ มีความโดดเด่นในเรื่องของ ความบาง และเบา นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการคงอายุการใช้งานที่ดี มีความปลอดภัยสูง แต่ข้อเสียก็คือมีราคาสูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน และมีความหนาแน่นทางพลังงานที่ต่ำกว่า โดยเราจะขอกล่าวถึงชนิดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโพลิเมอร์ไว้เพียงเท่านี้เนื่องจากการ ทดลองเราใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในการทดลองจึงจะไม่ลงลึกในทฤษฎีของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โพลิเมอร์

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่า แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมนิคเกิลโคบอลต์อัลูมิเนียมออกไซด์ (Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide : NCA) นั้นมีค่าสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในกลุ่มแมงกานีสและแบตเตอรี่ในกลุ่มฟอสเฟต นั้นถือได้ว่าเป็นแบตเตอรี่ที่มีความได้เปรียบด้านความเสถียรในแง่ของความร้อนในการใช้งานและค่าความหนาแน่นของกำลังมากกว่า และแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไททาเนต (Lithium Titanate : LTO) นั้นก็มีข้อดีเรื่องอายุการใช้งานที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.14 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Ultracapacitor)

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่กำลังมาแรงความต้องการทางด้านพลังงานของโลก ในปัจจุบันมีค่าสูงกว่าหลักพันล้านล้านปีที่อยู่ต่อไป และยังคงเพิ่มขึ้นอีกอย่างรวดเร็ว Energy Information Administration (EIA) ของสหรัฐอเมริกา ได้คาดการณ์ว่าในอีก 30 ปีข้างหน้า โลกเรา จะมีความต้องการด้านพลังงานเพิ่มขึ้นอีกถึง 56% ซึ่งเกิดจากหลายสาเหตุ ไม่ว่าจะเป็นความก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี จำนวนประชากรโลกที่เพิ่มขึ้น หรือผลของโลกาภิวัตน์ (globalization) ซึ่งทำให้อุตสาหกรรมด้านการคมนาคมและขนส่งเติบโตอย่างรวดเร็ว พลังงานไฟฟ้า เป็นรูปแบบของพลังงานที่มีอัตราการความต้องการเพิ่มขึ้นสูงที่สุด โดยระหว่างปี 2010 ถึง 2040 จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นถึงปีละ 2.2% ดังนั้นในอนาคตอันใกล้นี้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจะมีบทบาทที่สำคัญยิ่งขึ้น [11]

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่กำลังได้รับความนิยมอย่างมาก คือ supercapacitor หรือเรียกอีกชื่อว่า ultracapacitor หรือ electrochemical capacitor และในภาษาไทยเรียกว่า ตัวเก็บประจุยิ่งยวด อุปกรณ์ชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษตรงที่มีค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) สูงกว่าตัวเก็บประจูนอื่นๆ มากถึง 100-10,000 เท่า อีกทั้งยังสามารถอัดประจุให้เต็มได้ภายในเวลาอันรวดเร็วเพียง 1-10 วินาที เทียบกับ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนซึ่งต้องใช้เวลานานโดยเฉลี่ย 10-60 นาที และ การคายประจุก็สามารถทำได้ภายในเวลา 1 วินาทีเช่นกัน จุดเด่นอีกประการของตัวเก็บประจุยิ่งยวด คือ เราสามารถที่จะอัดและคายประจุได้กว่า 500,000 รอบ มากกว่าความสามารถของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถึง 100 เท่า และมากกว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (lead-acid battery) 1,000 - 10,000 เท่าเลยทีเดียว นอกจากนี้ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด มีราคาต่อ kW ที่ต่ำ (US\$25-50/kW) เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (US\$75-150/kW) และยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแรงกระแทก และการสั่นสะเทือนได้ดีอีกด้วย ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นเช่นนี้ กอปรกับงานวิจัยและพัฒนาคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ที่กำลังก้าวไปอย่างรวดเร็ว จึงไม่น่าแปลกใจที่อุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าชนิดนี้จะได้รับความนิยมอย่างมาก มีการทำนายว่าในอีก 10 ปีข้างหน้า ตัวเก็บประจุยิ่งยวดอาจชิงตลาดจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้ถึง 50% เลยทีเดียว



รูปที่ 2.15 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดรูปทรงต่างๆ

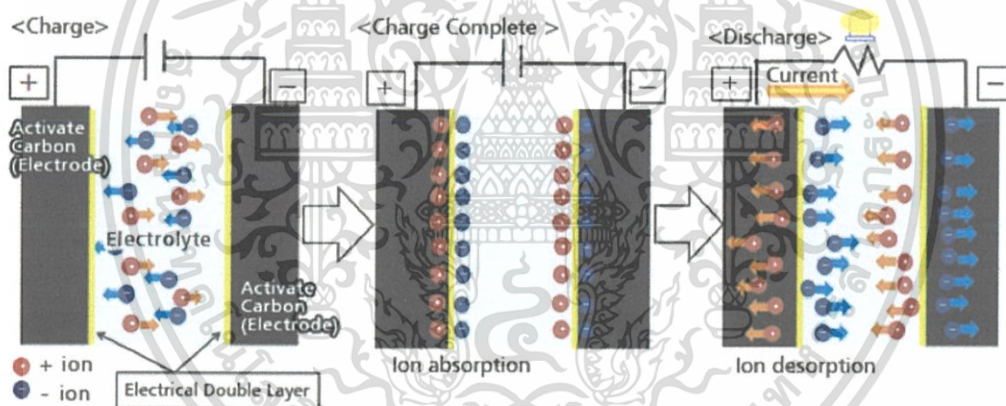
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดคืออะไร

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีส่วนประกอบหลัก คือ

1. ขั้วบวกและลบ มักทำด้วยคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวสูง มีรูพรุนจำนวนมาก เช่น activated carbon
2. แผ่นกั้นระหว่างขั้ว (separator) ซึ่งไอออนสามารถผ่านได้เช่นเดียวกับแบตเตอรี่
3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ซึ่งมักจะเป็น acetonitrile หรือ polycarbonate

เมื่อให้ความต่างศักย์หรือกระแสไฟฟ้ากับขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้าง เช่น เมื่อต่อตัวเก็บประจุยิ่งยวดเข้ากับแบตเตอรี่ ประจุที่เป็นบวกภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะถูกดึงดูดเข้าหาขั้วลบของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและประจุที่เป็นลบในสารละลายก็จะเข้าไปหาขั้วบวก การที่ใช้คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการกักเก็บประจุ เนื่องจากประจุของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถที่จะแทรกตัวเข้าไปในรูพรุนได้ จึงมีจุดที่มีการดึงดูดกันระหว่างประจุบวกและลบเพิ่มขึ้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจึงเสมือนกับการนำตัวเก็บประจุแบบธรรมดา (capacitor) ขนาดเล็กๆ มารวมด้วยกันจำนวนมาก รูปที่ 2.16 แสดงการกระจายตัวของประจุภายในตัวเก็บประจุยิ่งยวดขณะอัดประจุ เมื่ออัดประจุจนเต็มแล้ว และขณะคายประจุ



รูปที่ 2.16 ลักษณะการกระจายตัวของประจุขณะกำลังอัดประจุ (ซ้าย) เมื่ออัดประจุจนเต็ม (กลาง) และเมื่อคายประจุ (ขวา)

ในปัจจุบันมีผู้ผลิตและจำหน่ายตัวเก็บประจุยิ่งยวดจำนวนมาก และมีหลายรูปทรงให้เลือกตามการใช้งาน เช่น ทรงกระบอก (cylindrical) ทรงเหลี่ยม (prismatic) ทรงกระดุม (button) และแบบถุง (pouch) ภายในตัวเก็บประจุประกอบไปด้วยแผ่นโลหะที่มีการเคลือบวัสดุคาร์บอนชั้นบางๆ ประกบกับแผ่นกั้นซ้อนกัน และม้วนเข้าด้วยกัน (ทรงกระบอก) หรือตัดให้ได้ขนาดและซ้อนทับกันเพื่อให้ได้ทรงเหลี่ยม กระดุมหรือถุง ดังแสดงในรูปที่ 2.17

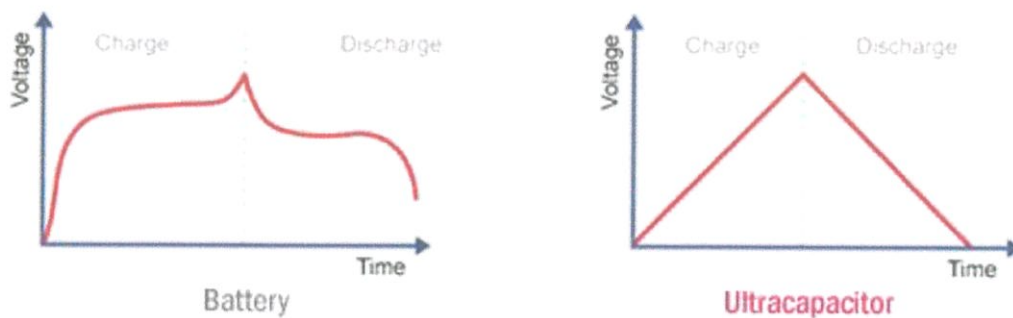


รูปที่ 2.17 ลักษณะภายในของตัวเก็บประจุทรงกระบอก (ซ้าย) และทรงเหลี่ยม (ขวา)

ข้อแตกต่างที่สำคัญประการหนึ่งระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่กล่าวมาคือ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดไม่อาศัยปฏิกิริยาทางเคมีในการเก็บพลังงาน หากแต่ใช้แรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic charge) ระหว่างประจุต่างขั้วกัน ในขณะที่แบตเตอรี่ทุกชนิดอาศัยปฏิกิริยาเคมีนี้คือสาเหตุหนึ่งที่ว่าตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีอายุตามจำนวนรอบการใช้งานที่มากกว่า เนื่องจากไม่เกิดการเสื่อมสภาพจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์ นอกจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักและไม่อาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีแล้วยังมีตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ทำงานโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีอีกด้วย(เรียกว่า pseudocapacitor) โดยส่วนใหญ่แล้วตัวเก็บประจุประสิทธิภาพสูงแบบที่อาศัยปฏิกิริยาจะมีขั้วข้างหนึ่งเป็นคาร์บอนเช่นเดิม แต่ขั้วอีกข้างหนึ่งทำจากวัสดุเช่นโลหะออกไซด์ เมื่อใช้งานจะมีปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นที่พื้นผิวอย่างรวดเร็วที่ขั้วโลหะออกไซด์ จุดประสงค์ที่เพิ่มขั้วที่เกิดปฏิกิริยานั้นก็เพื่อเพิ่มความจุไฟฟ้าและ/หรือแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (nominal voltage) ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั่นเอง

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดอีกชนิดที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากคือตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-Ion Capacitor) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่น่าเอาข้อดีของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเข้าไว้ด้วยกันตัวเก็บประจุชนิดนี้มีขั้วข้างหนึ่งเป็นวัสดุคาร์บอนเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุยิ่งยวดอื่นๆ แต่ขั้วอีกข้างหนึ่งทำจากวัสดุที่ใช้เป็นขั้วของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีไอออนของลิเทียมเช่นเดียวกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดลิเทียมไอออนมีคุณสมบัติที่โดดเด่นคือ ให้กำลังไฟฟ้าสูง สามารถคายประจุได้ที่อัตราถึง 200C อัดและคายประจุได้ถึงหลัก 100,000 รอบ มีค่าแรงดันเฉลี่ยถึง 3.8-4.0 V ก็เก็บพลังงานไฟฟ้าได้มากและมีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขณะอัดและคายประจุ ต่างจากตัวเก็บประจุซึ่งมีแรงดันที่เพิ่มขึ้นและลดลงเป็นเชิงเส้นตามเวลาขณะอัดและคายประจุตามลำดับ รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบพฤติกรรมของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุขณะอัดและคายประจุด้วยกระแสคงที่ (constant current charge/discharge) และตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดทางเทคนิคของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีในตลาด สังเกตได้ว่าตัวเก็บประจุยิ่งยวดทุกตัวจะมีค่าความจุไฟฟ้าและกำลังจำเพาะสูง (หน่วยเป็น W/kg) ส่วนตัวเก็บประจุยิ่งยวด 2 รุ่นสุดท้ายมีแกรไฟต์เป็นขั้วข้างหนึ่ง เป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดลิเทียมไอออน ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่ารุ่นอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (ซ้าย) และตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ขวา) ขณะอัดและคายประจุ

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบรายละเอียดทางเทคนิคของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในตลาด

Device	V_{nom}	C (F)	R (m Ω)	RC (s)	Wh/kg ^a	W/kg (95%) ^b	W/kg match, imped.	Wgt. (kg)	Vol. lit.
Maxwell ^c	2.7	2885	.375	1.08	4.2	994	8836	.55	.414
Maxwell	2.7	605	.90	.55	2.35	1139	9597	.20	.211
ApowerCap ^d	2.7	55	4	2.2	5.5	5695	50625	.009	-
ApowerCap ^d	2.7	450	1.4	.58	5.85	2574	24,595	.057	.045
Ness	2.7	1800	.55	1.00	3.6	975	8674	.38	.277
Ness	2.7	3640	.30	1.10	4.2	928	8010	.65	.514
Ness (cyl.)	2.7	3160	.4	1.26	4.4	982	8728	.522	.38
Carbon Tech non-acetonitrile	2.85	1600	1.0	1.6	5.8	1026	9106	.223	-
Asahi Glass (propylene carbonate)	2.7	1375	2.5	3.4	4.9	390	3471	.210 (estimated)	.151
Panasonic (propylene carbonate)	2.5	1200	1.0	1.2	2.3	514	4596	.34	.245
EPCOS	2.7	3400	.45	1.5	4.3	760	6750	.60	.48
LS Cable	2.8	3200	.25	.80	3.7	1400	12,400	.63	.47
BatScap	2.7	2680	.20	.54	4.2	2050	18,225	.50	.572
Power Sys. (activated carbon, propylene carbonate) ^e	2.7	1350	1.5	2.0	4.9	650	5785	.21	.151
Power Sys. (graphitic carbon, propylene carbonate) ^e	3.3	1800	3.0	5.4	8.0	486	4320	.21	.15
Power Sys. (graphitic carbon, propylene carbonate) ^e	3.3	1500	1.7	2.5	6.0	776	6903	.23	.15
Fuji Heavy Industry-hybrid (AC/graphitic carbon) ^f	3.8	1800	1.5	2.6	9.2	1025	10,375	.232	.143
JSR Micro (AC/graphitic carbon) ^f	3.8	1000	4	4	11.2	900	7987	.113	.073
JSR Micro (AC/graphitic carbon) ^f	2000	1.9	3.8	12.1	1038	9223		.206	.132

2.5.2 คุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าชนิดอื่น

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบคุณลักษณะของตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดที่ใช้คาร์บอนเป็นขั้วและชนิดลิเทียมไอออนกับคุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่อื่นๆ รวมถึงชนิดอิเล็กโทรลิติก เห็นได้ว่าคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดทั้งด้านพลังงานจำเพาะ กำลังจำเพาะ ค่าความจุไฟฟ้า เวลาในการอัดและคายประจุและอายุการใช้งานมีค่าอยู่ระหว่างค่าของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุชนิดอื่นๆ ตัวเก็บประจุแบบยิ่งยวดจึงนับว่าเป็นเทคโนโลยีที่สามารถเติมช่องว่างระหว่างเทคโนโลยีแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุได้ดี อีกทั้งงานวิจัยและพัฒนาตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีทิศทางหลักมุ่งไปที่การเพิ่มความสามารถในการกักเก็บพลังงานให้ใกล้เคียงความสามารถของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมากขึ้น จึงคาดว่าคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะมีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วในอนาคตอันใกล้ พัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วในอนาคตอันใกล้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเทียบกับแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุชนิดอื่น

Characteristic	Lead-acid battery	Li-ion battery	Capacitor (Electrostatic & Electrolytic)	Supercapacitors	
				Carbon Supercapacitor	Li-ion Supercapacitor
Specific Energy (Wh/kg)	30-50	100-265	< 0.1	1-10	10-15
Specific Power (W/kg)	75-300	300-1,500	10,000-10,000,000	500-10,000	> 100,000
Cell voltage (V)	≈ 2.0	2.5-4.2	4-550	1.2-3.3	2.2-3.8
Capacitance (F)	-	-	< 1	0.1-12,000	300-3,300
Discharge Time	min - h	min - h	10	s - min	s - min
Charging time	h	min - h	10	s - min	min
Charge/discharge efficiency (%)	75-82	90	> 95	85-98	90
Cycle life (cycles)	500-2,000	< 5,000	10	> 500,000	10,000 - 100,000

คุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าชนิดอื่น ตารางที่ 2 เปรียบเทียบคุณลักษณะของตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดที่ใช้คาร์บอนเป็นขั้วและชนิดลิเทียมไอออนกับคุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่อื่นๆ รวมถึงชนิดอิเล็กทรอนิกส์ เห็นได้ว่าคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดทั้งด้านพลังงานจำเพาะ กำลังจำเพาะ ค่าความจุไฟฟ้า เวลาในการอัดและคายประจุและอายุการใช้งาน มีค่าอยู่ระหว่างค่าของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุชนิดอื่นๆ ตัวเก็บประจุแบบประสิทธิภาพสูงจึงนับว่าเป็นเทคโนโลยีที่สามารถเติมช่องว่างระหว่างเทคโนโลยีแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุได้ดี อีกทั้งงานวิจัยและพัฒนาตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีทิศทางหลักมุ่งไปที่การเพิ่มความสามารถในการกักเก็บพลังงานให้ใกล้เคียงกับความสามารถของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมากขึ้น จึงคาดว่าคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะมีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วในอนาคตอันใกล้

2.5.3 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเหมาะกับการใช้งานด้านใดบ้าง

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถนำมาใช้งานได้หลายด้าน ตัวอย่างของการใช้งานมีดังนี้

1. การรักษาความคงที่ของแรงดันไฟฟ้าในกริด กระจายเมื่อมีการกระชากของแรงดันไฟฟ้าในสายส่งไฟฟ้าขึ้น จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เก็บพลังงานที่สามารถรับพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีการลดลงชั่วขณะก็สามารถที่จะคืนแรงดันไฟฟ้าสู่กริดได้อย่างรวดเร็ว เรียกกลไกนี้ว่า Dynamic Voltage Restoration (DVR)

2. ใช้แทนแบตเตอรี่หรือตัวเก็บประจุในเครื่องสำรองไฟฟ้า (UPS) และอุปกรณ์ป้องกันไฟกระชากแรงดันสูงชั่วขณะ (surge protector) ส่วนใหญ่เวลาไฟตกหรือกระชากจะใช้เวลาน้อยกว่า 1 วินาที สัดส่วนของพลังงานต่อกำลังของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเหมาะสมกว่าแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุ นอกจากนี้ ยังสามารถลดขนาด ค่าใช้จ่ายในระยะยาวและเพิ่มความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ด้วย

3. ใช้ควบคู่กับแบตเตอรี่ในอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์แบบ notebook หรือโทรศัพท์มือถือ อุปกรณ์เหล่านี้มักจะต้องดึงกระแสและกำลังไฟฟ้าสูงในจังหวะสั้นๆ (หลัก ms หรือ s) เป็นระยะๆซึ่งทำให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพในการจ่ายกระแสลดลง ดังนั้น การใช้

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดกับแบตเตอรี่ โดยให้แบตเตอรี่จ่ายภาระเฉลี่ย (average load) ส่วนตัวเก็บประจุใช้ในการจ่าย pulse current จะเป็นการช่วยยืดอายุแบตเตอรี่ได้

4. ใช้ในยานพาหนะไฟฟ้าควบคู่กับแบตเตอรี่หรือเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อต้องขับขึ้นเขา หรือเร่งเครื่องเพื่อแซง ตัวเก็บประจุยิ่งยวดก็สามารถให้กำลังสูงในเวลาอันสั้นได้ และเมื่อมีเหยียบเบรกของรถ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดก็สามารถที่จะกักเก็บพลังงานกลที่แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าไว้ได้ เรียกว่า regenerative braking นอกจากนี้ ตัวเก็บประจุยังสามารถใช้ในการติดเครื่องได้อีกด้วย ไม่ว่าจะเป็นเครื่องยนต์ของรถยนต์หรือเครื่องยนต์ดีเซลของรถไฟ

5. ใช้กักเก็บพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานทางเลือก เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ หรือ กังหันลมผลิตไฟฟ้า เมื่อใช้แบตเตอรี่ในการกักเก็บพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์หรือกังหันลม แบตเตอรี่จะต้องผ่านการอัดและคายประจุในลักษณะ deep cycle (คือคายประจุ $\geq 80\%$ ของความจุของแบตเตอรี่) ซึ่งส่งผลให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็ว และอาจต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่ภายในเวลาไม่กี่ปี แต่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถที่จะผ่านการอัดและคายประจุในลักษณะ deep cycle ได้โดยไม่มีผลต่ออายุ ตัวเก็บประจุสามารถใช้ได้นานถึง 20 ปี (ซึ่งใกล้เคียงกับอายุการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์) ถือเป็นการลดค่าใช้จ่ายตลอดอายุของอุปกรณ์







6. ใช้ในเครื่องมือแบบพกพา ตัวอย่างเช่น ส่วนแบบไร้สาย ซึ่งไม่ต้องใช้งานเป็นเวลานาน และหากคายประจุจนหมดแล้วยังสามารถที่จะอัดประจุให้เต็มได้ภายในเวลา 90 วินาที นอกเหนือจากตัวอย่างที่ยกมาแล้ว ตัวเก็บประจุยิ่งยวดยังสามารถใช้งานได้อีกหลายอย่าง เช่น เครื่องมือการแพทย์ (เครื่องกำหนดการเต้นของหัวใจ เครื่องกระตุ้นหัวใจด้วยไฟฟ้า แหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องเอ็กซเรย์) และเครื่องมือทางการทหาร (actuator สำหรับป้องกันน้ำท่วมเรือดำน้ำ แท่นส่งเครื่องบินบนเรือรบ การติดเครื่องรถเกราะในสภาพอากาศที่ร้อนหรือเย็นมากๆ)

เห็นได้ว่าตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานในหลายๆ ด้านที่เดิมที่อาจใช้แบตเตอรี่หรือตัวเก็บประจุอยู่ การหันมาใช้งานตัวเก็บประจุยิ่งยวดอาจช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในระยะยาวได้เนื่องจากมี cycle life ที่ยาวนาน และต้องการการบำรุงรักษาน้อยมาก นอกจากนี้ การนำมาใช้ควบคู่กับแบตเตอรี่จะสามารถช่วยยืดอายุของแบตเตอรี่ได้ด้วยดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

2.6 ยานพาหนะพลังงานไฟฟ้า







ในปัจจุบันมีการใช้รถยนต์ไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย ซึ่งรถยนต์ไฟฟ้าแต่ละชนิดมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป สามารถศึกษาได้จากตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ยานพาหนะพลังงานไฟฟ้า [12]

		
BMW i3 Curb [13] Passengers: 5 Weight: 1,195kg Driving range: 130-160km Battery: 22kWh	Tesla S curb 2015 [14] Passengers: 7 Weight: 2100kg Driving range: 424km Battery: 70 and 90kWh	BD Otomotive TRAFIC Passengers: 8 Weight: 2940kg Driving range: 190km Battery: 53kWh
		
BD Otomotive KANGOO Panel Van Passengers: 2 Weight: 1918kg Driving range: 110km Battery: 20kWh	Mitsubishi Motors MINICAB-MiEV Van Passengers: 2/4 Weight: 1090-1120kg Driving range: 150km Battery: 16.0kWh	Citroen C-ZERO Passengers: 4 Weight: 1120g Driving range: 160km Battery: 16kWh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ยานพาหนะพลังงานไฟฟ้า (ต่อ) [12]

		
<p>HondaFit Passengers: 5 Weight: 1,120kg Driving range: 225km Battery: 20kWh</p>	<p>MAZDADEMIO EV Passengers: 5 Weight: 1180kg Driving range: 200km Battery: 20kWh</p>	<p>Micro-VettFiorino cargo Passengers: 2 Weight: 182kg Driving range: 140km Battery: 31.1kWh</p>
		
<p>Mitsubishi i-MiEV Passengers: 4 Weight: 1110kg Driving range: 180km Battery: 16kWh</p>	<p>CitroenBerligo Passengers: 5 Weight: 675kg Driving range: 170km Battery: 22.5kWh</p>	<p>NissaneNV200 Passengers: 2 Weight: 1580kg Driving range: 200km Battery: 32kWh</p>
		
<p>NissanLEAF Passengers: 5 Weight: 1520kg Driving range: 200kg Battery: 24kWh</p>	<p>PeugeotION Passengers: 4 Weight: 1120kg Driving range: 160km Battery: 16kWh</p>	<p>PeugeotPartner Passengers: 5 Weight: 675kg Driving range: 170km Battery: 22.5kWh</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ระดับการอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้า

การอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้ามีหลายระดับของการอัดประจุ ซึ่งระดับของการอัดประจุจะบ่งบอกถึงค่าต่าง ๆ ของการอัดประจุ เช่น กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดประจุ เวลาในการอัดประจุ อุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเครื่องอัดประจุ หรือผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า เป็นต้น การรู้พื้นฐาน และระดับที่เหมาะสมของการอัดประจุจะช่วยให้สามารถลดพลังงาน และค่าใช้จ่ายในการอัดประจุลงได้ โดยส่วนประกอบของการอัดประจุ เช่น สายไฟฟ้า เครื่องอัดประจุ และอุปกรณ์ต่าง ๆ จะเปลี่ยนไปตามพื้นที่ หรือตามประเทศ ขึ้นอยู่กับ ระดับแรงดันไฟฟ้า ความถี่ไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าของประเทศนั้น โดยสามารถแบ่งระดับของเครื่องอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้าเป็น 3 ระดับดังนี้ [15]

2.7.1 เครื่องอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้าระดับ 1 (Level 1 Charging)

เป็นการอัดประจุที่ใช้พลังงานต่ำในการอัดประจุ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส โดยส่วนใหญ่ใช้หัวชาร์จตามมาตรฐาน J1772 ในการอัดประจุ เครื่องอัดประจุนี้นี้สามารถติดตั้งได้ในที่อยู่อาศัยทั่วไป เนื่องจากมีระดับแรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่ต่ำ ทำให้ส่งผลต่อระบบไฟฟ้าต่ำด้วย ข้อดี คือการติดตั้ง และการอัดประจุที่ง่าย ข้อเสียคือใช้เวลาที่มากกว่า 8 ชั่วโมงและมีกำลังในการอัดประจุน้อยกว่า 2 กิโลวัตต์ในการอัดประจุ

2.7.2 เครื่องอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้าระดับ 2 (Level 2 Charging)

เป็นการอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้าไม่มากเกินไป และไม่น้อยเกินไป ประมาณ 2 ถึง 20 กิโลวัตต์ ทำให้ใช้เวลาในการอัดประจุดีกว่าการอัดประจุนี้นี้ ซึ่งใช้เวลาในการอัดประจุประมาณ 4 ถึง 8 ชั่วโมง ส่วนใหญ่ประเทศต่าง ๆ จะสนใจที่จะพัฒนาเครื่องอัดประจุนี้นี้ เนื่องจากมีระดับแรงดัน และกำลังไฟฟ้าในการอัดที่เหมาะสม และยังสามารถติดตั้งได้ทั้งในที่อยู่อาศัยทั่วไป และในที่สาธารณะ ข้อเสียของเครื่องอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้า คือการควบคุมที่ยากกว่าเครื่องอัดประจุนี้นี้ ถ้าให้กระแสมากเกินไป ความร้อนจากการอัดประจุจะทำให้แบตเตอรี่ของพาหนะพลังงานไฟฟ้าเกิดการชำรุดเสียหาย

2.7.3 เครื่องอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้าระดับ 3 (Level 3 Charging)

เครื่องอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้าระดับ 3 (Level 3 Charging) เป็นการอัดประจุอย่างรวดเร็ว ทำให้เวลาในการอัดประจุน้อยกว่า 1 ชั่วโมง ระดับแรงดัน และกำลังไฟฟ้าในการอัดประจุสูง การเชื่อมต่อกับพาหนะพลังงานไฟฟ้าอาจจะเป็นการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยกำลังสูง ข้อเสีย คือความร้อนจากการอัดประจุ และการติดตั้งต้องติดตั้งเป็นสถานีอัดประจุพลังงานไฟฟ้าเหมือนกับปั๊มเติมน้ำมัน โดยการอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้าระดับ 3 มีมาตรฐานสากลของประเทศญี่ปุ่น คือมาตรฐาน CHAdeMO ที่จัดตั้งขึ้นเพื่อให้การอัดประจุที่รวดเร็ว (Quick Charger) ให้มีมาตรฐานเดียวกันภายใต้มาตรฐานสากล SAE J1772, IEC62196-2 Type1, UL/CE/PSE ซึ่ง CHAdeMO มีเครือข่ายอยู่ทั่วโลกซึ่งสมาชิกเป็นกลุ่มองค์กรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่ายรถยนต์ต่าง ๆ บริษัทที่เกี่ยวข้องกับการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบระดับการอัดประจุของพาหนะพลังงานไฟฟ้า

ระดับการอัดประจุ	จำนวนเฟสของไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้าขาเข้า	เวลาในการอัดประจุ	ข้อดี	ข้อเสีย
ระดับ 1	1 เฟส	1-2 กิโลวัตต์	8-14 ชั่วโมง	การติดตั้งเครื่องอัดประจุง่าย และใช้กำลังไฟฟ้าน้อย	ใช้เวลาในการอัดประจุมาก
ระดับ 2	1 เฟส	2-20 กิโลวัตต์	4-8 ชั่วโมง	มีระยะเวลาอัดประจุที่เร็วขึ้น และใช้กำลังไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม	ความร้อนจากการอัดประจุทำให้แบตเตอรี่เสื่อม
ระดับ 3	3 เฟส	มากกว่า 50 กิโลวัตต์	30 นาที	ระยะเวลาในการอัดประจุเร็วที่สุด	ใช้กำลังไฟฟ้ามากที่สุด

2.8 วงจรตีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์

วงจรวงจรถีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณแรงดันไฟฟ้า และควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าในการถ่ายโอนพลังงาน โดยวงจรจะประกอบไปด้วย ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และสวิตช์กำลังจำนวน 2 สวิตช์ โดยในการอัดประจุแบบเตอร์จะแบ่งการควบคุมออกเป็นสองช่วงคือ การควบคุมในช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่จะมีการควบคุมสัญญาณขับสวิตช์ S_{buck} เป็นการควบคุมกระแสไฟฟ้าขณะทำการอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ โดยจะมีการตรวจจับกระแสไฟฟ้าแล้วทำการเปลี่ยนแปลงเข้ามาในรูปของแรงดันไฟฟ้าเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับลูกคลื่นสามเหลี่ยม (Carrier waveform) เพื่อนำมาปรับปรุงค่าของดิวิตีไซเคิลสำหรับการนำอัดประจุแบบเตอร์ และการควบคุมในช่วงที่สองคือการอัดประจุแบบเตอร์ด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่เป็นการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขณะทำการอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่โดยที่อัตราการขยายของค่าความผิดพลาดจะส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก ดังนั้นการควบคุมแรงดันจะต้องเหมาะสมกับแรงดันไฟฟ้าในการอัดประจุแบบเตอร์โดยจะใช้การควบคุมแบบป้อนกลับซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับค่าดิวิตีไซเคิล โดยแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ป้อนเข้าจะทำให้แรงดันขาออกมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงหรือมีค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งค่าดิวิตีไซเคิลเบื้องต้นของวงจรถักคอนเวอร์เตอร์ [16] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (2.2)$$

สามารถคำนวณขนาดตัวเหนี่ยวนำที่ทำให้วงจรสามารถทำงานได้แบบกระแส ต่อเนื่องในการทำงานแบบบ็ีกคอนเวอร์เตอร์ได้จากสมการที่ 2.3

$$L_{\min} = \frac{(1-D)}{2f} \times \frac{V_o}{I_o} \quad (2.3)$$

และสามารถค่าตัวเก็บประจุสำหรับวงจรบ็ีกคอนเวอร์เตอร์ได้จากสมการที่ 2.4

$$\frac{\Delta I_o}{I_o} = \frac{(1-D)}{8LCf^2} \quad (2.4)$$

โดยที่	L_{\min}	คือ	ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต่ำที่สุด
	D	คือ	ค่าดิวตี้ไซเคิล
	f	คือ	ค่าความถี่สวิตชิง
	V_s	คือ	แรงดันไฟฟ้าขาเข้า
	V_o	คือ	แรงดันไฟฟ้าขาออก
	I_o	คือ	กระแสไฟฟ้าขาออก
	ΔI_o	คือ	อัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าขาออก

เมื่อวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ทำงานจ่ายกลับซึ่งวงจรจะทำงานเป็นบูสต์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น โดยสามารถควบคุมปริมาณแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ สวิตช์ S_{boost} โดยสามารถเพิ่มปริมาณแรงดันไฟฟ้าได้ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิล ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

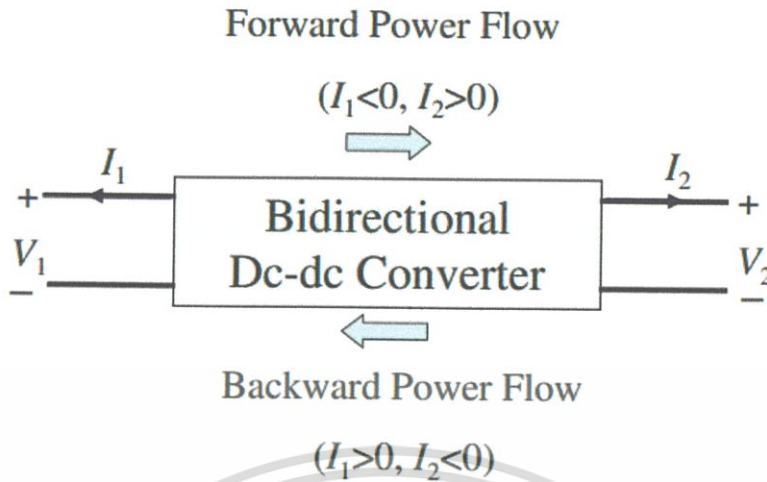
$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (2.5)$$

และสามารถคำนวณขนาดตัวเหนี่ยวนำที่ทำให้วงจรสามารถทำงานได้แบบกระแส ต่อเนื่องในการทำงานแบบบูสต์คอนเวอร์เตอร์ได้จากสมการ 2.6

$$L_{\min} = \frac{D(1-D)^2}{2f} \times \frac{V_o}{I_o} \quad (2.6)$$

2.8.1 Bidirectional DC-DC Converter

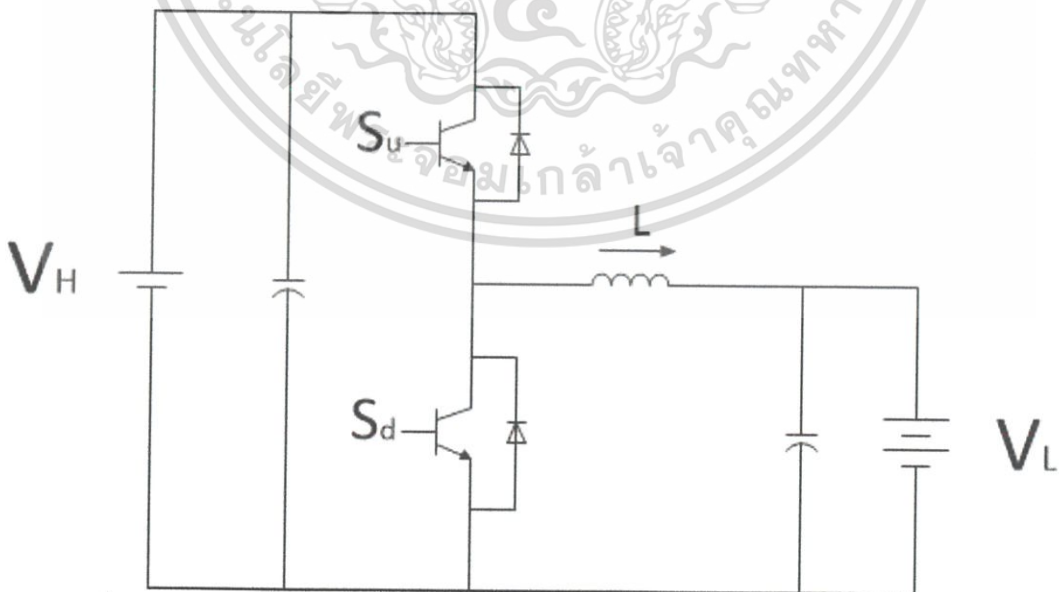
วงจรแปรผันพลังงานไฟฟ้า 2 ทิศทาง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ วงจรบัก และ วงจรบูท วงจรบักจะเก็บพลังงานไว้ในด้านแรงดันสูง และ วงจรบูทจะเก็บพลังงานไว้ในด้านแรงดันต่ำ



รูปที่ 2.19 Illustration of bidirectional power flow

ในการโอนถ่ายพลังงานทั้ง2ทิศทางจะต้องมีสวิตซ์เป็นตัวควบคุมการไหลทั้ง2ทิศทาง โดยทั่วไปวงจรแปรผันพลังงานไฟฟ้าจะถูกแบ่งออกเป็น2ประเภทคือ non-isolated และ isolated converters ตามความต้องการใช้ที่แตกต่างกันออกไป

2.8.1.1 Non-isolated Bidirectional DC-DC Converters คือวงจรแปลงพลังงานแบบไม่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าโดยติดตั้งวงจรบัคและวงจรบูทแบบปกติ มีข้อดีคือมีที่ราคาไม่สูง มีขนาดเล็กและน้ำหนักที่เบากว่าแบบติดตั้งหม้อแปลง พื้นฐานของวงจร Non-isolated Bidirectional DC-DC Converters จะแปลงแรงดันขึ้นและแปลงแรงดันลงไปพร้อมๆกันโดยการต่อแบบไม่ขนาน สำหรับการทำงานนั้น มอเตอร์จะแปลงแรงดันขึ้นเพื่อใช้ในการเพิ่มแรงดันของแบตเตอรี่และควบคุมค่าป้อนเข้า



รูปที่ 2.20 Basic bidirectional dc-dc converter with buck and boost structure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1.2 Isolated Bidirectional DC-DC Converters คือวงจรแปลงพลังงานแบบใช้หม้อแปลงไฟฟ้าโดยจะมีราคาและค่าการสูญเสียเพิ่มขึ้นจากแบบ Non-isolated Bidirectional DC-DC Converters อย่างไรก็ตามหม้อแปลงสามารถแยกแรงดันได้ 2 ทิศทางให้ตรงกับความต้องการของสายส่งได้ วงจรนี้เหมาะสำหรับการอัดประจุแบตเตอรี่ที่ต้องการเสถียรภาพสูง เช่น เครื่องสำรองไฟ

2.9 สรุป

จากที่กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 2 นี้ เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาของระบบกักเก็บพลังงานและชนิดของแหล่งสะสมพลังงานที่มีอยู่ในปัจจุบัน ยังพูดถึงความค้ำพารามิเตอร์ต่างๆ ที่บ่งชี้ประสิทธิภาพของแหล่งสะสมพลังงานชนิดต่างๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะ คุณสมบัติ ข้อดี ข้อเสีย และการนำไปใช้งานของทั้งแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและตัวเก็บประจุยิ่งยวด ว่าจุดแข็งและจุดด้อยของแหล่งสะสมพลังงานว่ามีด้านใดบ้าง เพื่อจะได้นำจุดแข็งที่มีอยู่ของแต่ละอย่างมาปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแหล่งสะสมพลังงานแบบผสมผสาน โดยอิงข้อมูลจากรถยนต์ไฟฟ้าที่มีอยู่ในปัจจุบัน ว่าในปัจจุบันนั้นมาตรฐานของรถยนต์ไฟฟ้าโดยยี่ห้อต่างๆของในระดับใด รวมไปถึงข้อมูลของการอัดประจุพาหนะพลังงานไฟฟ้าในระดับต่างๆที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้านั้นสามารถอัดประจุได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งปัจจัยทั้งหลายเหล่านี้จำเป็นต่อการวิเคราะห์และออกแบบวงจรไฟฟ้าในการเชื่อมต่อกันของแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าทั้งสอง โดยใช้วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ เป็นวงจรพื้นฐานในการพัฒนางจรดังกล่าวต่อไป

บทที่ 3

การออกแบบและการทดลอง

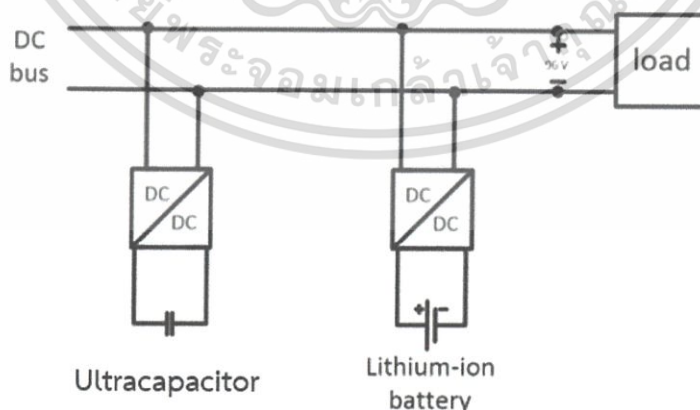
3.1 บทนำ

ในปัจจุบันนี้รถไฟฟ้าได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย และหลายๆองค์กรก็เริ่มผลิตและพัฒนารถยนต์ไฟฟ้าขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการใช้แบตเตอรี่เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับรถไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบตเตอรี่ลิเธียมที่ได้รับความนิยมที่สุดในการนำมาใช้กับรถไฟฟ้าในปัจจุบัน แต่เนื่องจากแบตเตอรี่ลิเธียมยังมีระยะเวลาในการอัดประจุที่นาน รวมไปถึงน้ำหนักที่ยังค่อนข้างสูงอยู่สำหรับการนำมาติดตั้งบนรถยนต์ไฟฟ้า ส่งผลให้ระยะเวลาในการอัดประจุแต่ละครั้งนั้นยังนานอยู่ เมื่อเทียบกับการเติมเชื้อเพลิงของรถยนต์ชนิดอื่น และน้ำหนักที่ยังสูงอยู่นั้น ส่งผลให้พลังงานในแต่ละครั้งที่อัดประจุต้องสูญเสียไปกับน้ำหนักของรถที่มากโดยเปล่าประโยชน์

ดังนั้นการลดระยะเวลาในการอัดประจุและน้ำหนักโดยรวมของแหล่งกักเก็บพลังงานของรถยนต์ไฟฟ้าโดยการนำแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้ร่วมกัน จะสามารถลดระยะเวลาในการอัดประจุและน้ำหนักโดยรวมได้ จึงนำไปสู่การออกแบบแหล่งกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน โดยจำเป็นต้องทราบวงจรไฟฟ้าที่การเชื่อมต่อกันของแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน ซึ่งในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบวงจรกำลัง วงจร Buck boost converter รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆและการทดลอง โดยผ่านโปรแกรม PSIM Simulation เพื่อนำผลการทดลองนี้มาสรุปเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ต่อไป

3.2 การออกแบบวงจรไฟฟ้าในการเชื่อมต่อกันของแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน

การเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน ดังรูปที่ 3.1 โดยมีการเชื่อมต่อแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดโดยผ่าน DC-DC converter เข้าสู่ DC bus ที่มีพิกัดแรงดันเท่ากับพิกัดแรงดันของโพลนั้นก็คือมอเตอร์สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า พิกัดแรงดัน 96 V



รูปที่ 3.1 ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์

3.3 ข้อมูลระบบกักเก็บพลังงานที่ใช้ทำการทดลอง

3.3.1 ข้อมูลแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้ทำการทดลอง [17]



Secret Authorized party only Rank C

MAT-KMT-E0002

Table 1-2 The module specifications (AM01202CCA05A)

Item	Specifications	Remarks
Nominal voltage *1	27.6V DC	-
Nominal capacity *1	40Ah	Discharging@25deg.C 0.2 C (8A) *2
Max allowed current *1	120A (Charge/discharge)	@25 deg.C
Operating voltage *1	18.0V~32.4V	-
Cell composition	2 in parallel and 12 in serial (2P12S)	Use of SciB™ 20Ah cell
Function	-Measuring of cell voltages and module temperatures	-The notification of cell voltages and module temperatures
	-Measuring of cell voltages and module temperatures -Cell balancing operation -External notification through CAN -Automatically numbered CMU-ID by UART	-The notification of cell voltages and module temperatures through CAN -Cell balancer can be operated through CAN -CAN 2.0B: 500kbps -UART: 1200bps
Number of connections	Below 22 modules in series	(22 modules in series, Nominal voltage: 607.2V)
Charge/discharge terminal	Specified M6 screw	Tool: T20 Hexalobular wrench
Dimensions	187.3(H) x 358.5(D) x 122.65(W)	Unit: mm (Excluding protrusions) (Tolerance refers to "1.3 Appearance Dimensions")
Weight	14kg (Approx.)	-
External interface	CAN 2.0B 1ch UART ISO9141 Equivalent: 1ch	CAN communication connector (8 poles) SM08B-CPTK-1A-TB (Manufactured by JST)
CMU operating power supply	Voltage: DC12V (10.2~13.2V) Rated consumption current: 17mA	Supplied from external power source Instantaneous interruption: less than 10msec Rush current: Approx. 7A (Only 1 in series), ~Approx. 11A (22 in series)
Environmental condition	Operating temperature range	-30~+55deg.C No condensation *3
	Storage temperature range	-30~+55deg.C Recommended: -10~+25deg.C No condensation *3
	Humidity	1.5~85%RH No condensation *3
	Operating altitude range	Below 1,000m When this module is used in an area over 1,000m, please contact us at the address described at the end of this document.

Note *1. Initial characteristics in manufacturing.

*2. Charge/discharge condition

• Charge: 40A, 20A, 8A, 4A, 2A/cell 2.7V cut Step charge


• Discharge: 8A/cell 1.5V cut Constant current discharge

*3. This module may be damaged and become unusable due to condensation.

รูปที่ 3.2 ข้อมูลทางเทคนิคของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ข้อมูลตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้ทำการทดลอง

DATASHEET 56V MODULE	
FEATURES AND BENEFITS* <ul style="list-style-type: none"> Up to 14 year DC life 56V DC working voltage Resistive cell balancing Overvoltage outputs High power density 4U, half-rack package UL registered 	TYPICAL APPLICATIONS <ul style="list-style-type: none"> UPS systems
	
PRODUCT SPECIFICATIONS	
ELECTRICAL	BMOD0130 P056 B03
Rated Capacitance ¹	130 F
Minimum Capacitance, initial ¹	130 F
Maximum Capacitance, initial ¹	156 F
Maximum ESR _{dc} , initial ¹	8.1 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR _{dc} ¹	100 A
Rated Voltage	56 V
Absolute Maximum Voltage ²	62 V
Absolute Maximum Current	1,900 A
Leakage Current at 25°C, maximum ³	120 mA
Maximum Series Voltage	750 V
Capacitance of Individual Cells ⁴	3,000 F
Stored Energy, Individual Cell ⁴	3.0 Wh
Number of Cells	23
TEMPERATURE	BMOD0130 P056 B03
Operating Temperature (Cell case temperature)	
Minimum	-40°C
Maximum	40°C
Storage Temperature (Stored uncharged)	
Minimum	-40°C
Maximum	70°C
PHYSICAL	BMOD0130 P056 B03
Mass, typical	18 kg
Power Terminals	M8/M10
Recommended Torque - Terminal	20/30 Nm
Vibration Specification	Telcordia GR-63-CORE Zone 4
Shock Specification	N/A
Environmental Protection	IP30
Cooling	Natural Convection
MONITORING / CELL VOLTAGE MANAGEMENT	BMOD0130 P056 B03
Internal Temperature Sensor	N/A
Temperature Interface	N/A
Cell Voltage Monitoring	Overvoltage Alarm
Connector	Deutsch DTM
Cell Voltage Management	Passive

รูปที่ 3.3 ข้อมูลทางเทคนิคของตัวเก็บประจุยิ่งยวด [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DATASHEET 56V MODULE

FEATURES AND BENEFITS*

- Up to 14 year DC life
- 56V DC working voltage
- Resistive cell balancing
- Overvoltage outputs
- High power density
- 4U, half-rack package
- UL registered

TYPICAL APPLICATIONS

- UPS systems



PRODUCT SPECIFICATIONS

POWER & ENERGY

Usable Specific Power, P_d^4	2,600 W/kg
Impedance Match Specific Power, P_{max}^5	5,400 W/kg
Specific Energy, E_{max}^6	3.1 Wh/kg
Stored Energy ⁷	57 Wh

SAFETY

Short Circuit Current, typical (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)	6,900 A
Certifications	RoHS, UL810a (750 V)
High-Pot Capability ¹⁰	4,000 V DC

TYPICAL CHARACTERISTICS

THERMAL CHARACTERISTICS

BMOD0130 P056 B03

Thermal Resistance (R_{∞} , All Cell Cases to Ambient), typical ⁸	0.50°C/W
Thermal Capacitance (C_{th}), typical	16,000 J/°C
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 15^\circ C$) ⁹	61 A, RMS
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 40^\circ C$) ⁹	99 A, RMS

LIFE

DC Life at High Temperature ¹ (held continuously at Rated Voltage & Maximum Operating Temperature)	8 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%
Projected DC Life at 25°C ¹ (held continuously at Rated Voltage)	14 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%
Shelf Life (Stored uncharged at 25°C)	4 years

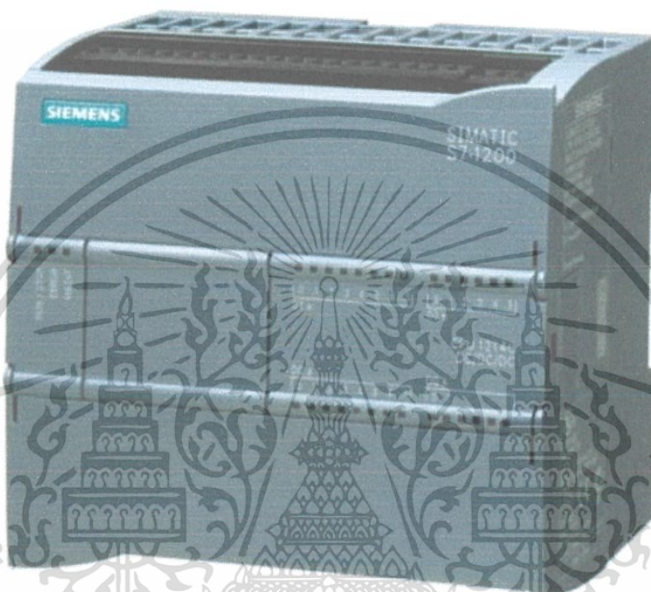
รูปที่ 3.3 ข้อมูลทางเทคนิคของตัวเก็บประจุยิ่งยวด(ต่อ) [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 โปรแกรม PLC ของ บริษัท Siemens

หน่วยประมวลผล SIMATIC S7-1200 ของบริษัท Siemens ดังรูปที่ 3.4 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการนำข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์วัดกระแส และเซนเซอร์วัดแรงดัน มาทำการแบ่งประเภทของข้อมูลเพื่อจ่ายต่อการแสดงผลในโปรแกรม PLC

สำหรับการออกแบบหน้าจอแสดงข้อมูลของแบตเตอรี่จะใช้โปรแกรม PLC ของบริษัท Siemens ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้แก่ แรงดันต่อเซลล์ภายในแบตเตอรี่ อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ กระแสขณะใช้งานของแบตเตอรี่ และค่าสถานะ SOC (State of Charge)

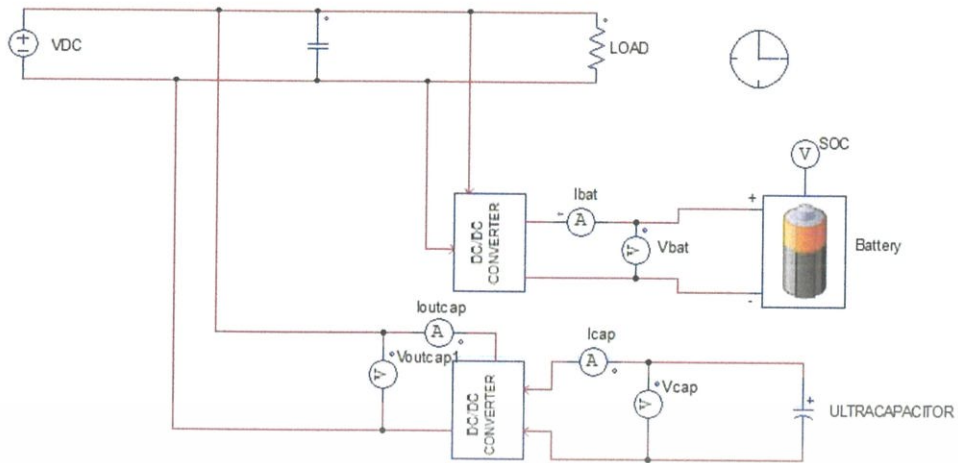


รูปที่ 3.4 หน่วยประมวลผล SIMATIC S7-1200 ของบริษัท Siemens [19]

3.5 การออกแบบวงจรกำลัง

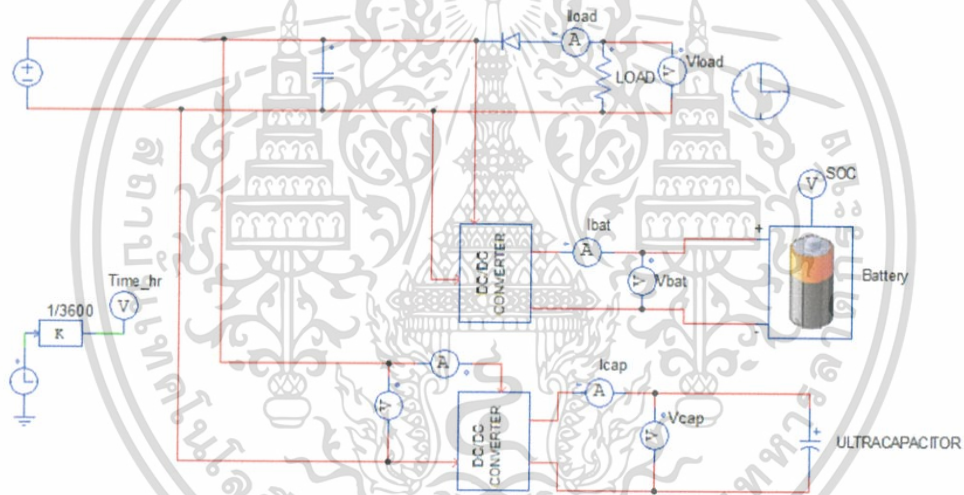
3.5.1 วงจร Buck-Boost converter สำหรับการเชื่อมต่อกันของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน

ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ มีการออกแบบวงจรกำลังโดยการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน รวมถึงภาระของระบบซึ่งในที่นี้คือมอเตอร์รถยนต์ไฟฟ้าเข้ากับกริดที่มีแรงดันตกคร่อมเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 96 โวลต์ โดยระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนต้องเชื่อมต่อผ่านวงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ก่อนเข้าสู่กริดของระบบ



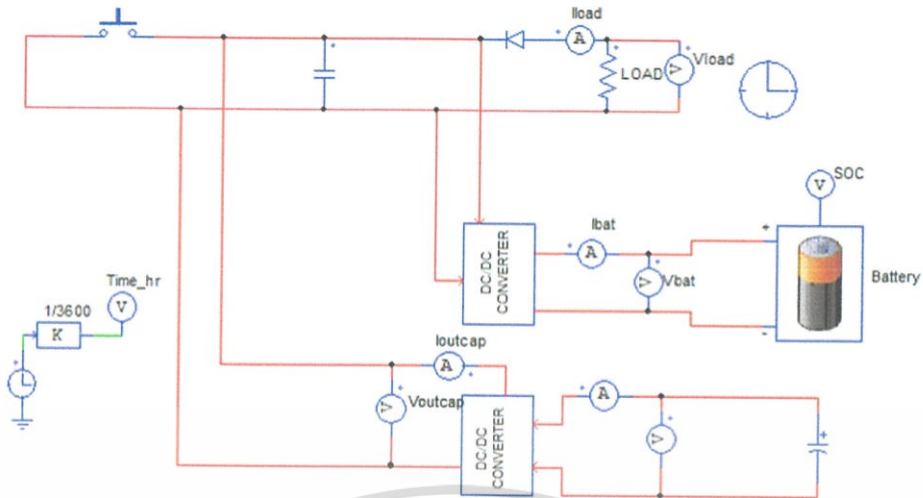
รูปที่ 3.5 วงจร Buck-Boost converter สำหรับการเชื่อมต่อกันของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน

3.6 การออกแบบวงจรไฟฟ้ากำลังผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

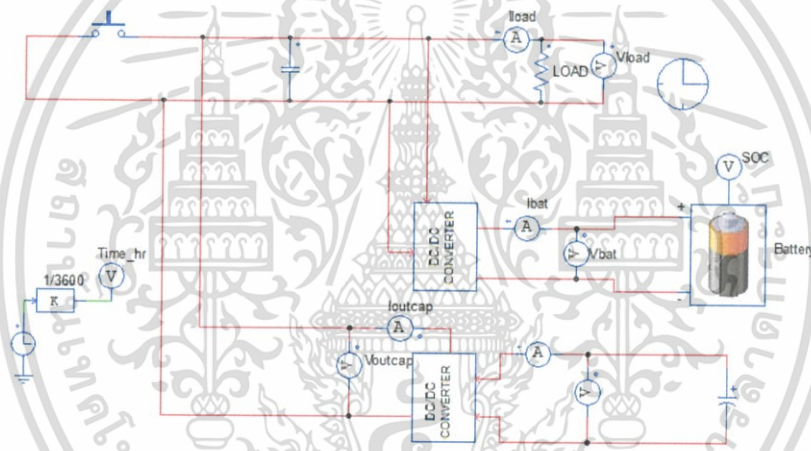


รูปที่ 3.6 การจำลองวงจรกำลังไฟฟ้า ช่วงการอัดประจุจากเครื่องอัดประจุไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

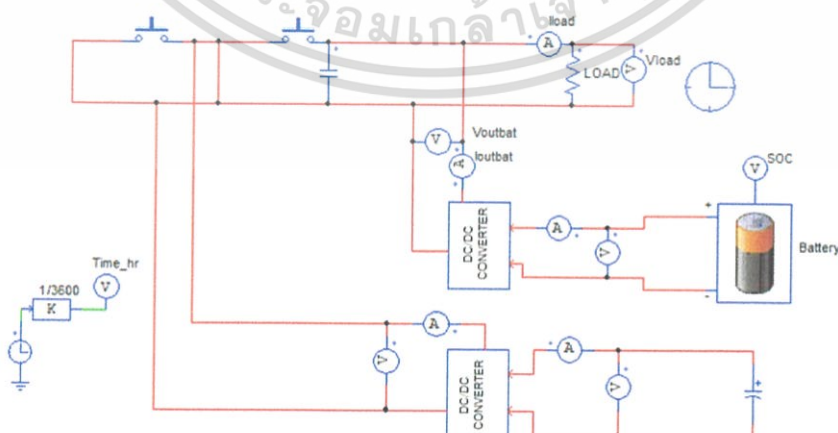
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การจำลองวงจรกำลังไฟฟ้า ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

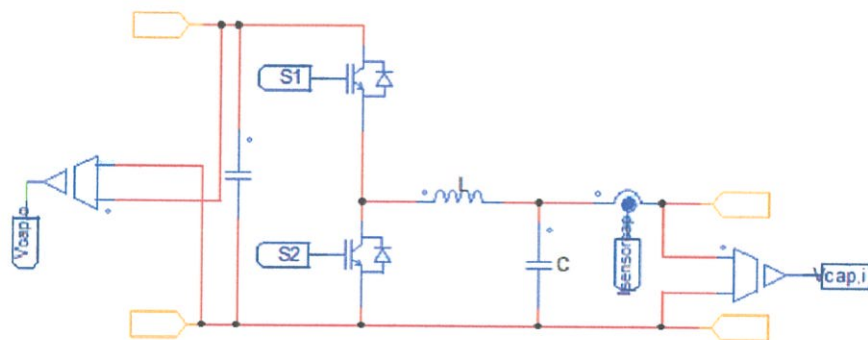


รูปที่ 3.8 การจำลองวงจรกำลังไฟฟ้า ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและภาระทางไฟฟ้าผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

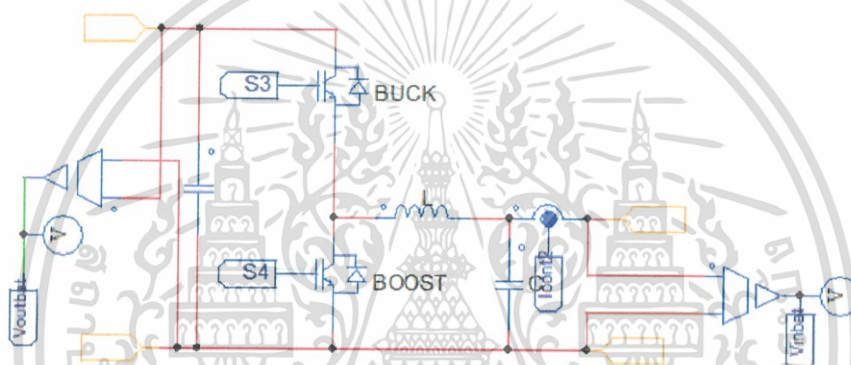


รูปที่ 3.9 การจำลองวงจรกำลังไฟฟ้า ช่วงการถ่ายโอนประจุจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไปยังภาระทางไฟฟ้า ผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การจำลองวงจรภายในของดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและวงจรควบคุมแรงดันคงที่ผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

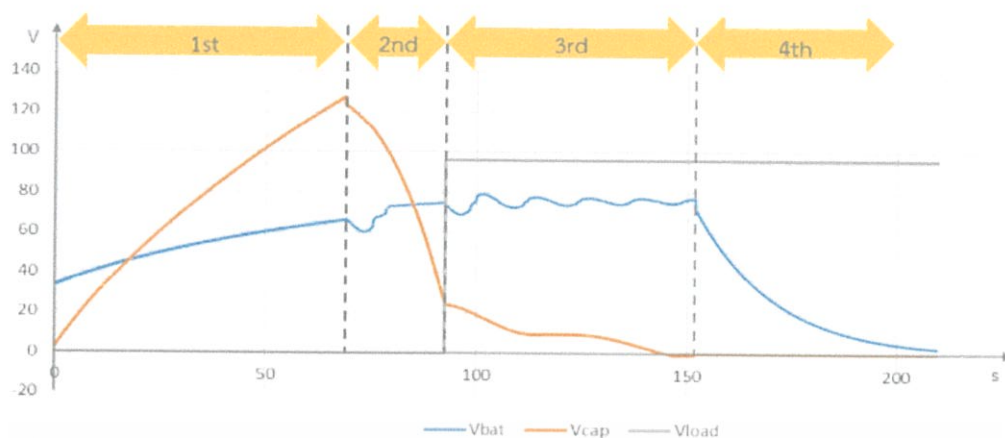


รูปที่ 3.11 การจำลองวงจรภายในของดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ระหว่างแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และวงจรควบคุมแรงดันคงที่ผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

3.6.1 ผลการทดลอง

ในการทดลองจำลองระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ผ่านโปรแกรม PSIM Simulation แบ่งช่วงการทดลองออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงการอัดประจุจากเครื่องอัดประจุไฟฟ้าไปยังตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและภาระทางไฟฟ้า และช่วงการถ่ายโอนประจุจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไปยังภาระทางไฟฟ้า

3.6.1.1 ผลการจำลองของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสานผ่าน PSIM simulation



รูปที่ 3.12 กราฟผลการทดลองค่าแรงดันทางไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน

3.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงอุปกรณ์ และการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน ระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและภาระทางไฟฟ้าผ่านวงจรตีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ประเภทบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นในวงจร รวมถึงการจำลองช่วงการทำงานในลักษณะต่างๆทั้งช่วงช่วงการอัดประจุจากเครื่องอัดประจุไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและภาระทางไฟฟ้า และช่วงการถ่ายโอนประจุจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไปยังภาระทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSIM Simulation เพื่อทดลองประสิทธิภาพของวงจรไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบ รวมถึงเพื่อสังเกตพฤติกรรมการทำงานของทั้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในวงจร และเป็นแนวทางในการทำการทดลองต้นแบบในขั้นต่อไป

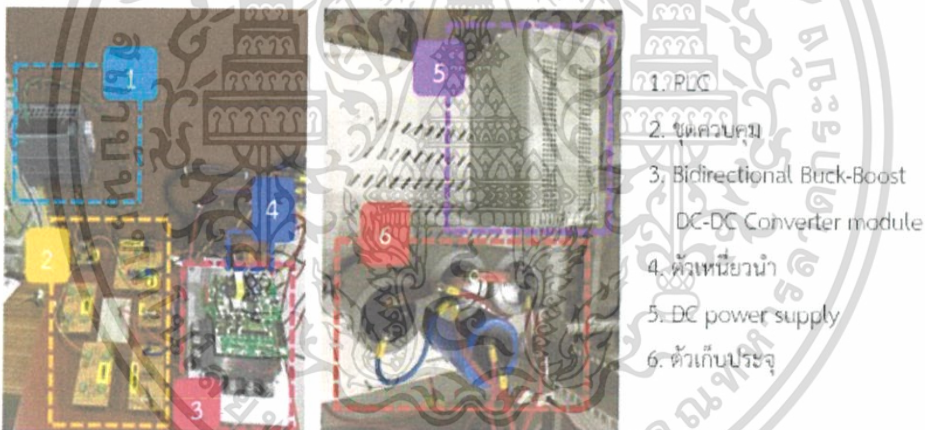
บทที่ 4 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

4.1 บทนำ

วงจรไฟฟ้าของเครื่องต้นแบบในส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน มีองค์ประกอบดังนี้ วงจรกำลัง และวงจรควบคุม โดยการออกแบบจำเป็นต้องเข้าใจถึงการทำงานและโครงสร้างโดยละเอียดของอุปกรณ์ในแต่ละส่วนที่นำมาต่อร่วมกัน รวมถึงการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้อุปกรณ์จะสามารถทำงานร่วมกัน และสามารถแก้ไขเมื่อเกิดปัญหาในการทำงานได้

4.2 การออกแบบและสร้างชิ้นงานจริง

เนื่องด้วยจุดประสงค์หลักของโครงงานนั้น ต้องการที่จะนำการออกแบบนี้ไปประยุกต์ใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบและการสร้างชิ้นงานต้นแบบต้องอยู่บนพื้นฐานของแนวคิดของการสร้างชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ประหยัดพื้นที่ น้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพที่สูง โดยเครื่องต้นแบบจะถูกจัดวางอยู่บนแผ่นเบกาไลท์ ขนาด 44.5 x 44.5 ตารางเซนติเมตร 2 แผ่น โดยติดตั้งเป็น 2 ชั้น อยู่บนชั้นวาง แสดงดังรูปที่ 4.1

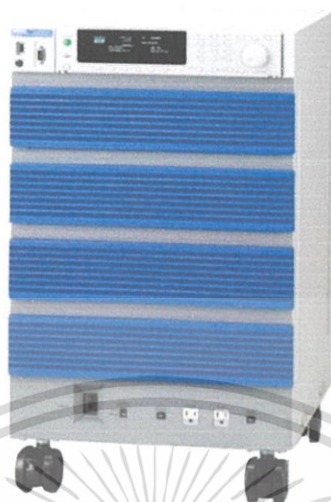


รูปที่ 4.1 เครื่องต้นแบบทั้งหมด

4.3 ชุดวงจรกำลัง

4.3.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจำลอง

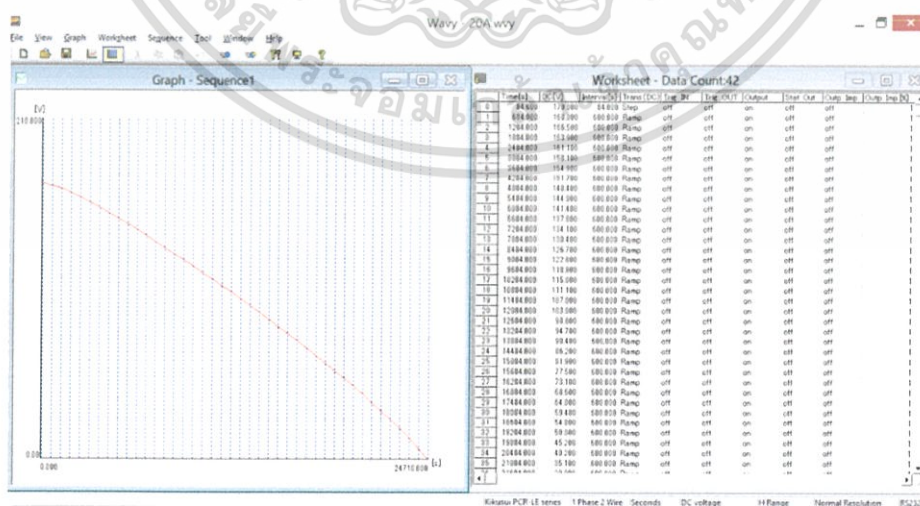
เนื่องด้วยราคาของตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้นมีราคาที่สูงมาก ในขั้นตอนการออกแบบและสร้างชิ้นงานจริงนี้จึงใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า PCR4000LE จาก KIKUSUIELECTRONICS CORP ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า PCR4000LE (AC Power Source)

เพื่อจำลองเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยใช้โปรแกรม WAVY ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถจำลองกราฟการคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด อีกทั้งยังแก้ไขหรือ ปรับปรุงกราฟให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น หรือสร้างลักษณะการคายประจุได้ตามเงื่อนไขที่เราต้องการทดลอง โดยยึดตามข้อมูลคุณลักษณะของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในหัวข้อที่ 3.3.2 รวมทั้งผลการทดลอง

ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในกราฟผลการทดลองค่าแรงดันทางไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน



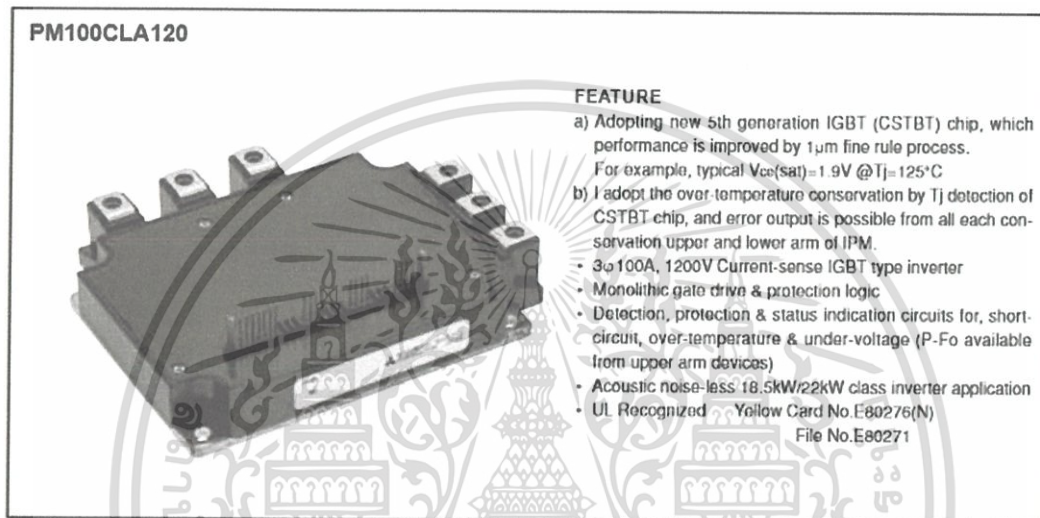
รูปที่ 4.3 กราฟจำลองการคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยใช้โปรแกรม WAVY

4.3.2 โมดูล บิ๊ก-บูสต์ คอนเวอร์เตอร์

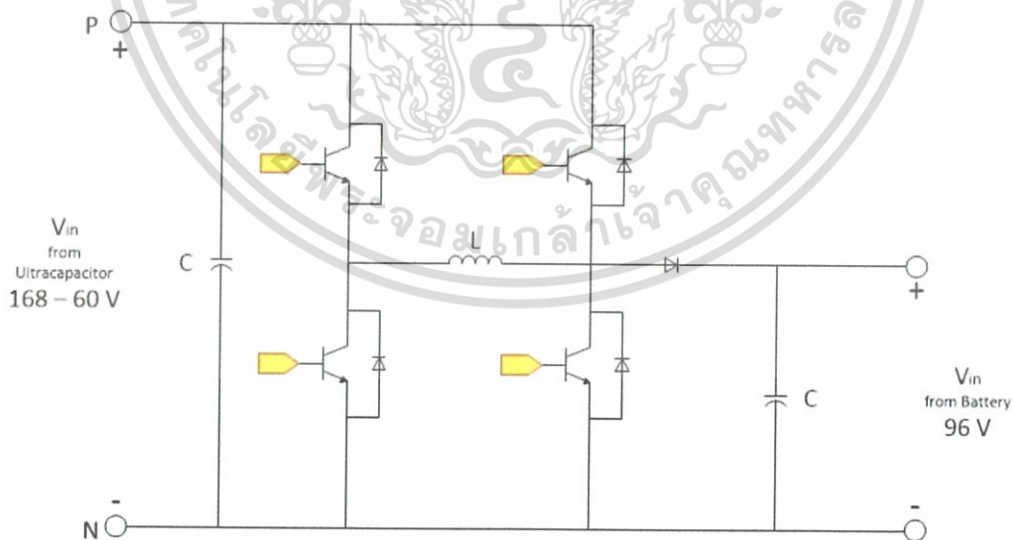
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมดูล บั๊ก-บูสต์ คอนเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า PCR4000LE (KIKUSUI Power Supply) เป็นไฟฟ้ากระแสตรงขาออกที่ พิกัด 96 V เพื่ออัตราจุเข้าแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและจ่ายให้กับโหลด โดยโมดูลนี้ได้ตัดแปลงมาจากโมดูล อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ดีซี-เอซี สำเร็จรูปของ MITSUBISHI (PM100CLA120 INTELLIGENT POWER MODULES) ดังรูปที่ 4.4

ในโครงการนี้ได้เลือกใช้เพียงบางส่วนของการทำงาน ซึ่งมีไดอะแกรมแสดงการทำงานภายในของโมดูลในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าในช่วง 168-60 V ไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงขาออกที่ พิกัด 96 V ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 โมดูล อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ดีซี-เอซี



รูปที่ 4.5 ไดอะแกรมแสดงการทำงานภายในของโมดูล

โดยการทำงานของโมดูล บั๊ก-บูสต์ คอนเวอร์เตอร์จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2

โหมด ดังนี้

1. โหมดบั๊ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานอยู่ในช่วงไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า 168-96 V ซึ่งมีการคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุดังต่อไปนี้

$$\text{จากสูตร} \quad D = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \quad (4.1)$$

$$D = \frac{96 \text{ V}}{168 \text{ V}} = 0.5714$$

$$\text{จากสูตร} \quad L_{\text{min}} = \frac{(1-D) V}{2f} \times \frac{1}{I} \quad (4.2)$$

$$L_{\text{min}} = \frac{(1-0.5714) 96}{2(6000)} \times \frac{1}{10} = 342.88 \mu\text{H}$$

$$\text{จากสูตร} \quad \frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{(1-D)}{8LCf^2} ; \frac{\Delta V_o}{V_o} \leq 2\% \quad (4.3)$$

$$C = \frac{(1-D)}{8Lf^2 \frac{\Delta V_o}{V_o}}$$

$$C = \frac{(1-0.5714)}{8(342.88 \times 10^{-6})(6000)^2 \times 0.2} = 21.70 \mu\text{F}$$

2. โหมดบูสต์

ทำงานอยู่ในช่วงไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า 96-60 V ซึ่งมีการคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุดังต่อไปนี้

$$\text{จากสูตร} \quad \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (4.4)$$

$$\frac{96}{60} = \frac{1}{(1-D)}$$

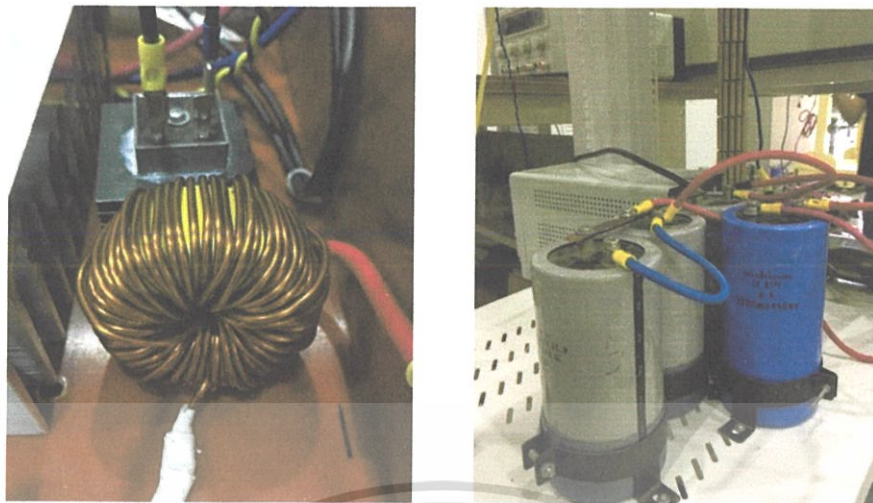
$$D = 0.375$$

$$\text{จากสูตร} \quad L_{\text{min}} = \frac{D(1-D)^2}{2f} \times R \quad (4.5)$$

$$L_{\text{min}} = \frac{0.375(1-0.375)^2}{2(6000)} \times \frac{96}{10}$$

$$L_{\text{min}} = 117.19 \mu\text{H}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

4.4 การออกแบบวงจรควบคุม

4.4.1 ชุดวงจรควบคุมสำหรับควบคุมกระแสป้อนกลับและแรงดันป้อนกลับ ประกอบไปด้วย 5 ส่วนดังนี้

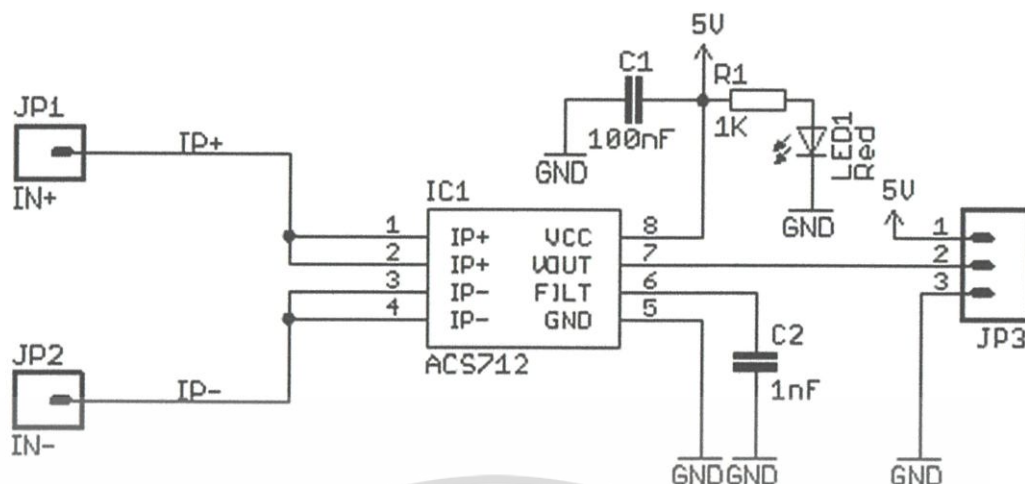
1. ตัวตรวจจับสนะไฟ

วงจรตรวจจับสนะไฟทำหน้าที่ตรวจจับสนะไฟแล้วทำการป้อนกลับสัญญาณเข้าสู่ตัวควบคุม โดยกระแสป้อนกลับใช้ GY-712 ซึ่งรับค่าสัญญาณกระแสมาจากเอาต์พุตของวงจร โดยมีอัตราส่วนจะได้สัญญาณกระแสไฟฟ้ที่มีขนาดลดลงและเข้าสู่ อนุาล็อกอินพุตของ PLC



รูปที่ 4.7 ตัวตรวจจับสนะไฟ GY-712

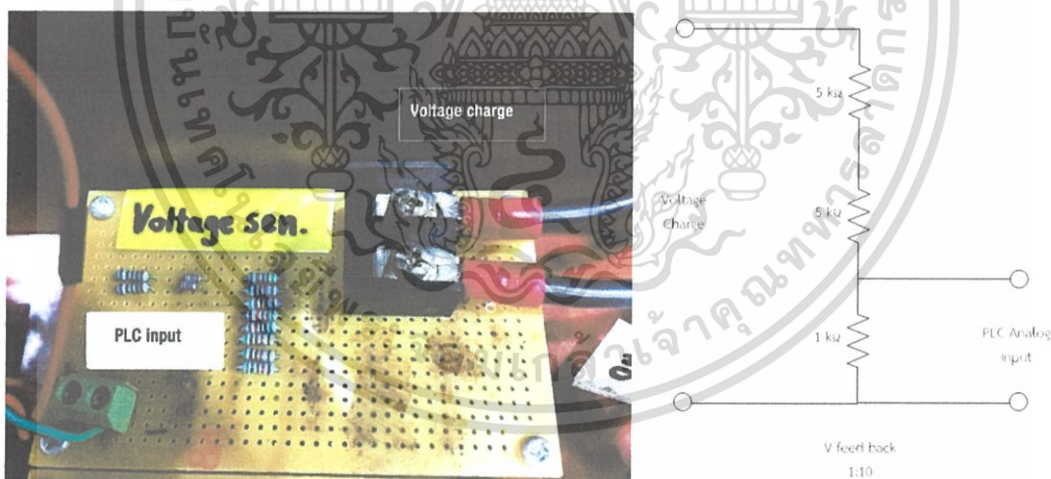
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ไดอะแกรมแสดงการทำงานภายในของตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า GY-712 [20]

2. ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันไฟฟ้าในการอัดประจุแล้วทำการป้อนกลับสัญญาณไปเข้าสู่ตัวควบคุมโดยใช้หลักการของการแบ่งแรงดันบนตัวต้านทาน เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าจริงที่ PLC ได้รับมีค่าอยู่ที่ 10 โวลต์ จากนั้นจะนำค่าที่ได้เข้าสู่อนุภาคอินพุทของ PLC

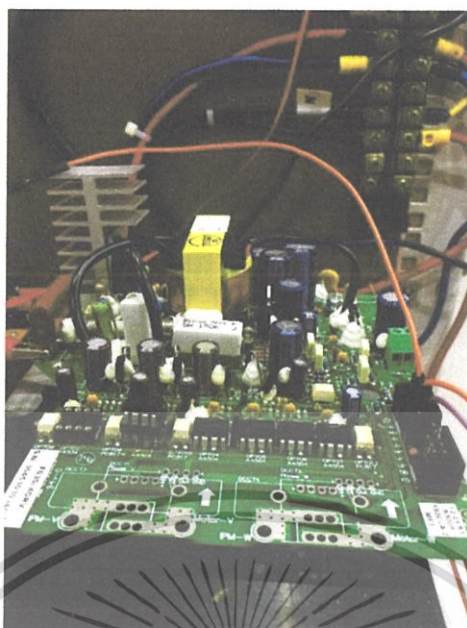


รูปที่ 4.9 ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและไดอะแกรมของตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

3. วงจรขับเคลื่อน

วงจรขับเคลื่อนมีหน้าที่ในการขับสวิตซ์ให้ทำงานตามที่ต้องการซึ่งวงจรจะรับคำสั่งมาจาก PLC ผ่าน ออปโต ไอโซเลเตอร์ เพื่อทำการแยกวงจรควบคุมและวงจรถูกสั่งออกจากกัน จากนั้นสัญญาณที่ได้มาจาก PLC มาทำการสั่ง ON/OFF สวิตซ์ที่อยู่ภายในโมดูล อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ดีซี-เอซี MITSUBISHI (PM100CLA120 INTELLIGENT POWER MODULES) ดังรูปที่ 4.10

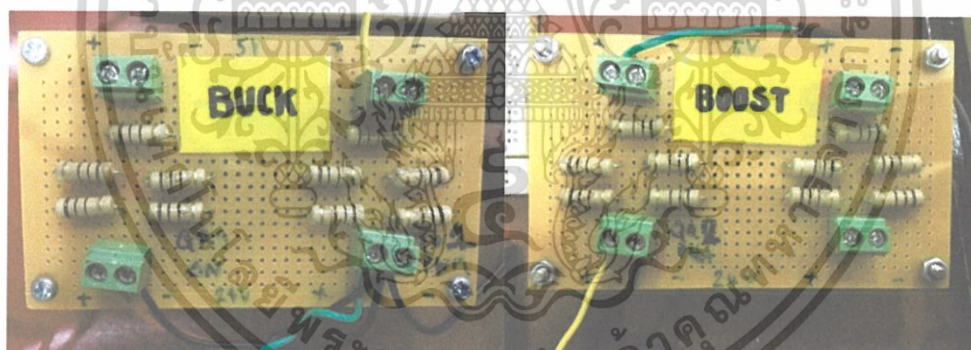
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 วงจรขับเกต

4. วงจรลดระดับแรงดัน

วงจรลดระดับแรงดันใช้ในการลดระดับแรงดันขาออกจาก PLC เข้าสู่วงจรขับเกต โดยลดระดับแรงดันจาก 24 โวลต์ จนเหลือ 5 โวลต์ ซึ่งมีวงจรดังรูปที่ 4.11

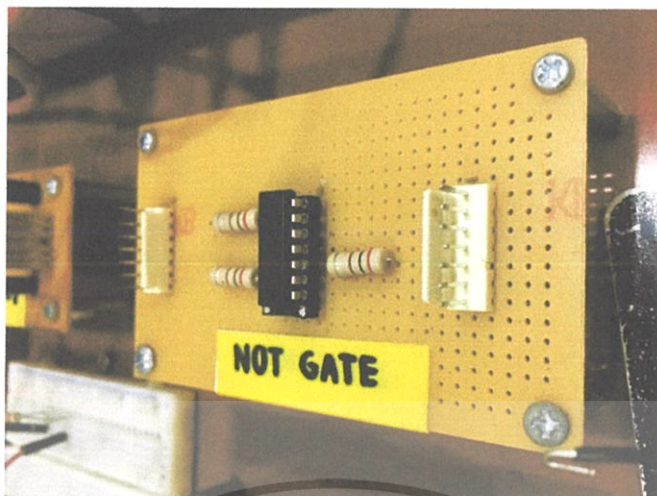


รูปที่ 4.11 วงจรลดระดับแรงดัน

5. วงจร NOT gate

วงจร NOT gate เป็นวงจรช่วยกลับสัญญาณจาก PLC ก่อนเข้าออปโต เนื่องจากออปโตจะใช้งานสัญญาณตรงข้ามกับสัญญาณจาก PLC คือจะทำงานที่ระดับแรงดันต่ำและหยุดทำงานที่ระดับแรงดันสูง ซึ่งวงจร NOT gate เป็นดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



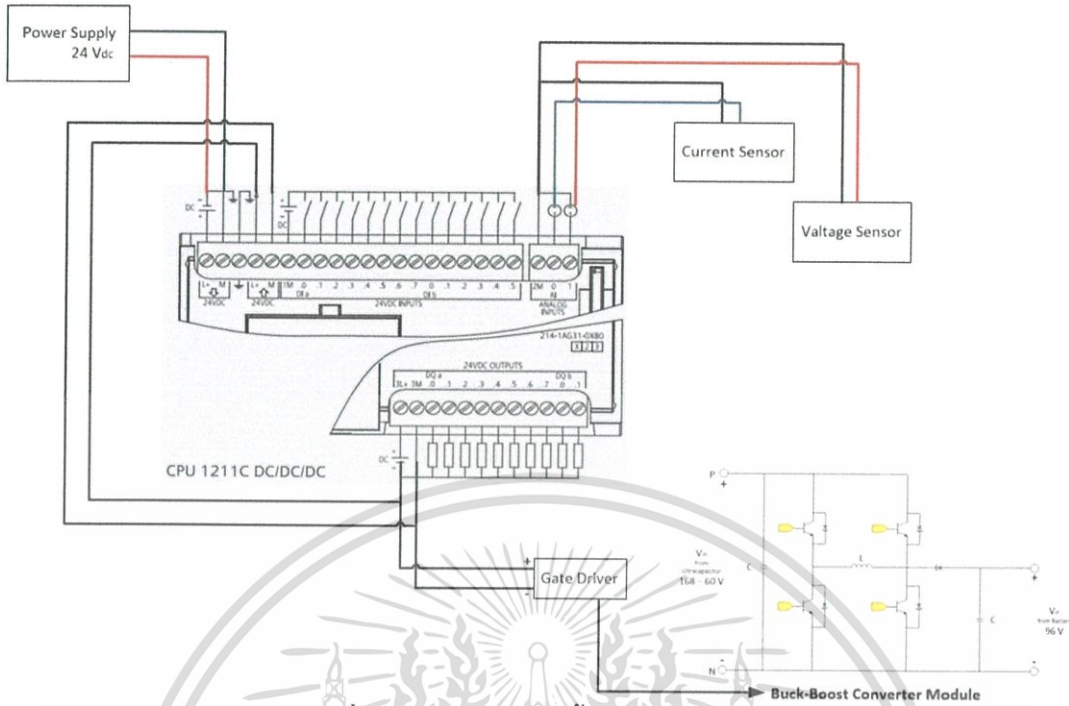
รูปที่ 4.12 NOT gate

4.4.2 PLC (Programmable Logic Controller) model S7-1200 CPU1211C



รูปที่ 4.13 หน่วยประมวลผล SIMATIC S7-1200 ของบริษัท Siemens

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

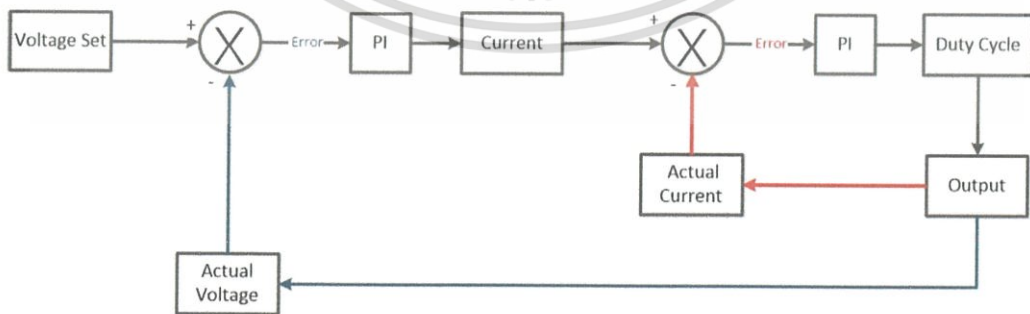


รูปที่ 4.14 วงจรควบคุมทั้งหมดโดยใช้ PLC

4.5 การออกแบบการเขียนโปรแกรมควบคุม

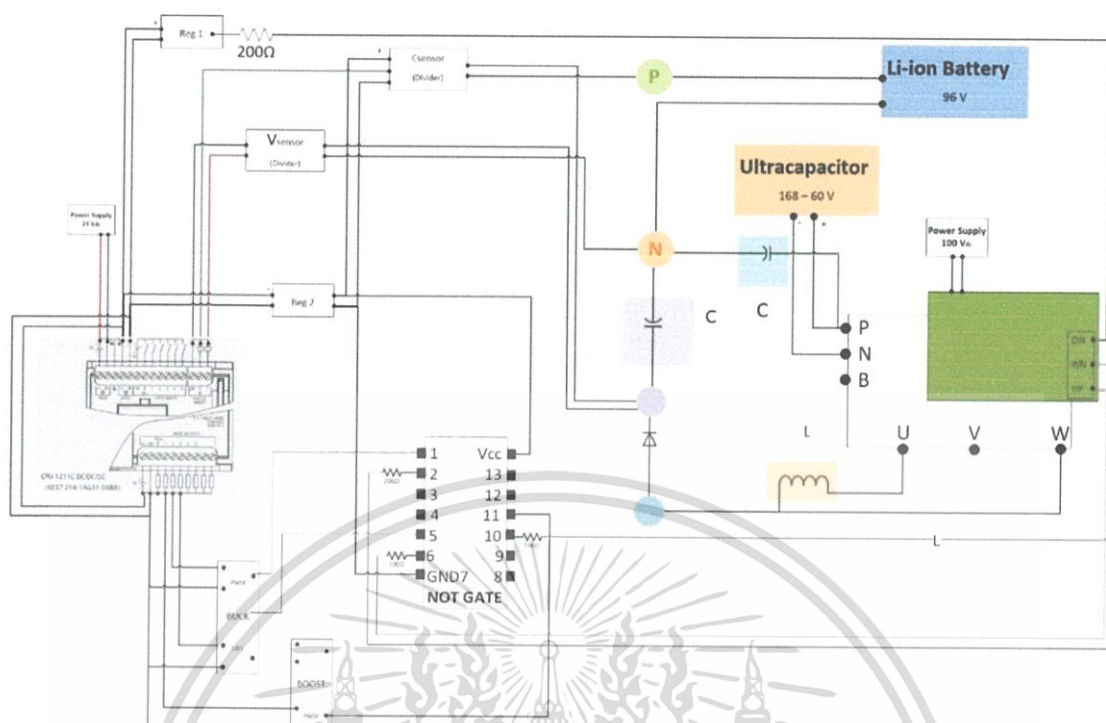
4.5.1 โหมดการอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่
 การอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ เป็นการอัดประจุเริ่มแรกของเครื่องอัดประจุเพื่อ
 ความรวดเร็วในการอัดประจุ โดยจะออกแบบให้อัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ 10 แอมป์ โดยทำการ
 ปรับค่า Duty cycle เพื่อจ่ายโวลต์ให้เพิ่มลดตามกระแสที่คงที่

4.5.2 โหมดการอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่
 การอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่เป็นการอัดประจุในช่วงท้ายของการอัดประจุเพื่อ
 ป้องกันการเสียหายของแบตเตอรี่ โดยจะปรับ Duty cycle ให้จ่ายระดับแรงดันคงที่ ซึ่งในช่วงนี้
 กระแสจะค่อยๆ ลดลงจากการอัดประจุจนทำให้การอัดประจุสิ้นสุดลง



รูปที่ 4.15 โดอะแกรมการอัดประจุเข้าแบตเตอรี่ของ PLC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 , ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ไดอะแกรมของวงจรกำลังและวงจรควบคุม

4.6 สรุป

การออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ในงานวิจัยนี้ จะเลือกใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทาง โดยใช้โหมดในการอัดประจุด้วยโหมดกระแสคงที่และโหมดการอัดประจุด้วยระดับแรงดันคงที่ โดยจำกัดกระแสชาร์จให้ไม่เกิน 10 แอมป์ วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทางควบคุมการทำงานด้วยการเปิดและปิดของสวิตช์ซึ่งเลือกใช้ไอจีบีทีที่อยู่ภายในโมดูลซึ่งได้ดัดแปลงมาจากโมดูล อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ดีซี-เอซี สำเร็จรูปของ MITSUBISHI ซึ่งจะสับสวิตช์ที่ความถี่ 6 กิโลเฮิร์ตโดยควบคุมด้วย Programable Logic Controller (PLC) model s7-1200 เป็นตัวควบคุมด้วยการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยกระแสป้อนกลับซึ่งรับสัญญาณมาจากอุปกรณ์ตรวจจับสนภูมิ (GY-712) และควบคุมแบบป้อนกลับด้วยแรงดันด้วยทฤษฎีการแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ที่ตัวต้านทาน ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบค่าต่างๆของวงจร เช่นตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ รวมถึงการออกแบบวงจรควบคุม วงจรไฟเลี้ยงที่ใช้ซึ่งประกอบกันเป็นเครื่องอัดประจุระดับสองต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

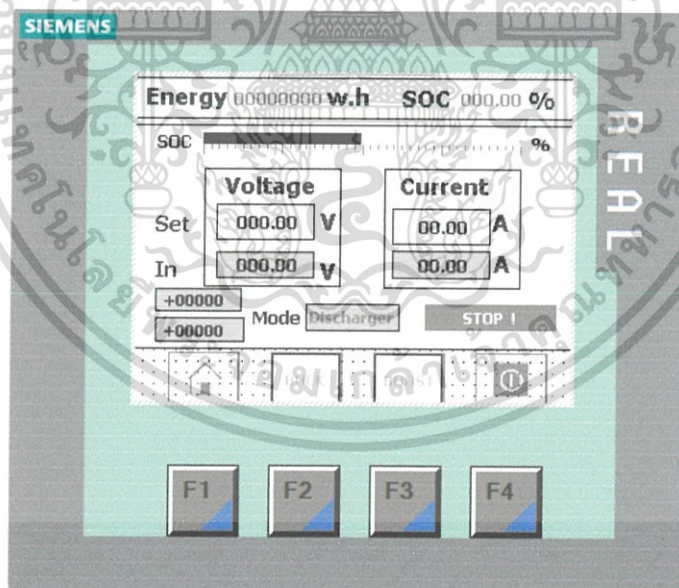
บทที่ 5 ผลการทดลอง

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอถึงผลการทดสอบการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดจำลองไปยังแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดยผ่านโมดูล บิ๊ก-บูสต์ คอนเวอร์เตอร์ ด้วยกระแสและแรงดันคงที่ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลการถ่ายโอนพลังงานไปยังแบตเตอรี่ฟัด 96 โวลท์ 120 แอมป์ชั่วโมง และโหลดฟัด 96 โวลท์ 1.2 กิโลวัตต์ ซึ่งประกอบไปด้วยการนำเสนอผลของโปรแกรมอินเตอร์เฟซระหว่างแหล่งกักเก็บพลังงานสองแหล่งและผลการอัดประจุจริงให้แก่แบตเตอรี่ซึ่งจะแสดงค่าแรงดันและกระแสในการถ่ายโดยพลังงานขั้วของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน และเก็บค่า State of Charge ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนตลอดช่วงเวลาการถ่ายโอนพลังงาน

5.2 ผลการทดสอบ

5.2.1 หน้าจอแสดงผลการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ ในการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าต้องมีหน้าจอกำหนดการทำงานของโปรแกรมควบคุม มีหน้าที่ในการกำหนดตัวแปรและควบคุมการอัดประจุ โดยหน้าจอแสดงการทำงานของเครื่องอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าระดับสองดังกล่าวถูกเขียนโดย Programmable Logic Controller (PLC) model s7-1200 ดังรูปที่ 5.1 โดยมีส่วนประกอบของอินเตอร์เฟซดังนี้



รูปที่ 5.1 หน้าจอแสดงผลการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่

Voltage Set point และ Current Set point

เป็นส่วนของตัวแปรต้นของการทดลองซึ่งมีความสัมพันธ์กับวงจรควบคุมและตัวควบคุมของวงจรอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าประกอบด้วย Voltage Set point เป็นระดับแรงดันที่สามารถปรับค่าได้ในการถ่ายโอนพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและ Current Set point คือกระแสที่สามารถลิมิตได้ของโปรแกรมควบคุมการอัดประจุทำหน้าที่ในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิมิตไม่ให้กระแสการอัดประจุไม่สูงเกินที่กำหนดไว้เพื่อป้องกันความเสียหายของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ซึ่งมีพิกัด Voltage Set point เท่ากับ 96 โวลท์ และ Current Set point เท่ากับ 10 แอมแปร์

Input voltage และ Input current

เป็นส่วนของตัวแปรตามของการถ่ายโอนพลังงานที่ไม่สามารถควบคุมได้ โดยมาจากตัวตรวจจับสนแรงและตรวจจับสนแรงดันของวงจรตีซีตีซีคอนเวอร์เตอร์ ประกอบด้วย Input voltage คือระดับแรงดันไฟฟ้าจริงของการถ่ายโอนพลังงานตรวจจับสนด้วยตัวตรวจจับสนแรงดันไฟฟ้าและ Input current คือระดับกระแสในการถ่ายโอนพลังงานสู่แบตเตอรี่ของวงจรตีซีตีซีคอนเวอร์เตอร์ซึ่งตรวจจับสนด้วยตัวตรวจจับสนกระแสไฟฟ้า

State of Charge

เป็นส่วนของค่าที่แสดงถึงการอ้างอิงความจุแบตเตอรี่ที่ทำการอัดประจุว่ามีประจุในการอัดประจุที่เท่าไร เพื่อให้สามารถทราบถึงระดับของแบตเตอรี่ที่จะทำการอัดประจุหรือทราบว่าใช้แบตเตอรี่ถึงระดับไหน ใกล้หมดแล้วหรือยัง โดยต้องทำการอ้างอิงระดับแรงดันของแบตเตอรี่ที่อัดประจุเต็มไว้เพื่อในการอัดประจุครั้งต่อไป โดยใช้ทฤษฎีของการนับประจุในแบตเตอรี่ (Colum Counting) โดยส่วนดังกล่าวยังทำงานได้ไม่ค่อยสมบูรณ์นักเนื่องจากขาดอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับระบบดังกล่าวที่ต้องติดกับตัวรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อทราบถึงค่าระดับของแบตเตอรี่ที่ใช้อยู่ตลอดเวลา

Mode

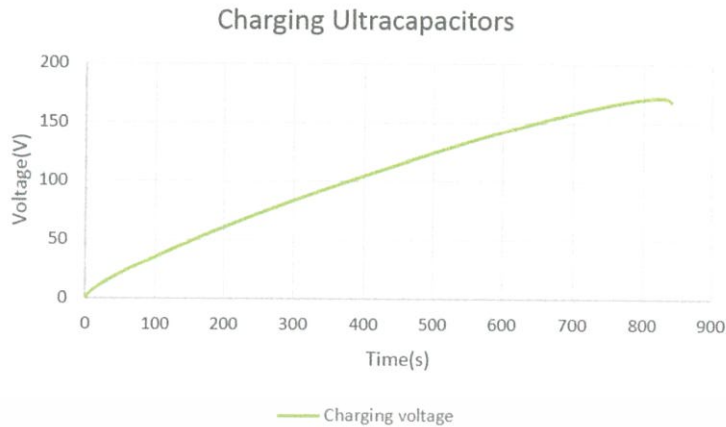
เป็นส่วนที่แสดงการใช้งานการทำงานของวงจรตีซีตีซีคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย Buck mode และ Boost mode

5.2.2 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน

การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบ่งเป็น 4 สถานะการทำงานคือ การอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและโหลด และการโอนถ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนไปยังโหลด

5.2.2.1 สถานะการทำงานที่ 1 การอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

การทำงานในสถานะการทำงานนี้ไม่สามารถทำการทดลองจริง อันเนื่องสาเหตุมาจากไม่ได้ใช้ตัวเก็บยิ่งยวดจริงเนื่องด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีราคาที่สูง จึงใช้จากการจำลองผ่านโปรแกรม WAVY และ Power supply จึงใช้ผลการทดลองในสถานะการทำงานนี้จากการ simulation ผ่านโปรแกรม PSIM



รูปที่ 5.2 กราฟการอัดประจุไฟฟ้าให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

5.2.2.2 สถานะการทำงานที่ 2 การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยใช้วงจรตีซีตีคอนเวอร์เตอร์

การคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดใช้ข้อมูลการคายประจุจากโปรแกรม PSIM มาจำลองเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยใช้โปรแกรม WAVY ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถจำลองกราฟการคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งลักษณะการคายประจุเป็นดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 กราฟการคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดโดยจำลองผ่านโปรแกรม WAVY

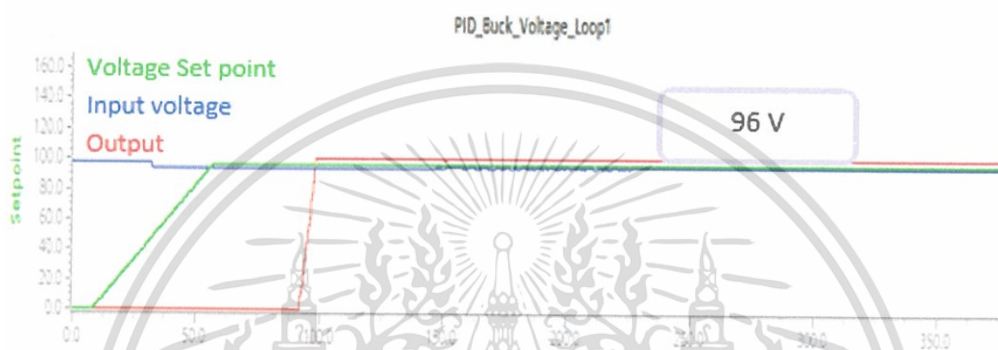
การทำงานของสถานะการทำงานที่ 2 การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยใช้วงจรตีซีตีคอนเวอร์เตอร์ จะแบ่งโหมดทำงานเป็น 2 โหมด คือ การทำงานโหมดบักของวงจรตีซีตีคอนเวอร์เตอร์ และการทำงานโหมดบูสต์ของวงจรตีซีตีคอนเวอร์เตอร์

การทำงานโหมดบักของวงจรตีซีตีคอนเวอร์เตอร์

ในการทดลองถ่ายโอนพลังงานของแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าสองแหล่ง ได้ออกแบบระบบควบคุมการอัดประจุระดับแรงดันที่สูงพอกับแบตเตอรี่ที่ทำการอัดประจุ โดยระดับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

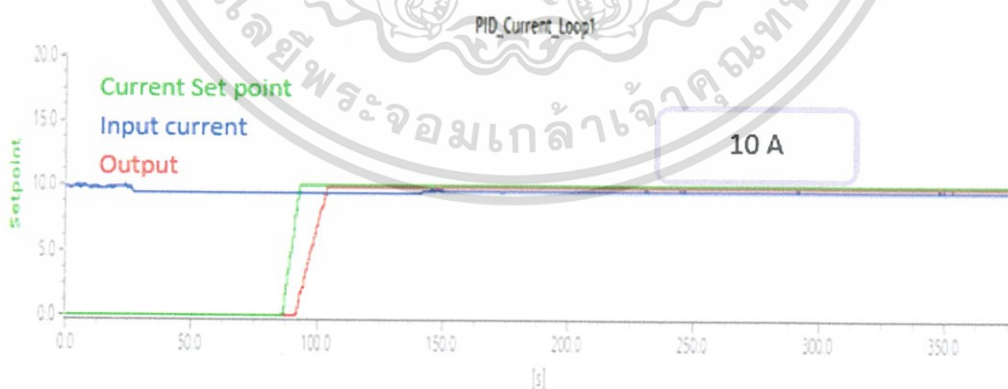
แรงดันจะค่อยๆเพิ่มขึ้นทีละขั้นจากศูนย์จนไปถึงค่าที่ตั้งไว้ของ Voltage Set ซึ่งเท่ากับระดับแรงดันของแบตเตอรี่โดยการขึ้นแรงดันดังกล่าวเรียกว่า Ramp ซึ่งประโยชน์ของการขึ้นแรงดันดังกล่าวคือป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่ไม่สามารถรับแรงดันได้ทันทีทันใดได้

ในรูปที่ 5.4 แสดงกราฟแรงดันของการทำงานในโหมดบ๊ักของการถ่ายโอนพลังงานระหว่างแหล่งกักเก็บพลังงานสองแหล่ง โดยกราฟสีเขียวแสดงถึง Voltage set point ที่กำหนดคือ 96 โวลต์ กราฟสีน้ำเงินแสดงถึง Input voltage และกราฟสีแดงแสดงถึง แรงดันขาออกจากวงจรตีตีซีคอนเวอร์เตอร์ จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อจ่ายกำลังไฟค่า Voltage Set point จะไม่ได้เพิ่มขึ้นในทันที แต่จะค่อยๆเพิ่มขึ้นเพื่อให้ค่า Output ค่อยๆปรับเพิ่มขึ้นตามทีละเล็กน้อย



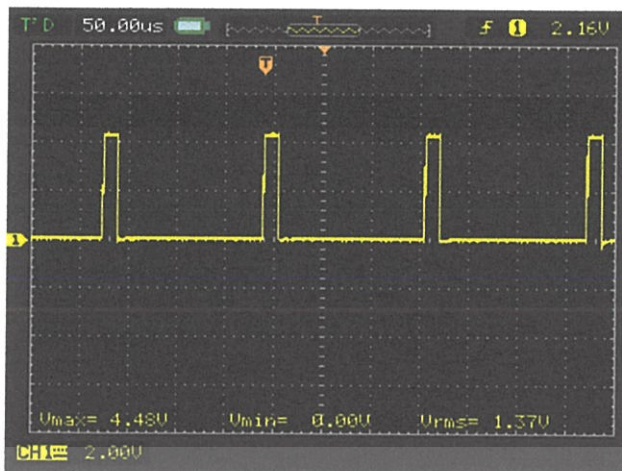
รูปที่ 5.4 กราฟแรงดันในโหมดบ๊ัก

ในรูปที่ 5.5 แสดงกราฟกระแสของการทำงานในโหมดบ๊ักของการถ่ายโอนพลังงานระหว่างแหล่งกักเก็บพลังงานสองแหล่ง โดยกราฟสีเขียวแสดงถึง Current set point ที่กำหนดคือ 10 แอมแปร์ กราฟสีน้ำเงินแสดงถึง Input current และกราฟสีแดงแสดงถึง กระแสที่ 10 แอมแปร์



รูปที่ 5.5 กราฟกระแสในโหมดบ๊ัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 กราฟสัญญาณ Duty cycle ทำงานที่ 90% เพื่อไปขับสวิตช์

จากรูปที่ 5.6 แสดงถึงกราฟสัญญาณตัวตัดไซเคิลที่ออกจาก PLC ก่อนจากเข้าเข้า วงจรขับเกตเพื่อไปขับสวิตช์ โดยจากกราฟจะแสดงค่าแรงดันเท่ากับ 4.48 โวลต์ และ 0 โวลต์ โดยมีความถี่การสวิตช์ซึ่งของวงจรที่ 6 กิโลเฮิร์ต และค่าตัวตัดไซเคิลเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ โดยผลการทดลองดังกล่าวเป็นตัวตัดไซเคิลที่ทำให้ระดับแรงดันคงที่ 96 โวลต์

การทำงานของโหมดบустของวงจรตีซีตีซีคอนเวอร์เตอร์

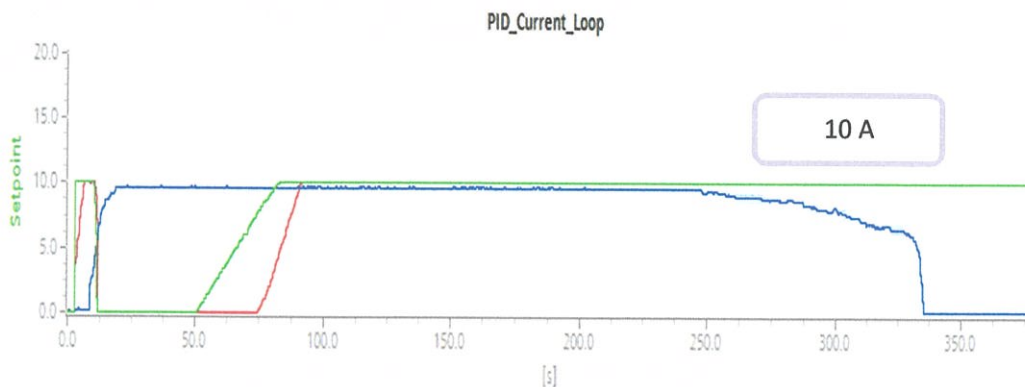
ในรูปที่ 5.7 แสดงกราฟแรงดันของการทำงานในโหมดบустของการถ่ายโอนพลังงานระหว่างแหล่งกักเก็บพลังงานสองแหล่ง โดยกราฟสีน้ำเงินแสดงถึง Input voltage กราฟสีเขียวแสดงถึง Voltage set point ที่กำหนดคือ 96 โวลต์ และกราฟสีแดงแสดงถึง แรงดันขาออกจากวงจรตีซีตีซีคอนเวอร์เตอร์



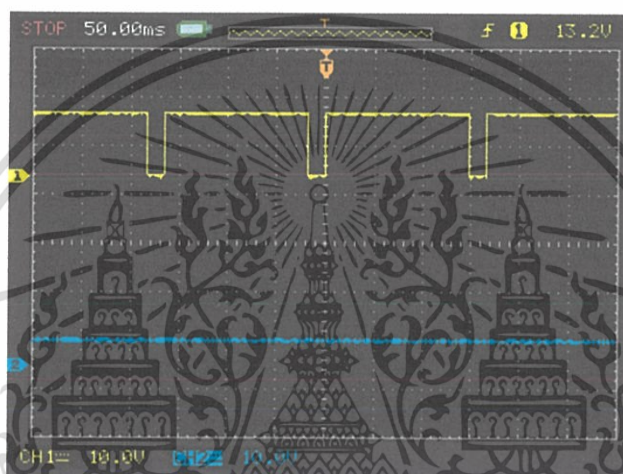
รูปที่ 5.7 กราฟแรงดันในโหมดบуст

ในรูปที่ 5.8 แสดงกราฟกระแสของการทำงานในโหมดบустของการถ่ายโอนพลังงานระหว่างแหล่งกักเก็บพลังงานสองแหล่ง โดยกราฟสีน้ำเงินแสดงถึง Input current ที่กำหนดคือ 10 แอมแปร์ กราฟสีเขียวแสดงถึง Current set point และกราฟสีแดงแสดงถึงกระแสคงที่ 10 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

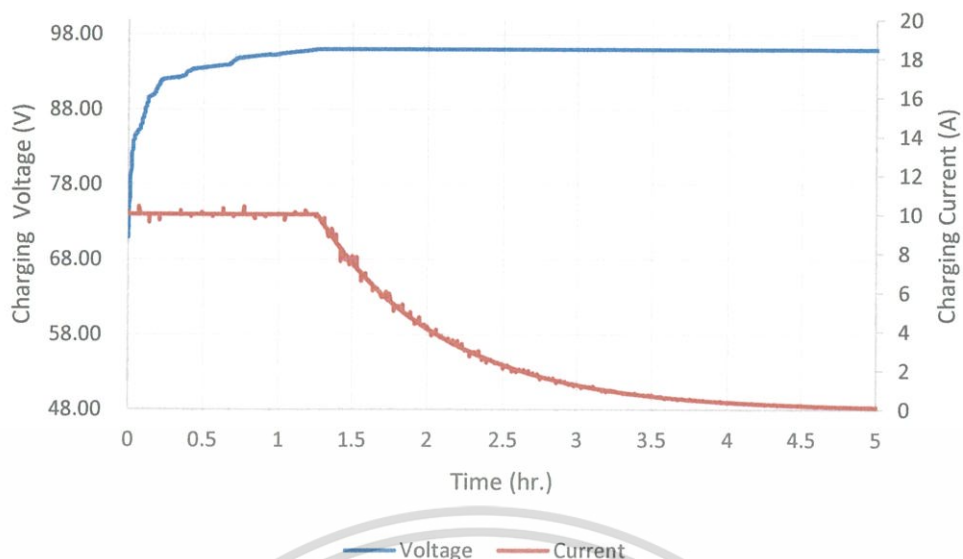


รูปที่ 5.8 กราฟกระแสในโหมดบูสต์



รูปที่ 5.9 กราฟสัญญาณ Duty cycle ทำงานที่ 20% เพื่อไปขับสวิตช์

จากรูปที่ 5.9 ช่องสัญญาณ 1 แสดงถึงกราฟสัญญาณดิวิตซ์ไซเคิลที่ออกจาก PLC ก่อนจากเข้าเข้าวงจรขั้วเกิดเพื่อไปขับสวิตช์ 4 โดยจากกราฟจะแสดงค่าแรงดันเท่ากับ 5.0 โวลท์ และ 0 โวลท์ โดยมีความถี่การสวิตซ์ซิงของวงจรที่ 6 กิโลเฮิร์ต และค่าดิวิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ และช่องสัญญาณที่ 2 แสดงถึงสัญญาณแรงดันขนาด 5.0 โวลท์คงที่เพื่อให้สวิตช์ 1 ทำงานตลอดเวลา เพื่อให้มีกระแสไหลทำให้สัญญาณดิวิตซ์ไซเคิลจากช่องสัญญาณที่ 1 สามารถสั่งสวิตช์ 4 ทำงานโดยผลการทดลองดังกล่าวเป็นดิวิตซ์ไซเคิลที่ทำให้ระดับแรงดันบูสต์ขึ้นคงที่ 96 โวลท์



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่

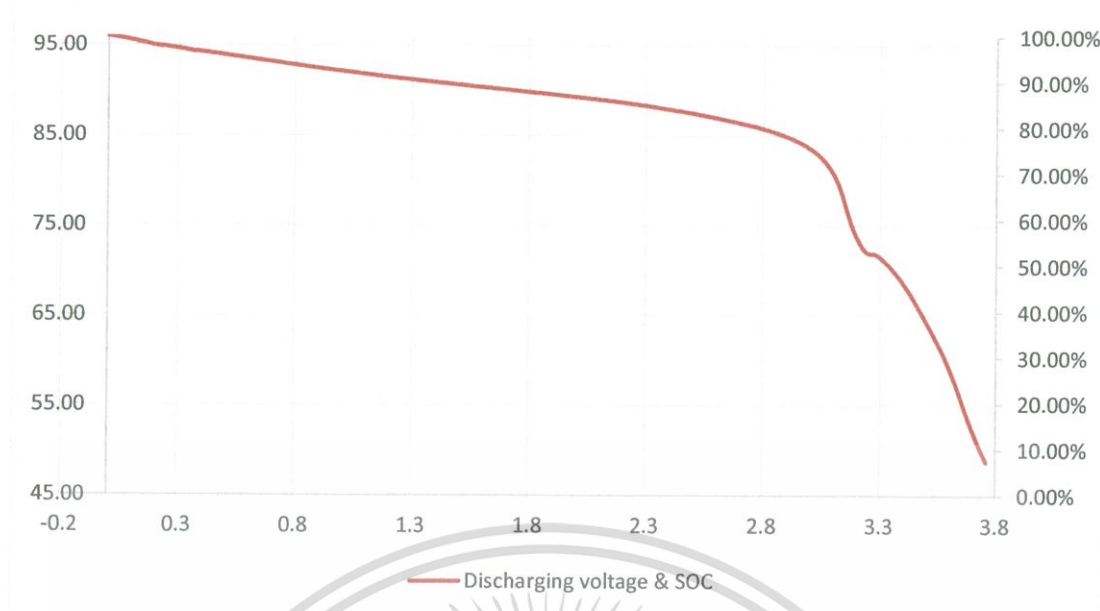
จากรูปที่ 5.10 เป็นกราฟแสดงการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ที่เก็บค่าโดย Data logger จะเห็นได้ว่าลักษณะการถ่ายโอนประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่เป็นการอัดประจุเริ่มแรกเพื่อความรวดเร็วในการถ่ายโอนประจุ โดยจะถ่ายโอนประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ 10 แอมป์ โดยทำการปรับค่า Duty cycle เพื่อจ่ายโวลต์ให้เพิ่มลดตามกระแสที่คงที่ และมีการถ่ายโอนประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่เป็นการถ่ายโอนประจุในช่วงท้ายของการถ่ายโอนประจุเพื่อป้องกันการเสียหายของแบตเตอรี่ โดยจะปรับ Duty cycle ให้จ่ายระดับแรงดันคงที่ที่ 96 โวลต์[ซึ่งในช่วงนี้กระแสจะค่อยๆ ลดลงจากการถ่ายโอนประจุจนทำให้การอัดประจูลิ้นสุดลง

5.2.2.3 สภาวะการทำงานที่ 3 การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและโพลดโดยใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์

การทำงานในสภาวะการทำงานนี้ ผลการทดลองจะเหมือนกับสภาวะการทำงานที่ 2 และ คือจะมีการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ และสภาวะการทำงานที่ 4 คือการถ่ายโอนพลังงานให้แก่โพลด

5.2.2.4 สภาวะการทำงานที่ 4 การโอนถ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไปยังโพลด

ในสภาวะการทำงานที่ 4 จำลองการโอนถ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไปยังโพลดจากการทดลองใช้โพลด ขนาด 14 โอห์ม เพื่อตั้งกระแสคงที่ 10 แอมแปร์ โดยกราฟการคายประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไปยังโพลดเป็นดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 กราฟการคายประจุของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและ SOC

จากรูปที่ 5.11 แสดงการคายประจุของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนไปยังโหลด โดยค่าแรงดันที่ใช้ในการดำเนินการจ่ายประจุไปยังโหลดจะใช้ค่าแรงดันที่ 96 โวลต์ ถึง 45 โวลต์

5.3 สรุป

จากการทดลองแบ่งการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานเป็น 4 สถานะการทำงาน สถานะการทำงานที่ 1 การอัดประจุตัวอัดประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ไม่สามารถทำการทดลองอัดประจุจริงได้เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีราคาสูงจึงใช้การจำลองจากโปรแกรม Wavy ดังนั้นผลการทดลองจึงอ้างอิงจากผล Simulation จากโปรแกรม PSIM สถานะการทำงานที่ 2 การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน จากการทดลองพบว่าวงจรต้นแบบดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์สามารถถ่ายโอนพลังงานได้ตามรูปแบบกระแสและแรงดันคงที่ ตามรูปที่ 5.2 ถึง รูปที่ 5.7 โดยสามารถควบคุมให้แรงดันเพิ่มขึ้นแบบ Ramp เพื่อป้องกันการเสียหายของแบตเตอรี่ ซึ่งเมื่อจ่ายถึงค่าแรงดัน(set point)ที่ต้องการจะเกิดการอัดประจุกระแสและแรงดันคงที่ทั้งโหมดบั๊กและโหมดบูสต์ สถานะการทำงานที่ 3 การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและโหลด และสถานะการทำงานที่ 4 การถ่ายโอนพลังงานจากแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนไปยังโหลด จากการทดลองในโหลด ขนาด 14 โอห์ม เพื่อตั้งกระแสคงที่ 10 แอมแปร์

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

6.1 บทสรุป

การกักเก็บพลังงานด้วยระบบแบตเตอรี่ในปัจจุบันได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ซึ่งรวมถึงการใช้แบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้าด้วย จากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ ทำให้ทราบถึงข้อจำกัดในการด้านการอัดประจุและระยะเวลาในการส่งจ่ายพลังงาน หรือมีความหนาแน่นพลังงานสูง แต่มีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าต่ำ ส่งผลกระทบให้ระยะเวลาในการอัดประจุแต่ละครั้งมีความยาวนาน ทางคณะผู้จัดทำโครงการจึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการผสมผสานระบบกักเก็บพลังงานดังกล่าวด้วยตัวเก็บประจุแบบยิ่งยวดซึ่งมีคุณสมบัติความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง แต่มีความหนาแน่นพลังงานที่ต่ำ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีของทั้งสองระบบกักเก็บพลังงานร่วมกัน

โครงการวิจัยนี้ได้จัดทำระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรตีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ ในการศึกษาช่วงแรกเป็นการศึกษาถึงคุณลักษณะเฉพาะของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าทั้งสองแบบและระบบการถ่ายโอนพลังงานโดยใช้วงจรตีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ หลังจากนั้นจึงทำการจำลองระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานโดยใช้โปรแกรม PowerSim 10 ในการจำลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะการโอนถ่ายพลังงานระหว่างแหล่งกักเก็บพลังงานทั้งสอง รวมถึงในส่วนของการถ่ายโอนพลังงานให้กับภาระไฟฟ้าด้วย

โดยการบันทึกกราฟความสัมพันธ์สองชนิดคือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด แรงดันของแบตเตอรี่ และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ จากผลการจำลอง โครงการวิจัยนี้ได้ใช้วงจร Bidirectional DC-DC converter การโอนถ่ายพลังงานระหว่างแหล่งกักเก็บพลังงานทั้งสอง เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ความซับซ้อนของวงจรไม่มาก อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบาและขนาดไม่ใหญ่มากอีกด้วย

ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานนี้ทำงานที่พิกัดแรงดัน 96 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ โดยใช้วงจรตีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์โมดูล PM100CLA120 มาประยุกต์ใช้ในถ่ายโอนพลังงานระหว่างแหล่งกักเก็บพลังงานทั้งสอง และภาระทางไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม Programmable Logic Controller Siemens S7-1200 ในการควบคุมการทำงานของวงจร และใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงรุ่น PCR1400LE และโปรแกรม Wavy for PCR-LE ในการจำลองการคายประจุของตัวเก็บไฟฟ้ายิ่งยวด จากผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดได้ในเวลา 14 นาที ที่พิกัดแรงดัน 168 โวลต์ 4.93 กิโลวัตต์ และถ่ายโอนพลังงานจากการคายประจุของตัวเก็บไฟฟ้าแบบยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในช่วงบัตได้ตั้งแต่ช่วง 168 โวลต์จนถึง 96 โวลต์ที่ดิวิตีไซเคิล 90 เปอร์เซ็นต์ และเปลี่ยนมาทำงานในช่วงบัสต์ได้ในช่วง 96 โวลต์จนถึง 64 โวลต์ที่ดิวิตีไซเคิล 20 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้พิกัดแรงดันที่ 96 โวลต์ กระแสที่ 10 แอมแปร์ ใช้เวลาทั้งสิ้น 5 ชั่วโมง 11 นาที จะเห็นได้ว่าจากการศึกษาและทดลองพบว่าวงจร Bidirectional DC-DC converter ที่ใช้ในการถ่ายโอนพลังงานของแหล่งกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของระบบกักเก็บไฟฟ้าแบบผสมผสานได้

6.2 ข้อเสนอแนะและปัญหาที่พบ

จากการดำเนินการทดลองตลอดโครงการวิจัยนี้พบว่า มีข้อควรเสนอแนะและข้อควรระวัง ดังต่อไปนี้

1. เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีราคาค่อนข้างสูง จำเป็นต้องใช้โปรแกรมในการจำลองตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งข้อมูลผลการทดลองที่ได้นั้น คาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง
2. ประเภทของโมดูล บิ๊ก-บูสต์ คอนเวอร์เตอร์ ที่เลือกไม่เหมาะสมทำให้ไม่สามารถตอบสนองได้ทุกกระบวนการจึงต้องเลือกวงจรใหม่
3. ในการออกแบบนั้นควรเลือกใช้ใช้อุปกรณ์ที่มีพิกัดกระแสและแรงดันเกินกว่าที่ออกแบบไว้เพื่อเป็นการป้องกันอุปกรณ์ไม่ให้เสียหายเมื่อใช้กระแสหรือแรงดันสูง
4. อุปกรณ์ในการวัดแรงดันไฟฟ้าควรใช้ Differential Probe เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับบออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

6.3 แนวทางการพัฒนา

แนวทางการพัฒนา โครงการวิจัยนี้สามารถพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเพิ่มพิกัดกำลัง และเพิ่มความหลากหลายในการใช้งานให้มากขึ้นดังนี้ ดังต่อไปนี้

1. ใช้อุปกรณ์สวิตชิงที่มีค่ากำลังสูญเสียที่น้อยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในส่วนของโมดูล บิ๊ก-บูสต์ คอนเวอร์เตอร์
2. ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจริงแทนการจำลองทางโปรแกรมเพื่อนำไปพัฒนาสู่การใช้งานจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงพลังงาน, “<http://www2.eppo.go.th/>,” 26 11 2016. [ออนไลน์]. Available: http://www2.eppo.go.th/encon/ee-20yrs/EEDP_Thai.pdf
- [2] ส. ยงประยูร, “<http://webcache.googleusercontent.com/>,” คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพวงศ์, [ออนไลน์]. Available: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:EsRB0y8BRzoJ:www2.eppo.go.th/tank/saura-ya-storage.doc+&cd=1&hl=en&ct=clnk&gl=th>. [ที่เข้าถึง 19 11 2016].
- [3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.), “<http://www.thai-smartgrid.com/>,” [Online]. Available: <http://www.thai-smartgrid.com/%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%9A%E0%B8%9A%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B9%87%E0%B8%9A%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99/>. [Accessed 19 11 2016].
- [4] D. P. W. presentation, “<http://www.slideshare.net/BusinessGrowthHub/>,” Graphene Industry Workshop, 5 8 2015. [Online]. Available: <http://www.slideshare.net/BusinessGrowthHub/dr-paul-wiper-presentation-graphene-week-25th-june>. [Accessed 19 11 2016].
- [5] admin, “<http://bb-batteryasia.com/>,” บริษัท บี.บี. แบตเตอรี่ (เอเชีย) จำกัด, [ออนไลน์]. Available: <http://bb-batteryasia.com/discharge-rate/>. [ที่เข้าถึง 19 11 2016].
- [6] Woodbank Communications, “www.mpoweruk.com/,” Woodbank Communications, [Online]. Available: <http://www.mpoweruk.com/life.htm>. [Accessed 19 11 2016].
- [7] “<https://www.seas.ucla.edu/html/>,” [Online]. Available: <https://www.seas.ucla.edu/~pilon/EES.html>. [Accessed 19 11 2016].
- [8] H. E. a. E. f. A. Nyman, Modeling the Lithium-Ion Battery, COMSOL WHITE PAPER SERIES, 2010.
- [9] K. A. Smith, Electrochemical Control of Lithium-Ion Batteries, IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE, 2010.
- [10] “batteryuniversity,” 7 10 2016. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion. [Accessed 19 11 2016].
- [11] ด. ว. กอปรสิริพัฒน์, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, [ออนไลน์]. Available: http://www.temcathai.com/download/magazine/volume_21_issue_2/75.pdf. [ที่เข้าถึง 19 11 2016].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [12] [Online]. Available: www.chademo.com.
- [13] "<http://www.energythai.com/>," EnergyThai, 19 March 2014. [Online]. Available: <http://www.energythai.com/2014/bmw-i8-i3/>. [Accessed 19 11 2016].
- [14] "<http://www.autospinn.com/>," [Online]. Available: <http://www.autospinn.com/2009/03/> [Accessed 19 11 2016].
- [15] พ. ธนารุจิเกียรติ , ว. เหลืองนภาเลิศ , อ. ทิพย์นาง and อ. ศรีประสิทธิ์, เครื่องอัดประจุพาทนะพลังงานไฟฟ้าระดับสองสำหรับประยุกต์ใช้ในอาคารอัจฉริยะ, bangkok: KMITL, 2015.
- [16] T. M. U. W. P. R. Ned Mohan, Power Electronic Converter, Application and Desingn, John Wiley & Sons Inc., 1995.
- [17] "www.scib.jp," TOSHIBA, 23 3 2017. [Online]. Available: <http://www.scib.jp/en/product/module.htm>.
- [18] "www.maxwell.com," maxwell, [Online]. Available: <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/56v-modules>. [Accessed 19 11 2016].
- [19] "<https://mall.industry.siemens.com/goos/WelcomePage.aspx?language=en®ionUrl=/>," .siemens, [Online]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10045650?tree=CatalogTree>.
- [20] "<http://www.kikusui.co.jp>," KIKUSUIELETRONICS CORP., 22 3 2017. [Online]. Available: <http://www.kikusui.co.jp/en/product/>.
- [21] "www.mitsubishielectric.com," mitsubishielectric, 22 3 2017. [Online]. Available: http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/catalog/pdf/powermodule_e_e_201505.pdf.
- [22] "<http://www.allegromicro.com/>," Allegro MicroSystems, 22. [Online]. Available: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS712.aspx>.



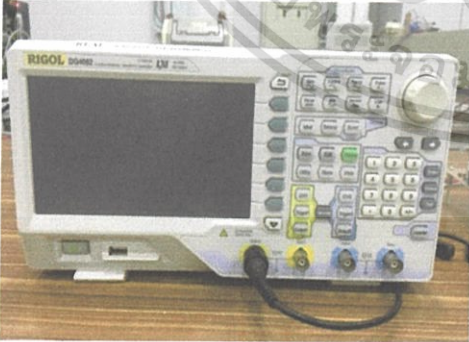


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญาโท

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>มัลติมิเตอร์ (Multi Meter)</p>
	<p>แคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter)</p>
	<p>ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope DS1104B)</p>


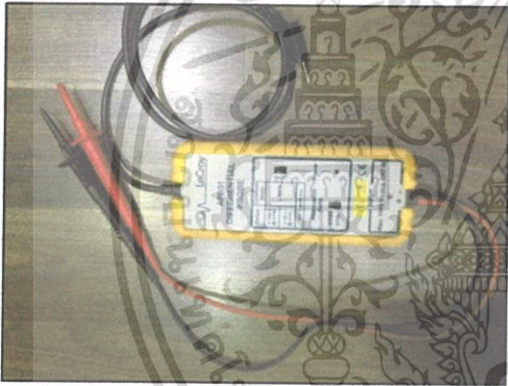
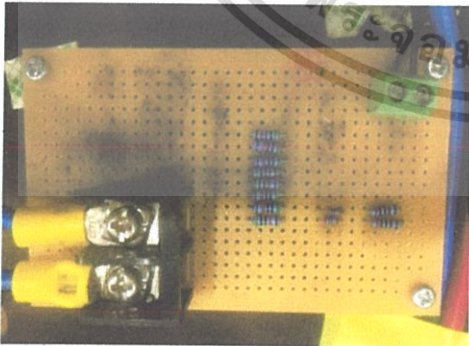
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ (KIKUSUI Power Supply)</p>
	<p>PLC SIMATIC S7-1200</p>
	<p>ตัวเก็บประจุ (Capacitor)</p>

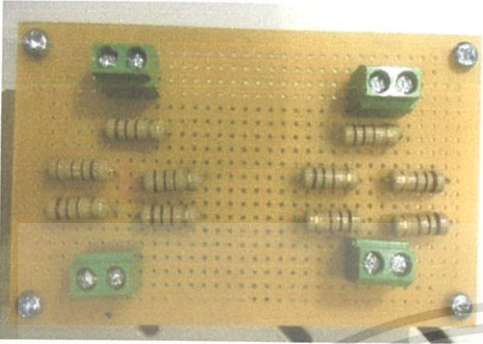
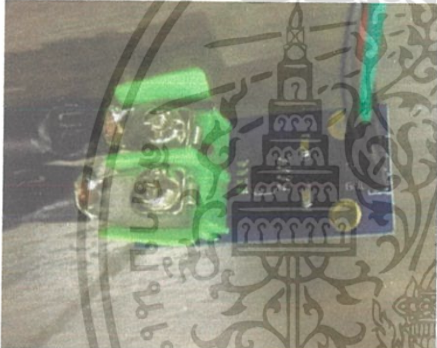
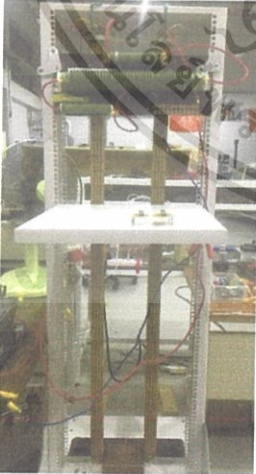
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญาโท

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p style="text-align: center;">แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Battery Lithium Lion)</p>
	<p style="text-align: center;">Differential Probe</p>
	<p style="text-align: center;">Voltage Divider</p>

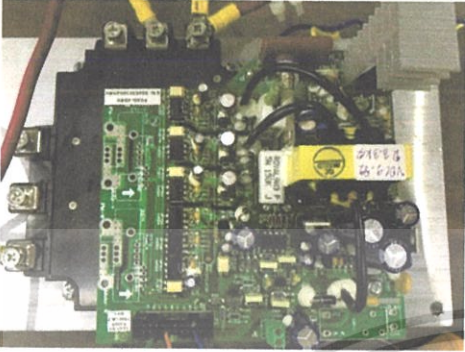
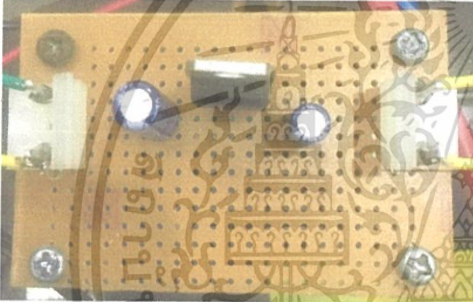
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>Voltage Divider</p>
	<p>Current Sensor</p>
	<p>ตัวต้านทาน (Resistor)</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญาโท

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>วงจรควบคุม (Control Circuit)</p>
	<p>Regulator</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Program block

 Boost - Cyclic Voltage Loop

```

IF "boost" = TRUE AND "buck" = FALSE THEN

    "CTRL_PWM_DB"(PWM := 267,ENABLE := TRUE,/"PID_Current_Loop".State=3,

        BUSY => #BUSY,

        STATUS => #STATUS);

IF ("PID_Voltage_Loop".Setpoint <= 0.0) THEN

    "PID_Voltage_Loop".Reset := TRUE;

ELSE

    IF (#STATUS <> 0) THEN

        "PID_Voltage_Loop".Reset := TRUE;

    ELSE

        IF NOT ("Run") THEN

            "PID_Voltage_Loop".Reset := TRUE;

        ELSE

            "PID_Voltage_Loop".Reset := FALSE;

        END_IF;

    END_IF;

END_IF;

//-----

"PID_Buck_Voltage_Loop1"(Setpoint := "OFF",

    Input_PER := "OFF",

    Output_PER => "Data_PID"."PID Out");

//PID Voatage Loop (sampling time 20 mS )

"PID_Voltage_Loop"(Setpoint := "Ramp Functiongen"."Output RampGen",

    Input_PER := "Voltage act",

    Output_PER => "Data_PID"."PID Out");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// Scall Current Setpoint 100% to 20 A//1380

"Data_PID"."PID Current Setpoint" := NORM_X(MIN := 0.0, VALUE := "Data_PID"."PID Out", MAX := 2764);

END_IF;

□ Buck - Cyclic Voltage Loop

//IF "Data_Meter".Voltage > 96 THEN

  //"boost" := FALSE;

//END_IF;

IF "buck" = TRUE AND "boost" = FALSE THEN

  "CTRL_PWM_DB"(PWM := 266,

    ENABLE := TRUE, //"PID_Current_Loop".State=3,

    BUSY => #BUSY,

    STATUS => #STATUS);

  IF ("PID_Buck_Voltage_Loop1".Setpoint <= 0.0) THEN

    "PID_Buck_Voltage_Loop1".Reset := TRUE;

  ELSE

    IF (#STATUS <> 0) THEN

      "PID_Buck_Voltage_Loop1".Reset := TRUE;

    ELSE

      IF NOT ("Run") THEN

        "PID_Buck_Voltage_Loop1".Reset := TRUE;

      ELSE

        "PID_Buck_Voltage_Loop1".Reset := FALSE;

      END_IF;

    END_IF;

  END_IF;

//PID Buck Voatage Loop (samping time 20 mS )

  "PID_Voltage_Loop"(Setpoint := "OFF",

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        Input_PER := "OFF",

        Output_PER => "farfaraway");

    "PID_Buck_Voltage_Loop1"(Setpoint := "Ramp Functiongen"."Output Rampgen1",

        Input_PER := "Voltage act",

        Output_PER => "Data_PID"."PID Out1");

    // Scall Current Setpoint 100% to 20 A

    "Data_PID"."PID Current Setpoint1" := NORM_X(MIN := 0.0, VALUE := "Data_PID"."PID Out1", MAX := 2764);

END_IF;

IF "boost" = FALSE THEN

    "PID_Voltage_Loop"(Setpoint := "OFF",

        Input_PER := "OFF",

        Output_PER => "Data_PID"."PID Out");

END_IF;

□ Cyclic Current Loop

//PID CURRENT Loop (sampling time 5 mS )

"OFF":=6928;

//IF "Data_Meter".Voltage > 96 THEN

// "boost" := FALSE;

// "buck" := TRUE;

//ELSE

// IF "Data_Meter".Voltage <= 96 THEN//AND "Data_Meter".Voltage >= 30 THEN

// "buck" := FALSE;

// "boost" := True;

// END_IF;

// IF "Data_Meter".Voltage < 30 THEN

// "buck" := FALSE;

// "boost" := FALSE;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// END_IF;

//END_IF;

IF "boost" = TRUE AND "buck" = FALSE THEN

  IF "PID_Current_Loop".Setpoint <= 0 THEN

    "PID_Current_Loop".Reset := 1;

  ELSE

    "PID_Current_Loop".Reset := 0;

  END_IF;

  "PID_Current_Loop"(Setpoint := "Data_PID"."PID Current Setpoint",

    Input_PER := "Current CT":P, //Current act":P,

    Output_PER => "PWM_Out_Boost":P; // "MW500"); //

  "PID_Current_Loop1"(Setpoint := "OFF",

    Input_PER := "OFF", // "Current act":P,

    Output_PER => "farfaraway"); // "MW500"); //

  // "PWM_Out":P := "MW502";

  // Ramp Functiongen

  IF ("Ramp Functiongen"."Input RampGen" < 0.0) THEN

    "Ramp Functiongen"."Mem Out" := 0.0;

  ELSE

    IF NOT "Run" THEN

      "Ramp Functiongen"."Mem Out" := 0.0;

    ELSE

      IF "Ramp Functiongen"."Mem Out" < "Ramp Functiongen"."Input RampGen" THEN // ACC Ramp

        "Ramp Functiongen"."Mem Out" := "Ramp Functiongen"."Mem Out" + 0.01;

        IF "Ramp Functiongen"."Input RampGen" < "Ramp Functiongen"."Mem Out" THEN

          "Ramp Functiongen"."Mem Out" := "Ramp Functiongen"."Input RampGen";

        END_IF;

      END_IF;

    END_IF;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ELSE

    IF "Ramp Functiongen"."Mem Out" > "Ramp Functiongen"."Input RampGen" THEN // DEC Ramp

        "Ramp Functiongen"."Mem Out" := "Ramp Functiongen"."Mem Out" - 0.01;

    ELSE

        "Ramp Functiongen"."Mem Out" := "Ramp Functiongen"."Input RampGen";

    END_IF;

END_IF;

END_IF;

END_IF;

END_IF;

"Ramp Functiongen"."Output RampGen" := "Ramp Functiongen"."Mem Out";

END_IF;

IF "buck" = TRUE AND "boost" = FALSE THEN

    IF "PID_Current_Loop1".Setpoint <= 0 THEN

        "PID_Current_Loop1".Reset := 1;

    ELSE

        "PID_Current_Loop1".Reset := 0;

    END_IF;

    "PID_Current_Loop"(Setpoint := "OFF",

        Input_PER := "OFF");//"Current act":P,

        Output_PER => "farfaraway");//"MW500"); //

    "PID_Current_Loop1"(Setpoint := "Data_PID"."PID Current Setpoint1",

        Input_PER := "Current CT":P;//"Current act":P,

        Output_PER => "PWM_Out1_Buck":P);//"MW500"); //

// Ramp Functiongen1

IF ("Ramp Functiongen"."Input RampGen1" < 0.0) THEN

    "Ramp Functiongen"."Mem Out1" := 0.0;

ELSE

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

IF NOT "Run" THEN

    "Ramp Functiongen"."Mem Out1" := 0.0;

ELSE

    IF "Ramp Functiongen"."Mem Out1" < "Ramp Functiongen"."Input RampGen1" THEN           // ACC Ramp

        "Ramp Functiongen"."Mem Out1" := "Ramp Functiongen"."Mem Out1" + 0.01;

        IF "Ramp Functiongen"."Input RampGen1" < "Ramp Functiongen"."Mem Out1" THEN

            "Ramp Functiongen"."Mem Out1" := "Ramp Functiongen"."Input RampGen1";

        END_IF;

    ELSE

        IF "Ramp Functiongen"."Mem Out1" > "Ramp Functiongen"."Input RampGen1" THEN           // DEC Ramp

            "Ramp Functiongen"."Mem Out1" := "Ramp Functiongen"."Mem Out1" - 0.01;

        ELSE

            "Ramp Functiongen"."Mem Out1" := "Ramp Functiongen"."Input RampGen1";

        END_IF;

    END_IF;

END_IF;

END_IF;

"Ramp Functiongen"."Output Rampgen1" := "Ramp Functiongen"."Mem Out1";

END_IF;

IF "boost" = FALSE THEN

    "PID_Current_Loop" (Setpoint := "OFF",

        Input_PER := "OFF",

        Output_PER => "farfaraway");

    END_IF;

 Cyclic Meter

// Calculator Samping time 100mS

IF "Data_Meter".Reset THEN

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

"Data_Meter"."Power Sum" := 0.0;

"Data_Meter"."Column Reference" := 1000.0;

"Data_Meter"."Current Sum" := 0.0;

"Data_Meter".Charge := 0;

"Data_Meter".Discharge := 0;

"Data_Meter".Reset := 0;

END_IF;

//"Data_Meter".Voltage := NORM_X(MIN:=0.0, VALUE:="Voltage act", MAX:=290); //515.5

//"Data_Meter".Current := NORM_X(MIN:=0.0, VALUE:="Current act", MAX:=1675.0); //1652.0

//"Data_Meter".Current := NORM_X(MIN := 0.0, VALUE := "Current CT", MAX := 12559.0); //20A//1652.0

IF "Data_Meter".Current > 22.0 THEN

    "Data_Meter".Current := 0;

END_IF;

IF "Data_Meter".Charge THEN

    "Data_Meter"."Current Sum" := "Data_Meter"."Current Sum"+"Data_Meter".Current;

END_IF;

IF "Data_Meter".Discharge THEN

    "Data_Meter"."Current Sum" := "Data_Meter"."Current Sum"-"Data_Meter".Current;

END_IF;

IF "Data_Meter"."Current Sum" <= 0.0 THEN

    "Data_Meter"."Current Sum" := 0.0;

END_IF;

"Data_Meter".Column := "Data_Meter"."Current Sum" / 10;

IF "Data_Meter".SOC >= 100.0 THEN

    "Data_Meter".SOC := 100.0;

END_IF;

"Data_Meter".Power:= "Data_Meter".Current * "Data_Meter".Voltage;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

IF "Data_Meter".Charge THEN

    "Data_Meter"."Power Sum":= "Data_Meter"."Power Sum" + "Data_Meter".Power;

END_IF;

IF "Data_Meter".Discharge THEN

    "Data_Meter"."Power Sum":= "Data_Meter"."Power Sum" - "Data_Meter".Power;

END_IF;

IF "Data_Meter"."Power Sum" <= 0.0 THEN

    "Data_Meter"."Power Sum":= 0.0;

END_IF;

"Data_Meter".Energy:= "Data_Meter"."Power Sum" / 36000.0;

IF  "Data_Meter"."V max" < "Data_Meter".Voltage THEN

    "Data_Meter"."Column Reference" := "Data_Meter".Column;

    "Data_Meter".SOC := 100.0;

ELSE IF "Data_Meter"."V min" > "Data_Meter".Voltage THEN

    "Data_Meter"."Current Sum" := 0.0;

    "Data_Meter".SOC := 0.0;

ELSE

    "Data_Meter".SOC := "Data_Meter".Column / "Data_Meter"."Column Reference" * 100;

END_IF;

END_IF;

END_IF;

 Startup

"PID_Current_Loop".Reset := 1;

"PID_Current_Loop".ErrorAck:= 1;

"PID_Voltage_Loop".Reset:=1;

"PID_Voltage_Loop".ErrorAck:=1;

"PID_Current_Loop1".Reset := 1;

"PID_Current_Loop1".ErrorAck := 1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

"PID_Buck_Voltage_Loop1".Reset := 1;

"PID_Buck_Voltage_Loop1".ErrorAck := 1;

IF "PID_Current_Loop".Reset=true THEN

    "PID_Current_Loop".Reset:=0;

END_IF;

IF "PID_Current_Loop".ErrorAck=true THEN

    "PID_Current_Loop".ErrorAck:=0;

END_IF;

IF"PID_Voltage_Loop".Reset=true THEN

    "PID_Voltage_Loop".Reset := 0;

END_IF;

IF "PID_Voltage_Loop".ErrorAck=true THEN

    "PID_Voltage_Loop".ErrorAck:=0;

END_IF;

IF "PID_Buck_Voltage_Loop1".Reset = true THEN

    "PID_Buck_Voltage_Loop1".Reset := 0;

END_IF;

IF "PID_Buck_Voltage_Loop1".ErrorAck = true THEN

    "PID_Buck_Voltage_Loop1".ErrorAck := 0;

END_IF;

"Ramp Functiongen"."Max Ramp" := "PID_Voltage_Loop".Config.InputScaling.UpperPointOut;

"Ramp Functiongen"."Max Ramp" := "PID_Voltage_Loop".Config.InputScaling.UpperPointOut;

"Ramp Functiongen"."Max Ramp" := "PID_Buck_Voltage_Loop1".Config.InputScaling.UpperPointOut;

"Ramp Functiongen"."Max Ramp" := "PID_Buck_Voltage_Loop1".Config.InputScaling.UpperPointOut;

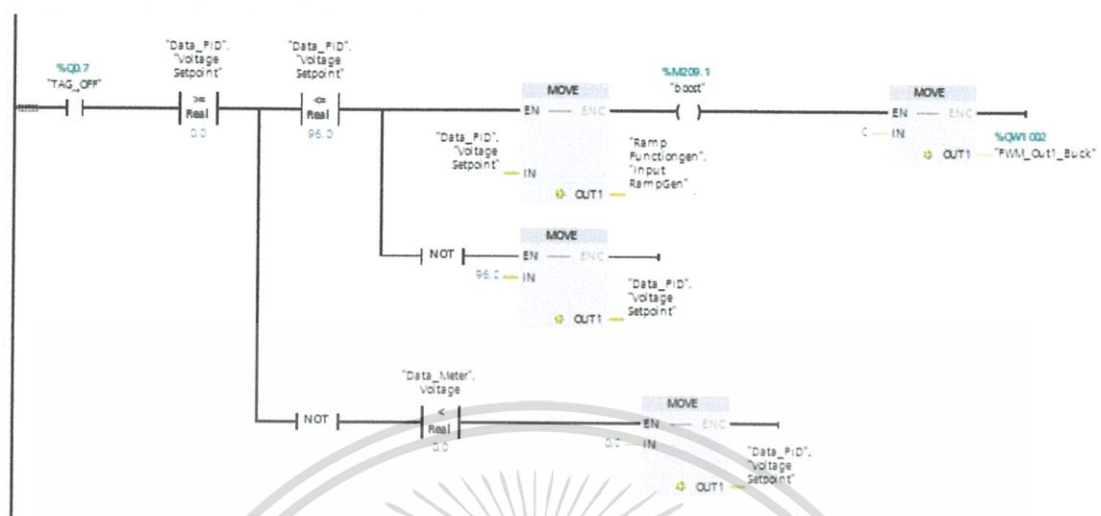
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Main

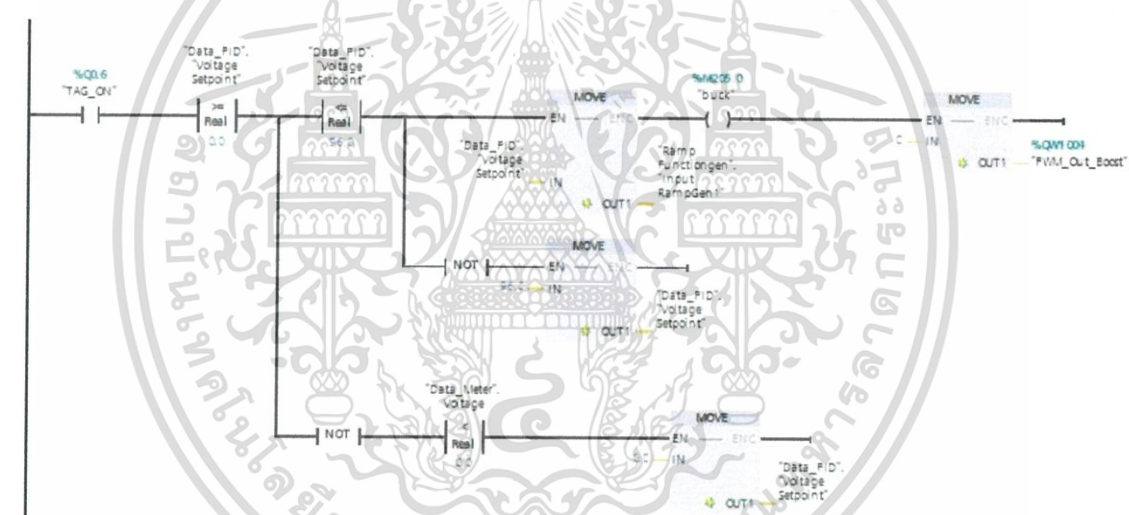
Network 1: Voltage Setpoint Boost

Comment



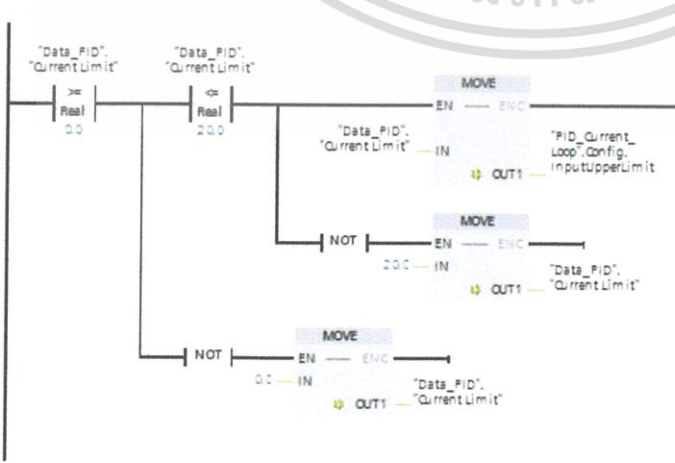
Network 2: Voltage Setpoint2 Buck

Comment



Network 3: Current Limit

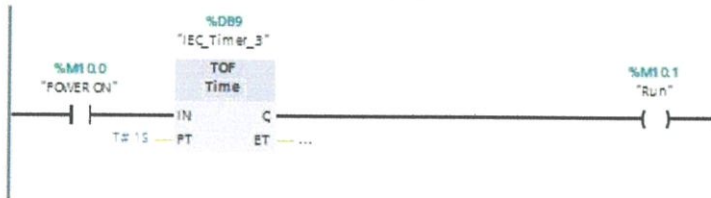
Comment



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

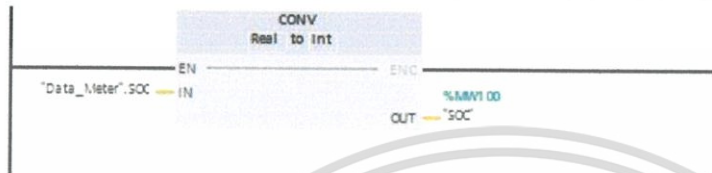
Network 4:

Comment



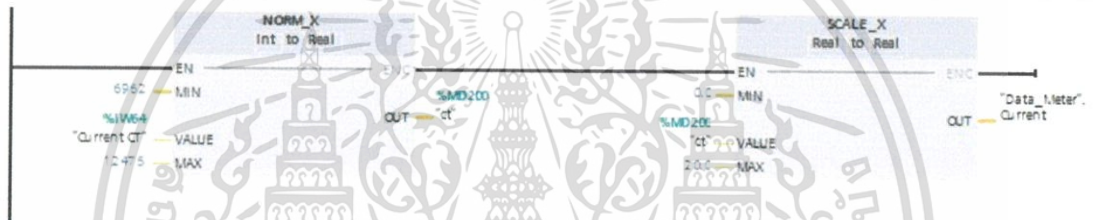
Network 5: bar SOC

Comment



Network 6: Scale I

Comment



Network 7: Scale V

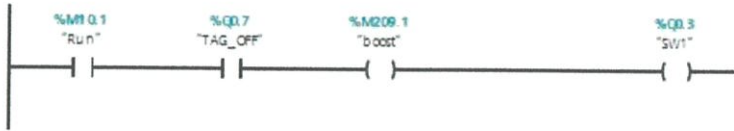
Comment



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

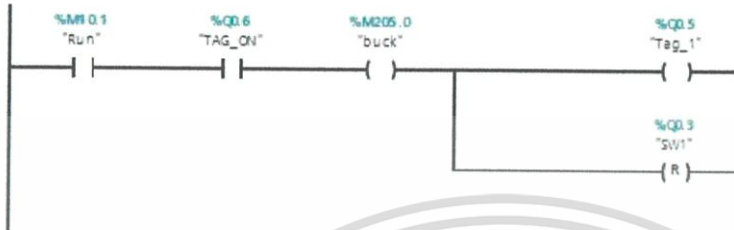
▼ Network 8: boost

Comment



▼ Network 9: buck

Comment

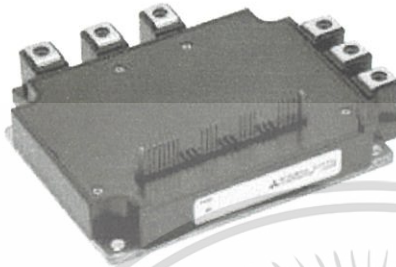


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

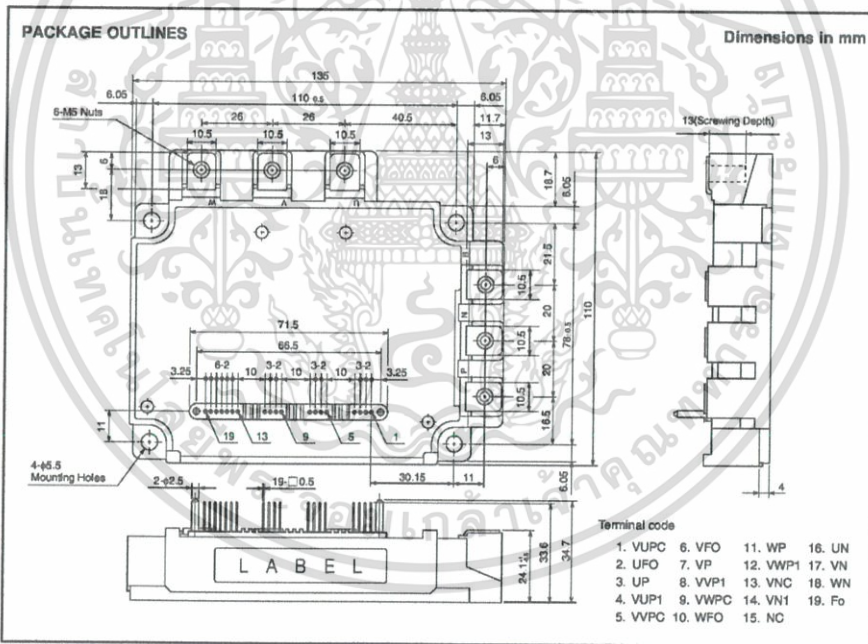
MITSUBISHI <INTELLIGENT POWER MODULES>

PM100CLA120FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE**PM100CLA120****FEATURE**

- a) Adopting new 5th generation IGBT (CSTBT) chip, which performance is improved by 1 μ m fine rule process.
For example, typical $V_{ce(sat)}$ =1.9V @ T_J =125°C
- b) I adopt the over-temperature conservation by T_J detection of CSTBT chip, and error output is possible from all each conservation upper and lower arm of IPM.
- 3 ϕ 100A, 1200V Current-sense IGBT type inverter
- Monolithic gate drive & protection logic
- Detection, protection & status indication circuits for, short-circuit, over-temperature & under-voltage (P-Fo available from upper arm devices)
- Acoustic noise-less 18.5kW/22kW class inverter application
- UL Recognized Yellow Card No.E80276(N)
File No.E80271

APPLICATION

General purpose inverter, servo drives and other motor controls

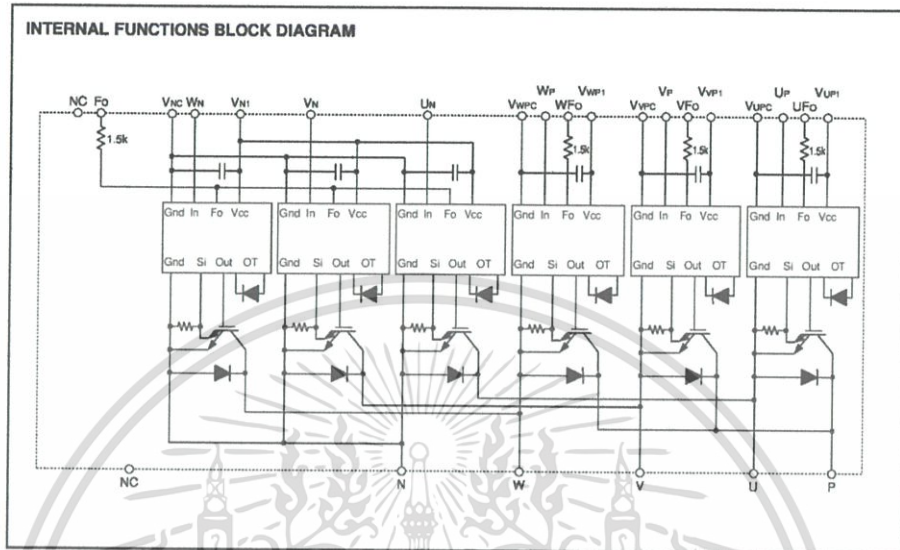


May 2005



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MITSUBISHI <INTELLIGENT POWER MODULES>

PM100CLA120**FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE****MAXIMUM RATINGS** ($T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)**INVERTER PART**

Symbol	Parameter	Condition	Rating	Unit
V_{CES}	Collector-Emitter Voltage	$V_D = 15\text{V}$, $V_{CIN} = 15\text{V}$	1200	V
$\pm I_C$	Collector Current	$T_C = 25^\circ\text{C}$	100	A
$\pm I_{CP}$	Collector Current (Peak)	$T_C = 25^\circ\text{C}$	200	A
P_C	Collector Dissipation	$T_C = 25^\circ\text{C}$ (Note-1)	781	W
T_J	Junction Temperature		-20 ~ +150	$^\circ\text{C}$

CONTROL PART

Symbol	Parameter	Condition	Rating	Unit
V_D	Supply Voltage	Applied between: $V_{UP1}-V_{UPC}$ $V_{VP1}-V_{VPC}$, $V_{WP1}-V_{WPC}$, $V_{N1}-V_{NC}$	20	V
V_{CIN}	Input Voltage	Applied between: U_P-V_{UPC} , V_P-V_{VPC} W_P-V_{WPC} , U_N-V_N , V_N-V_{NC}	20	V
V_{FO}	Fault Output Supply Voltage	Applied between: $U_{FO}-V_{UPC}$, $V_{FO}-V_{VPC}$, $W_{FO}-V_{WPC}$ F_O-V_{NC}	20	V
I_{FO}	Fault Output Current	Sink current at U_{FO} , V_{FO} , W_{FO} , F_O terminals	20	mA

May 2005



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MITSUBISHI <INTELLIGENT POWER MODULES>

PM100CLA120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

TOTAL SYSTEM

Symbol	Parameter	Condition	Rated	Unit
V _{CC(PROT)}	Supply Voltage Protected by SC	V _D = 13.5 ~ 16.5V, Inverter Part, T _j = +125°C Start	800	V
V _{CC(surge)}	Supply Voltage (Surge)	Applied between : P-N, Surge value	1000	V
T _{stg}	Storage Temperature		-40 ~ +125	°C
V _{iso}	Isolation Voltage	60Hz, Sinusoidal, Charged part to Base, AC 1 min.	2500	V _{rms}

THERMAL RESISTANCES

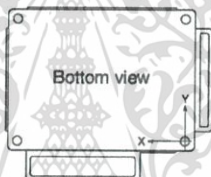
Symbol	Parameter	Condition	Limits			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
R _{th(j-c)Q}	Junction to case Thermal Resistances	Inverter IGBT (per 1 element) (Note-1)	—	—	0.16*	°C/W
R _{th(j-f)}	Contact Thermal Resistance	Inverter FWDI (per 1 element) (Note-1)	—	—	0.26*	
R _{th(c-f)}	Case to fin, (per 1 module)	Thermal grease applied (Note-1)	—	—	0.023	

* If you use this value, R_{th(f-a)} should be measured just under the chips.

(Note-1) T_c (under the chip) measurement point is below.

(Unit : mm)

axis	UP		VP		WP		UN		VN		WN	
	IGBT	FWDI	IGBT	FWDI	IGBT	FWDI	IGBT	FWDI	IGBT	FWDI	IGBT	FWDI
X	23.7	23.0	57.2	56.5	87.7	86.5	37.7	38.0	70.2	71.5	100.7	101.5
Y	56.7	43.4	56.7	43.4	56.7	43.4	28.7	42.0	28.7	42.0	28.7	42.0

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_j = 25°C, unless otherwise noted)

INVERTER PART

Symbol	Parameter	Condition	Limits			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
V _{CE(sat)}	Collector-Emitter Saturation Voltage	V _D = 15V, I _C = 100A V _{CIN} = 0V (Fig. 1)	—	1.8	2.3	V
V _{CE}	FWDI Forward Voltage	-I _C = 100A, V _D = 15V, V _{CIN} = 15V (Fig. 2)	—	2.5	3.5	
t _{on}	Switching Time	V _D = 15V, V _{CIN} = 0V↔15V V _{CC} = 600V, I _C = 100A T _j = 125°C	0.5	1.0	2.5	μs
t _r			—	0.5	0.8	
t _{c(on)}			—	0.4	1.0	
t _{off}			—	2.0	3.0	
t _{c(off)}		Inductive Load (Fig. 3, 4)	—	0.7	1.2	
I _{CES}	Collector-Emitter Cutoff Current	V _{CE} = V _{CE} , V _{CIN} = 15V (Fig. 5)	—	—	1	mA
			—	—	10	

May 2005



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PM100CLA120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

CONTROL PART

Symbol	Parameter	Condition	Limits			Unit	
			Min.	Typ.	Max.		
I _D	Circuit Current	V _D = 15V, V _{CIN} = 15V	V _{N1} -V _{NC}	—	18	28	mA
			V*P1-V*PC	—	6	12	
V _{th(ON)}	Input ON Threshold Voltage	Applied between : U _P -V _{UPC} , V _P -V _{VPC} , W _P -V _{WPC}	1.2	1.5	1.8	V	
V _{th(OFF)}	Input OFF Threshold Voltage	U _N • V _N • W _N -V _{NC}	1.7	2.0	2.3		
SC	Short Circuit Trip Level	-20 ≤ T _J ≤ 125°C, V _D = 15V (Fig. 3.6)	200	—	—	A	
t _{off(SC)}	Short Circuit Current Delay Time	V _D = 15V (Fig. 3.6)	—	0.2	—	μs	
OT	Over Temperature Protection	V _D = 15V	Trip level	135	145	°C	
OT _r	Defect T _J of IGBT chip		Reset level	—	125		
UV	Supply Circuit Under-Voltage Protection	-20 ≤ T _J ≤ 125°C	Trip level	11.5	12.0	12.5	V
UV _r			Reset level	—	12.5	—	
I _{FO(H)}	Fault Output Current	V _D = 15V, V _{F0} = 15V (Note-2)	—	—	0.01	mA	
I _{FO(L)}			—	10	15		
t _{FO}	Minimum Fault Output Pulse Width	V _D = 15V (Note-2)	1.0	1.8	—	ms	

(Note-2) Fault output is given only when the internal SC, OT & UV protections schemes of either upper or lower arm device operate to protect it.

MECHANICAL RATINGS AND CHARACTERISTICS

Symbol	Parameter	Condition	Limits			Unit	
			Min.	Typ.	Max.		
—	Mounting torque	Main terminal	screw : M5	2.5	3.0	3.5	N • m
—	Mounting torque	Mounting part	screw : M5	2.5	3.0	3.5	N • m
—	Weight	—	—	800	—	—	g

RECOMMENDED CONDITIONS FOR USE

Symbol	Parameter	Condition	Recommended value	Unit
V _{CC}	Supply Voltage	Applied across P-N terminals	≤ 800	V
V _D	Control Supply Voltage	Applied between : V _{UP1} -V _{UPC} , V _{VP1} -V _{VPC} V _{WP1} -V _{WPC} , V _{N1} -V _{NC} (Note-3)	15 ± 1.5	V
V _{CIN(ON)}	Input ON Voltage	Applied between : U _P -V _{UPC} , V _P -V _{VPC} , W _P -V _{WPC}	≤ 0.8	V
V _{CIN(OFF)}	Input OFF Voltage	U _N • V _N • W _N -V _{NC}	≥ 9.0	
f _{PWM}	PWM Input Frequency	Using Application Circuit of Fig. 8	≤ 20	kHz
t _{dead}	Arm Shoot-through Blocking Time	For IPM's each input signals (Fig. 7)	≥ 2.5	μs

(Note-3) With ripple satisfying the following conditions: dv/dt swing ≤ ±15V/μs, Variation ≤ 2V peak to peak

PM100CLA120

**FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE**

PRECAUTIONS FOR TESTING

1. Before applying any control supply voltage (V_d), the input terminals should be pulled up by resistors, etc. to their corresponding supply voltage and each input signal should be kept off state.
After this, the specified ON and OFF level setting for each input signal should be done.
2. When performing "SC" tests, the turn-off surge voltage spike at the corresponding protection operation should not be allowed to rise above V_{CES} rating of the device.
(These test should not be done by using a curve tracer or its equivalent.)

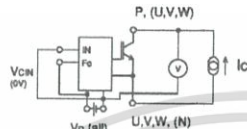


Fig. 1 $V_{ce(sat)}$ Test

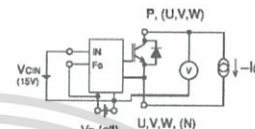


Fig. 2 V_{ce} Test

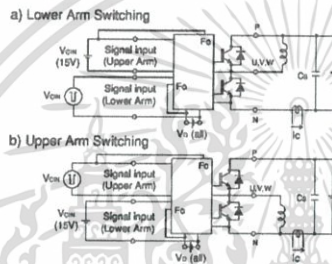


Fig. 3 Switching time and SC test circuit

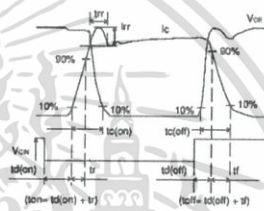


Fig. 4 Switching time test waveform

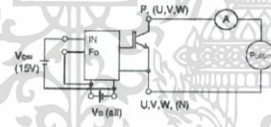


Fig. 5 I_{ces} Test

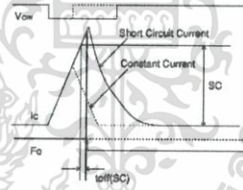


Fig. 6 SC test waveform

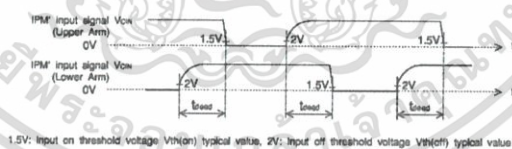


Fig. 7 Dead time measurement point example



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PM100CLA120

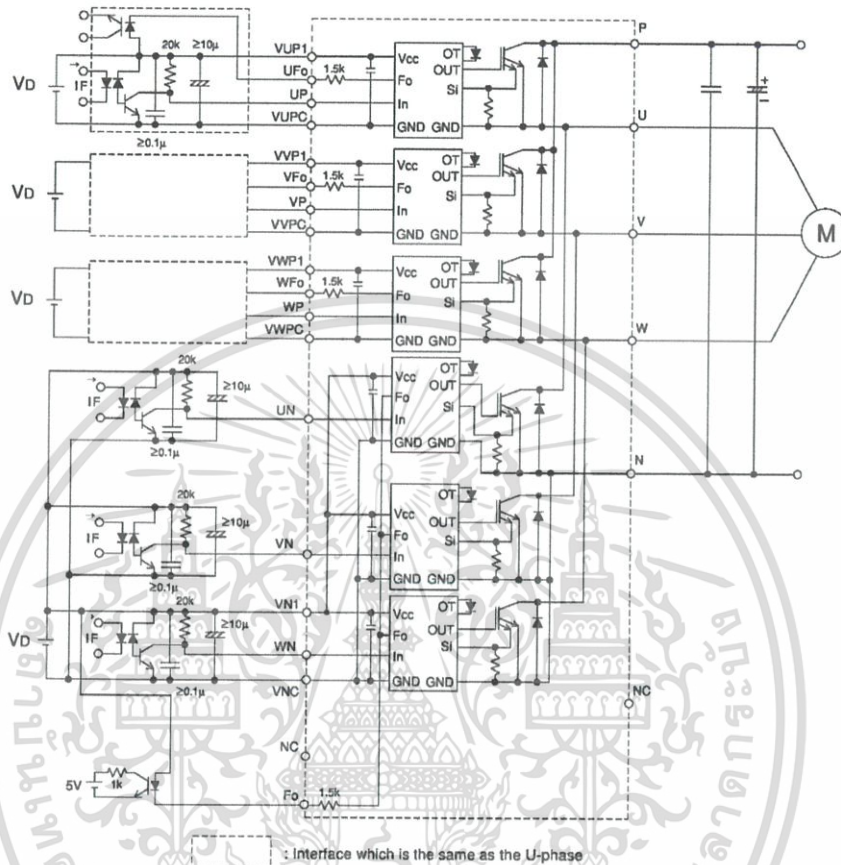
FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

Fig. 8 Application Example Circuit

NOTES FOR STABLE AND SAFE OPERATION :

- Design the PCB pattern to minimize wiring length between opto-coupler and IPM's input terminal, and also to minimize the stray capacity between the input and output wirings of opto-coupler.
- Connect low impedance capacitor between the Vcc and GND terminal of each fast switching opto-coupler.
- Fast switching opto-couplers: $t_{PLH}, t_{PHL} \leq 0.8\mu s$, Use High CMR type.
- Slow switching opto-coupler: $CTR > 100\%$
- Use 4 isolated control power supplies (Vd). Also, care should be taken to minimize the instantaneous voltage charge of the power supply.
- Make inductance of DC bus line as small as possible, and minimize surge voltage using snubber capacitor between P and N terminal.
- Use line noise filter capacitor (ex. 4.7nF) between each input AC line and ground to reject common-mode noise from AC line and improve noise immunity of the system.

May 2005

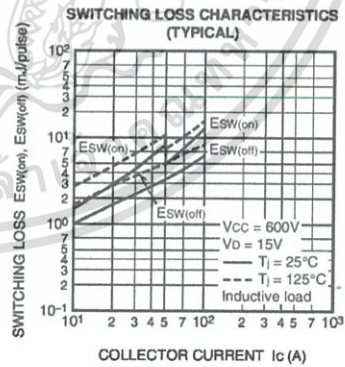
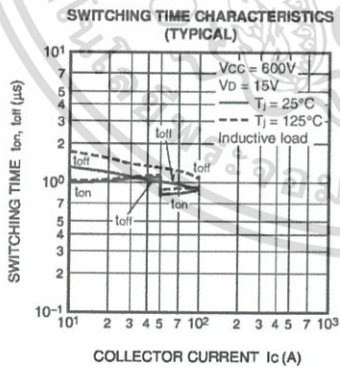
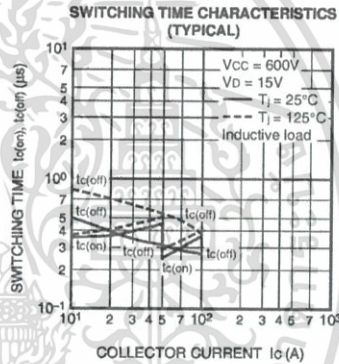
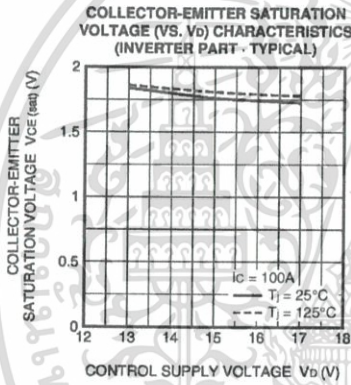
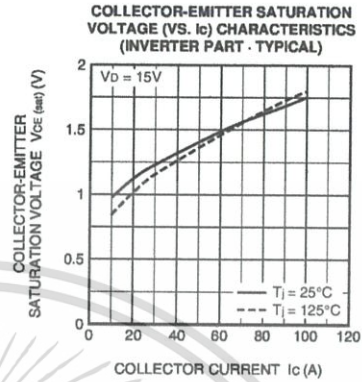
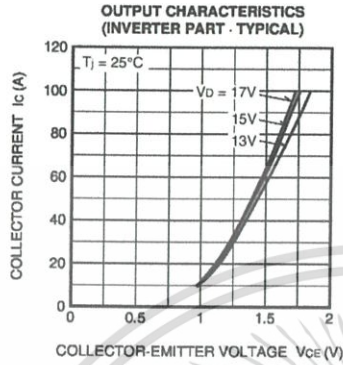


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PM100CLA120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

PERFORMANCE CURVES



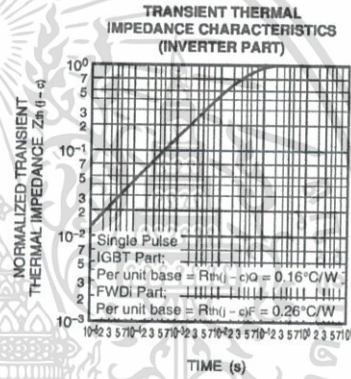
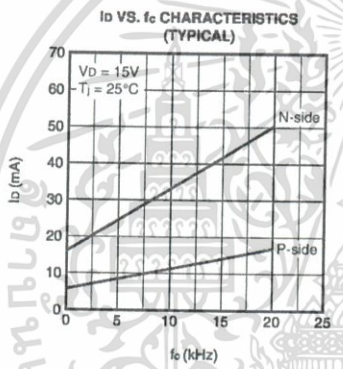
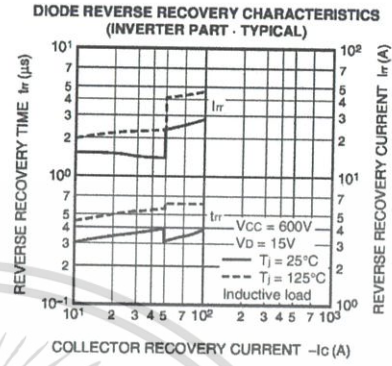
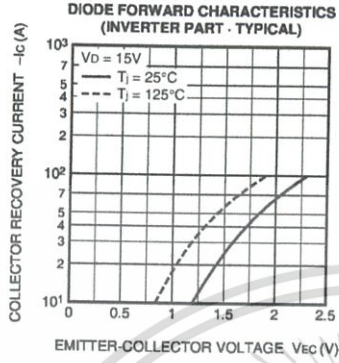
May 2005



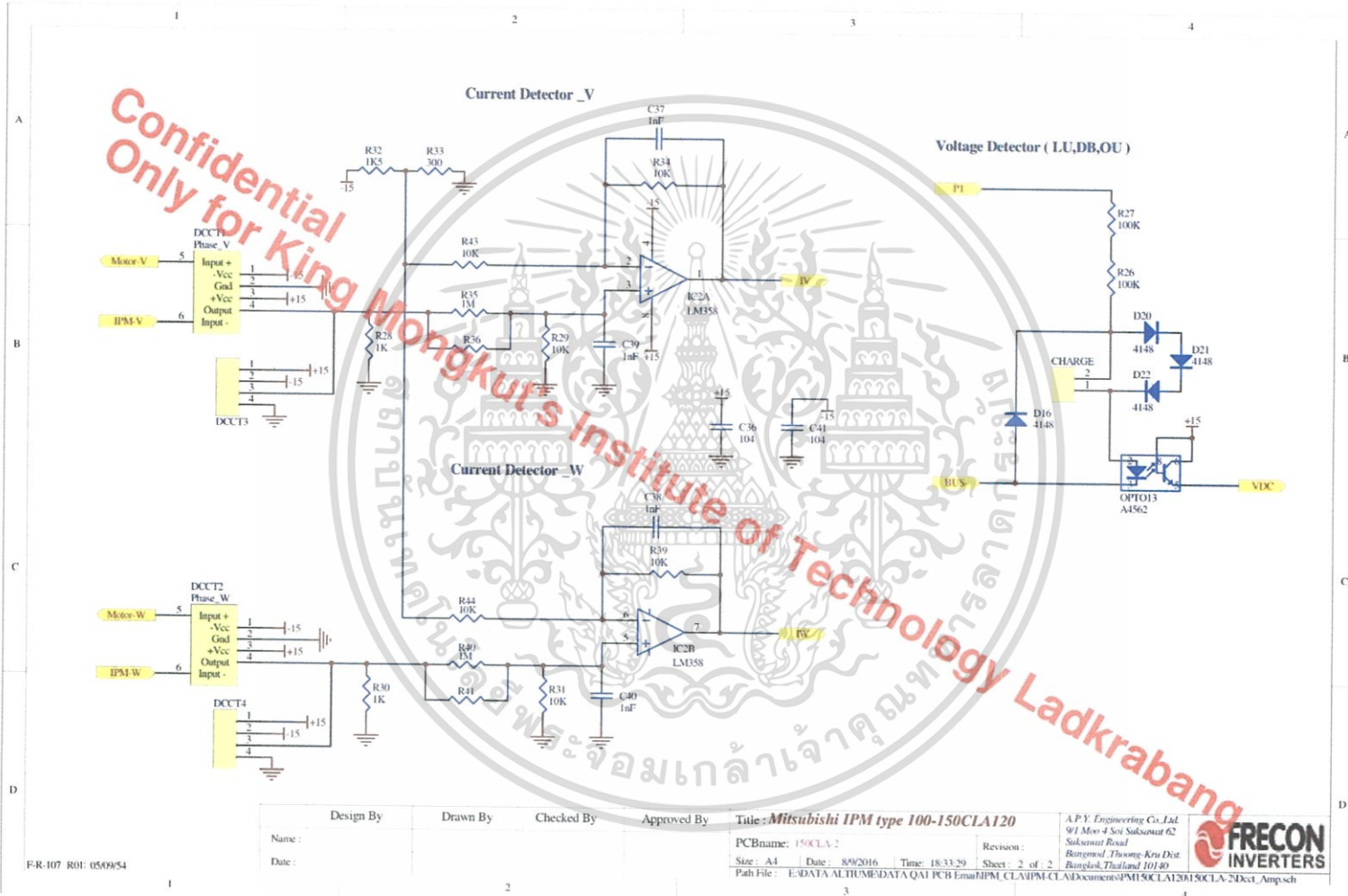
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PM100CLA120

**FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



F-R-107 R01: 05/09/54

Design By	Drawn By	Checked By	Approved By	Title: Mitsubishi IPM type 100-150CLA120	A.P.Y. Engineering Co., Ltd. 9/1 Moo-4 Soi Suksonat 62 Suksonat Road Bangsonol, Thong Kru Dist. Bangkok, Thailand 10140
Name :				PCBName: 150CLA.2	
Date :				Size: A4 Date: 8/9/2016 Time: 18:33:29 Sheet: 2 of 2 Path File: E:\DATA ALTHUM\DATA Q\1 PCB Ema\IPM_CLA\IPM_CLA\Documents\PMI\SOCLA120\SOCLA-2D\cct_Amp.sch	
				Revision :	



High CMR, High Speed Optocouplers

Technical Data

HCPL-4504
HCPL-J454
HCPL-0454
HCNW4504

Features

- **Short Propagation Delays for TTL and IPM Applications**
- **15 kV/ μ s Minimum Common Mode Transient Immunity at $V_{CM} = 1500$ V for TTL/Load Drive**
- **High CTR at $T_A = 25^\circ\text{C}$**
>25% for HCPL-4504/0454
>23% for HCNW4504
>19% for HCPL-J454
- **Electrical Specifications for Common IPM Applications**
- **TTL Compatible**
- **Guaranteed Performance from 0°C to 70°C**
- **Open Collector Output**
- **Safety Approval UL Recognized**
- 3750 V rms / 1min. for HCPL-4504/0454/J454
- 5000 V rms / 1min. for HCPL-4504 Option020 and HCNW4504

CSA Approved
IEC/EN/DIN EN 60747-5-2
Approved

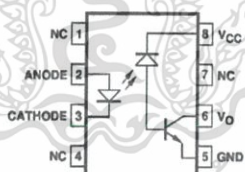
- $V_{IORM} = 560$ Vpeak for HCPL-0454 Option060
- $V_{IORM} = 630$ Vpeak for HCPL-4504 Option060

- $V_{IORM} = 891$ Vpeak for HCPL-J454
- $V_{IORM} = 1414$ Vpeak for HCNW4504

Applications

- **Inverter Circuits and Intelligent Power Module (IPM) Interfacing** - High Common Mode Transient Immunity (> 10 kV/ μ s for an IPM load/drive) and ($t_{PLH} - t_{PHL}$) Specified (See Power Inverter Dead Time section)
- **Line Receivers** - Short Propagation Delays and Low Input-Output Capacitance
- **High Speed Logic Ground Isolation** - TTL/TTL, TTL/CMOS, TTL/LSTTL

Functional Diagram



A 0.1 μ F bypass capacitor between pins 5 and 8 is recommended.

- **Replaces Pulse Transformers** - Save Board Space and Weight
- **Analog Signal Ground Isolation** - Integrated Photodetector Provides Improved Linearity over Phototransistors

Description

The HCPL-4504 and HCPL-0454 contain a GaAsP LED while the HCPL-J454 and HCNW4504 contain an AlGaAs LED. The LED is optically coupled to an integrated high gain photo detector.

The HCPL-4504 series has short propagation delays and high CTR. The HCPL-4504 series also has a guaranteed propagation delay difference ($t_{PLH} - t_{PHL}$). These

TRUTH TABLE	
LED	V_O
ON	LOW
OFF	HIGH

CAUTION: It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of this component to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

features make the HCPL-4504 series an excellent solution to IPM inverter dead time and other switching problems. The CTR, propagation delay, and CMR are specified both for TTL and IPM conditions which are provided for ease of application. These single channel, diode-transistor optocouplers are available in 8-Pin DIP, SO-8, and Widebody

package configurations. An insulating layer between a LED and an integrated photodetector provide electrical insulation between input and output. Separate connections for the photodiode bias and output-transistor collector increase the speed up to a hundred times that of a conventional phototransistor coupler by reducing the base collector capacitance.

Selection Guide

Package Type	Standard 8-Pin DIP (300 Mil)	White Mold 9-Pin DIP (300 Mil)	Small Outline SO8	Widebody (400 Mil)
Part Number	HCPL-4504	HCPL-J454	HCPL-0454	HCNW4504
IEC/EN/DIN EN 60747-5-2 Approval	$V_{IORM} = 630 V_{peak}$ (Option 060)	$V_{IORM} = 891 V_{peak}$	$V_{IORM} = 560 V_{peak}$ (Option 060)	$V_{IORM} = 1414 V_{peak}$

Ordering Information

Specify Part number followed by Option Number (if desired)

Example

HCPL-4504 #XXXX

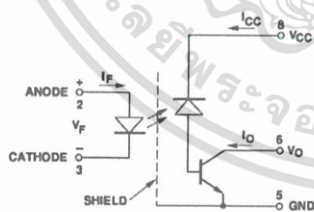
- 020 = UL 5000 Vrms/1minute Option* for HCPL-4504 Only.
- 060 = IEC/EN/DIN EN 60747-5-2 Option* for HCPL-4504/0454.
- 300 = Gull-Wing Lead Option for HCPL-4504/J454, HCNW4504.
- 500 = Tape and Reel Packaging Option.
- XXXE = Lead Free Option

Option data sheets available. Contact Agilent sales representative or authorized distributor for information.

*Combination of Option 020 and Option 060 is not available.

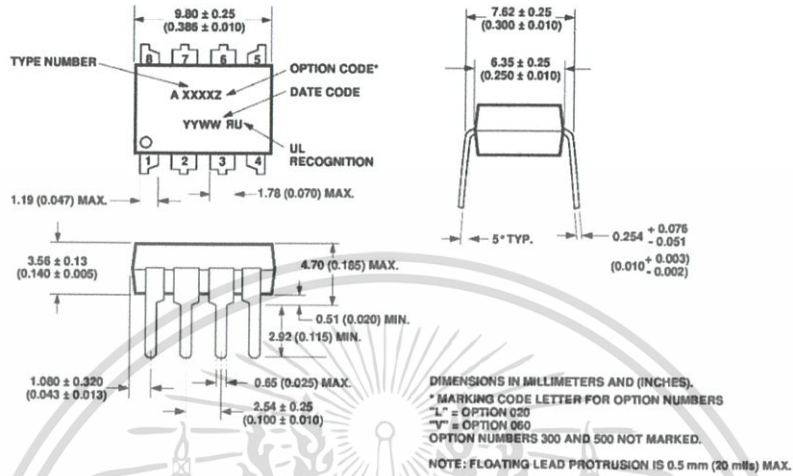
Remarks: The notation “#” is used for existing products, while (new) products launched since 15th July 2001 and lead free option will use “.”

Schematic

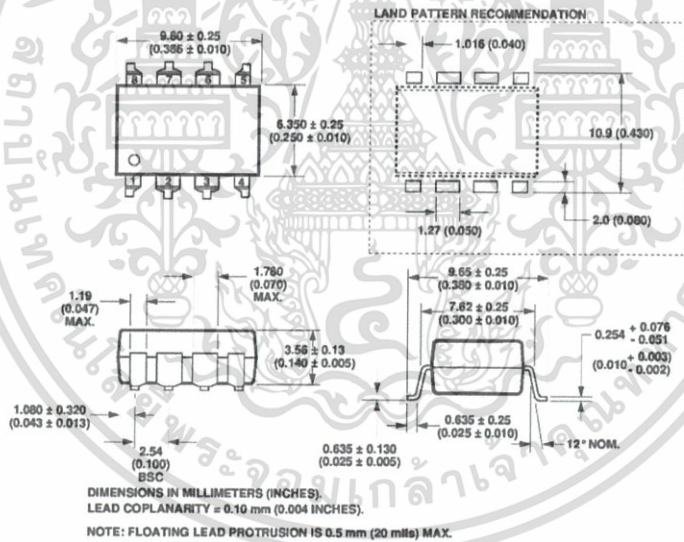


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Package Outline Drawings
HCPL-J454 Outline Drawing

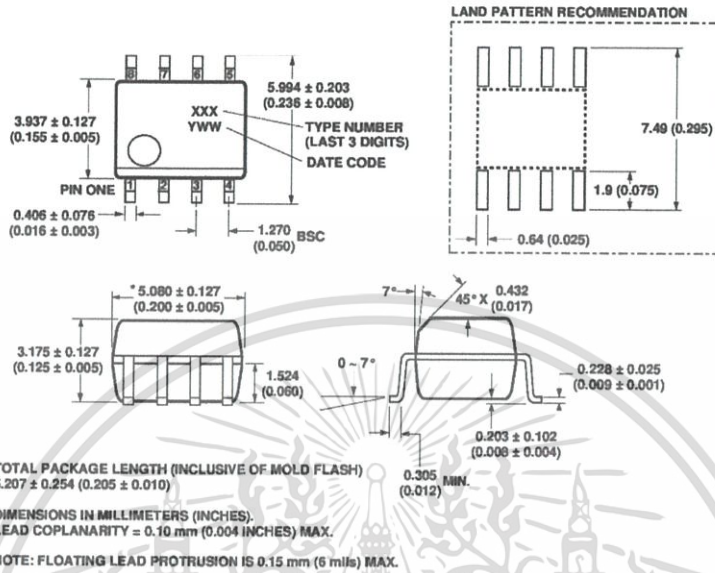


HCPL-J454 Gull Wing Surface Mount Option 300 Outline Drawing

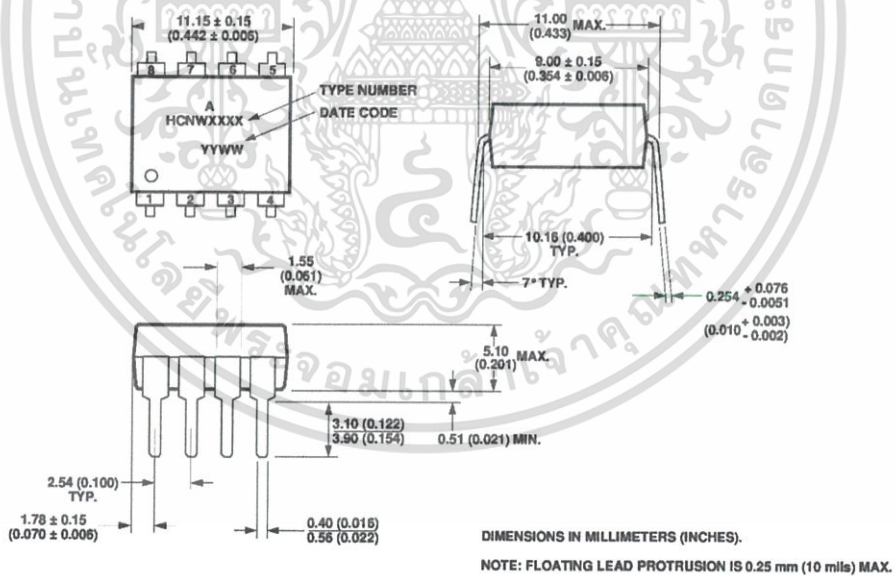


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HCPL-0454 Outline Drawing (8-Pin Small Outline Package)

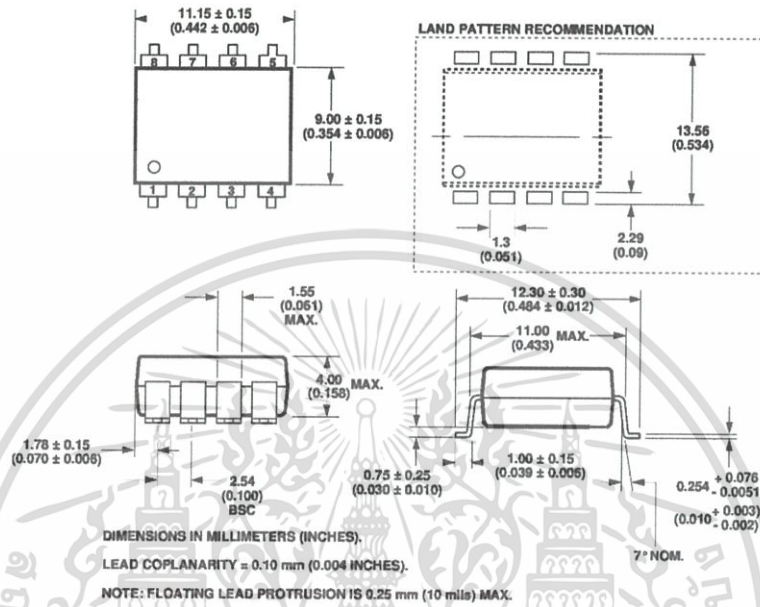


HCNW4504 Outline Drawing (8-Pin Widebody Package)



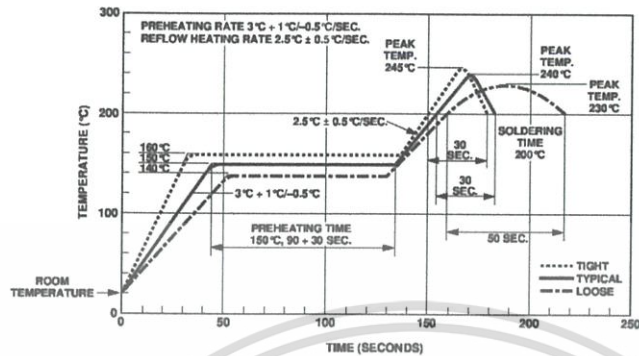
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HCNW4504 Gull Wing Surface Mount Option 300 Outline Drawing

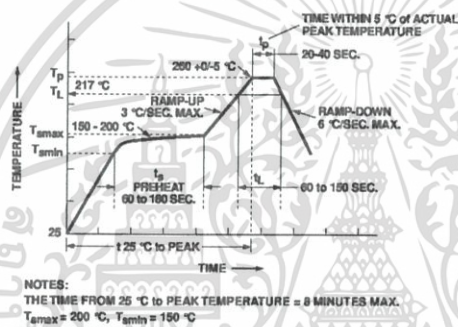


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Solder Reflow Temperature Profile



Recommended Pb-Free IR Profile



Regulatory Information

The devices contained in this data sheet have been approved by the following agencies:

Agency/Standard	HCPL-4504	HCPL-J454	HCPL-0456	HCNW4504
Underwriters Laboratories (UL) Recognized under UL1577, Component Recognition Program, Category FPQU2, File E55361	✓	✓	✓	✓
Canadian Standards Association (CSA) File CA88324	✓	✓	✓	✓
IEC/EN/DIN EN 60747-5-2 Approved under: IEC 60747-5-2:1997 + A1:2002 EN 60747-5-2:2001 + A1:2002 DIN EN 60747-5-2 (VDE 0884 Teil 2):2003-01	✓	✓		✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Insulation and Safety Related Specifications

Parameter	Symbol	Value				Units	Conditions
		HCPL-4504	HCPL-J454	HCPL-0454	HCNW4504		
Minimum External Air Gap (External Clearance)	L(101)	7.1	7.4	4.9	9.6	mm	Measured from input terminals to output terminals, shortest distance through air.
Minimum External Tracking (External Creepage)	L(102)	7.4	8.0	4.8	10.0	mm	Measured from input terminals to output terminals, shortest distance path along body.
Minimum Internal Plastic Gap (Internal Clearance)		0.08	0.5	0.08	1.0	mm	Through insulation distance, conductor to conductor, usually the direct distance between the photoemitter and photodetector inside the optocoupler cavity.
Minimum Internal Tracking (Internal Creepage)		NA	NA	NA	4.0	mm	Measured from input terminals to output terminals, along internal cavity.
Tracking Resistance (Comparative Tracking Index)	CTI	≥ 175	≥ 175	≥ 175	≥ 200	Volts	DIN IEC 112/VDE 0303 Part 1
Isolation Group		IIIa	IIIa	IIIa	IIIa		Material Group (DIN VDE 0110, 1/89, Table 1)

All Agilent data sheets report the creepage and clearance inherent to the optocoupler component itself. These dimensions are needed as a starting point for the equipment designer when determining the circuit insulation requirements.

However, once mounted on a printed circuit board, minimum

creepage and clearance requirements must be met as specified for individual equipment standards. For creepage, the shortest distance path along the surface of a printed circuit board between the solder fillets of the input and output leads must be considered. There are recommended techniques such as grooves and

ribs which may be used on a printed circuit board to achieve desired creepage and clearances. Creepage and clearance distances will also change depending on factors such as pollution degree and insulation level.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEC/EN/DIN EN 60747-5-2 Insulation Related Characteristics

Description	Symbol	HCPL-0454 OPTION 060	HCPL-4504 OPTION 060	HCPL-J454	HCNW4504	Unit
Installation classification per DIN VDE 0110/1.89, Table 1 for rated mains voltage ≤ 150 V rms for rated mains voltage ≤ 300 V rms for rated mains voltage ≤ 450 V rms for rated mains voltage ≤ 600 V rms for rated mains voltage ≤ 1000 V rms		I-IV I-III	I-IV I-IV I-III	I-IV I-IV I-III I-III	I-IV I-IV I-IV I-IV I-III	
Climatic Classification		55/100/21	55/100/21	55/100/21	55/85/21	
Pollution Degree (DIN VDE 0110/1.89)		2	2	2	2	
Maximum Working Insulation Voltage	V_{IORM}	560	630	891	1414	V peak
Input to Output Test Voltage, Method b* $V_{IORM} \times 1.875 = V_{PR}$, 100% Production Test with $t_m = 1$ sec, Partial Discharge < 5 pC	V_{PR}	1050	1181	1670	2652	V peak
Input to Output Test Voltage, Method a* $V_{IORM} \times 1.5 = V_{PR}$, Type and Sample Test, $t_m = 60$ sec, Partial Discharge < 5 pC	V_{PR}	840	945	1336	2121	V peak
Highest Allowable Overvoltage* (Transient Overvoltage, $t_{in} = 10$ sec)	V_{IOTM}	4000	6000	6000	8000	V peak
Safety Limiting Values - Maximum Values Allowed in the Event of a Failure, also see Thermal Derating curve						
Case Temperature	T_S	150	175	175	150	°C
Input Current	$I_{S,INPUT}$	150	230	400	400	mA
Output Power	$P_{S,OUTPUT}$	600	600	600	700	mW
Insulation Resistance at T_S , $V_{IO} = 500$ V	R_S	$\geq 10^9$	$\geq 10^9$	$\geq 10^9$	$\geq 10^9$	Ω

*Refer to the optocoupler section of the Designer's Catalog, under regulatory information (IEC/EN/DIN EN 60747-5-2) for a detailed description of Method a and Method b partial discharge test profiles.

NOTE: These optocouplers are suitable for "safe electrical isolation" only within the safety limit data. Maintenance of the safety data shall be ensured by means of protective circuits.

NOTE: Insulation Characteristics are per IEC/EN/DIN EN 60747-5-2.

NOTE: Surface mount classification is Class A in accordance with CECC 00802.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Device	Min.	Max.	Units	Note
Storage Temperature	T_S		-55	125	°C	
Operating Temperature	T_A	HCPL-4504	-55	100	°C	
		HCPL-0454				
		HCPL-J454				
		HCNW4504	-55	85		
Average Forward Input Current	$I_{F(AVG)}$			25	mA	1
Peak Forward Input Current (50% duty cycle, 1 ms pulse width)	$I_{F(PEAK)}$	HCPL-4504		50	mA	2
		HCPL-0454				
		HCPL-J454		40		
		HCNW4504				
Peak Transient Input Current ($\leq 1 \mu s$ pulse width, 300 pps)	$I_{F(TRANS)}$	HCPL-4504		1	A	
		HCPL-0454				
		HCPL-J454		0.1		
		HCNW4504				
Reverse LED Input Voltage (Pin 3-2)	V_R	HCPL-4504		5	V	
		HCPL-0454				
		HCPL-J454		3		
		HCNW4504				
Input Power Dissipation	P_{IN}	HCPL-4504		45	mW	3
		HCPL-0454				
		HCPL-J454		40		
		HCNW4504				
Average Output Current (Pin 6)	$I_{O(AVG)}$			8	mA	
Peak Output Current	$I_{O(PEAK)}$			16	mA	
Supply Voltage (Pin 8-5)	V_{CC}		-0.5	30	V	
Output Voltage (Pin 6-5)	V_O		-0.5	20	V	
Output Power Dissipation	P_O			100	mW	4
Lead Solder Temperature (Through-Hole Parts Only) 1.6 mm below seating plane, 10 seconds Up to seating plane, 10 seconds	T_{LS}	HCPL-4504		260	°C	
		HCPL-J454				
		HCNW4504		260		
Reflow Temperature Profile	T_{RP}	HCPL-0454 and Option 300		See Package Outline Drawings section		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Specifications (DC)Over recommended temperature ($T_A = 0^\circ\text{C}$ to 70°C) unless otherwise specified. See note 12.

Parameter	Symbol	Device	Min.	Typ.*	Max.	Units	Test Conditions	Fig.	Note				
Current Transfer Ratio	CTR	HCPL-4504	25	32	60	%	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = 0.4\text{ V}$	$I_F = 16\text{ mA}$, $V_{CC} = 4.5\text{ V}$	1, 2, 4	5			
		HCPL-0454	21	34							$V_O = 0.5\text{ V}$		
		HCPL-J454	19	37	60		$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = 0.4\text{ V}$						
			13	39			$V_O = 0.5\text{ V}$						
		HCNW4504	23	29	60		$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = 0.4\text{ V}$						
	19		31	63	$V_O = 0.5\text{ V}$								
	CTR	HCPL-4504	26	35	65		$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = 0.4\text{ V}$				$I_F = 12\text{ mA}$, $V_{CC} = 4.5\text{ V}$	1, 2, 4	5
		HCPL-0454	22	37			$V_O = 0.5\text{ V}$						
		HCPL-J454	21	43	65		$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = 0.4\text{ V}$						
			16	45			$V_O = 0.5\text{ V}$						
HCNW4504		25	33	65	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = 0.4\text{ V}$								
		21	35	68	$V_O = 0.5\text{ V}$								
Logic Low Output Voltage	V_{OL}	HCPL-4504	0.2	0.4	0.5	V	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $I_O = 4.0\text{ mA}$	$I_F = 16\text{ mA}$, $V_{CC} = 4.5\text{ V}$					
		HCPL-0454					$I_O = 3.3\text{ mA}$						
		HCPL-J454					$T_A = 25^\circ\text{C}$ $I_O = 3.6\text{ mA}$						
							$I_O = 3.0\text{ mA}$						
		HCNW4504					$T_A = 25^\circ\text{C}$ $I_O = 3.6\text{ mA}$						
		$I_O = 3.0\text{ mA}$											
Logic High Output Current	I_{OH}		0.003	0.5	μA	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = V_{CC} = 5.5\text{ V}$	$I_F = 0\text{ mA}$	5					
			0.01	1		$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = V_{CC} = 15\text{ V}$							
				50									
Logic Low Supply Current	I_{CCL}	HCPL-4504	50	200	μA	$I_F = 16\text{ mA}$, $V_O = \text{Open}$, $V_{CC} = 15\text{ V}$		12					
		HCPL-0454											
		HCNW4504											
		HCPL-J454							70				
Logic High Supply Current	I_{CCH}		0.02	1	μA	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $I_F = 0\text{ mA}$, $V_O = \text{Open}$, $V_{CC} = 15\text{ V}$		12					
				2									
Input Forward Voltage	V_F	HCPL-4504	1.5	1.7	1.8	V	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $I_F = 16\text{ mA}$	3					
		HCPL-0454											
		HCPL-J454					1.45		1.59	1.85	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $I_F = 16\text{ mA}$		
		HCNW4504					1.35			1.95			
Input Reverse Breakdown Voltage	BV_R	HCPL-4504	5			V	$I_R = 10\text{ }\mu\text{A}$						
		HCPL-0454											
		HCPL-J454					3			$I_R = 100\text{ }\mu\text{A}$			
		HCNW4504											
Temperature Coefficient of Forward Voltage	$\frac{\Delta V_F}{\Delta T_A}$	HCPL-4504	-1.6			$\text{mV}/^\circ\text{C}$	$I_F = 16\text{ mA}$						
		HCPL-0454											
		HCPL-J454							-1.4				
		HCNW4504											
Input Capacitance	C_{IN}	HCPL-4504	60			pF	$f = 1\text{ MHz}$, $V_F = 0\text{ V}$						
		HCPL-0454											
		HCPL-J454							70				
		HCNW4504											

*All typicals at $T_A = 25^\circ\text{C}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC Switching Specifications

Over recommended temperature ($T_A = 0^\circ\text{C}$ to 70°C) unless otherwise specified.

Parameter	Symbol	Device	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions	Fig.	Note			
Propagation Delay Time to Logic Low at Output	t_{PHL}			0.2	0.3	μs	$T_A = 25^\circ\text{C}$ Pulse: $f = 20\text{ kHz}$, Duty Cycle = 10%, $I_F = 16\text{ mA}$, $V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $R_L = 1.9\text{ k}\Omega$, $C_L = 15\text{ pF}$, $V_{THHL} = 1.5\text{ V}$	6, 8, 9	9			
					0.5							
		HCPL-J454 Others	0.2 0.05 0.1	0.5 1.0	0.7	μs	$T_A = 25^\circ\text{C}$ Pulse: $f = 10\text{ kHz}$, Duty Cycle = 50%, $I_F = 12\text{ mA}$, $V_{CC} = 15.0\text{ V}$, $R_L = 20\text{ k}\Omega$, $C_L = 100\text{ pF}$, $V_{THHL} = 1.5\text{ V}$	6, 10-14	10			
Propagation Delay Time to Logic High at Output	t_{PLH}			0.3	0.5	μs	$T_A = 25^\circ\text{C}$ Pulse: $f = 20\text{ kHz}$, Duty Cycle = 10%, $I_F = 16\text{ mA}$, $V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $R_L = 1.9\text{ k}\Omega$, $C_L = 15\text{ pF}$, $V_{THLH} = 1.5\text{ V}$	6, 8, 9	9			
					0.7							
		HCPL-J454 Others	0.3 0.2	0.8 1.4	1.1	μs	$T_A = 25^\circ\text{C}$ Pulse: $f = 10\text{ kHz}$, Duty Cycle = 50%, $I_F = 12\text{ mA}$, $V_{CC} = 15.0\text{ V}$, $R_L = 20\text{ k}\Omega$, $C_L = 100\text{ pF}$, $V_{THLH} = 2.0\text{ V}$	6, 10-14	10			
Propagation Delay Difference Between Any 2 Parts	$t_{PLH} - t_{PHL}$		-0.4	0.3	0.9	μs	$T_A = 25^\circ\text{C}$ Pulse: $f = 10\text{ kHz}$, Duty Cycle = 50%, $I_F = 12\text{ mA}$, $V_{CC} = 15.0\text{ V}$, $R_L = 20\text{ k}\Omega$, $C_L = 100\text{ pF}$, $V_{THHL} = 1.5\text{ V}$, $V_{THLH} = 2.0\text{ V}$	6, 10-14	17			
			-0.7	1.3								
Common Mode Transient Immunity at Logic High Level Output	$ CM_H $		15	30		$\text{kV}/\mu\text{s}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_{CM} = 1500\text{ V}_{P-P}$ $V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $R_L = 1.9\text{ k}\Omega$, $C_L = 15\text{ pF}$, $I_F = 0\text{ mA}$	7	7, 9			
	$ CM_H $		15	30		$\text{kV}/\mu\text{s}$				$V_{CC} = 15.0\text{ V}$, $R_L = 20\text{ k}\Omega$, $C_L = 100\text{ pF}$, $I_F = 0\text{ mA}$	7	8, 10
Common Mode Transient Immunity at Logic Low Level Output	$ CM_L $		15	30		$\text{kV}/\mu\text{s}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_{CM} = 1500\text{ V}_{P-P}$ $V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $R_L = 1.9\text{ k}\Omega$, $C_L = 15\text{ pF}$, $I_F = 16\text{ mA}$	7	7, 9			
	$ CM_L $	HCPL-J454	15	30		$\text{kV}/\mu\text{s}$				$V_{CC} = 15.0\text{ V}$, $R_L = 20\text{ k}\Omega$, $C_L = 100\text{ pF}$, $I_F = 12\text{ mA}$	7	8, 10
	$ CM_L $	Others	10			$\text{kV}/\mu\text{s}$						
	$ CM_L $		15	30		$\text{kV}/\mu\text{s}$				$V_{CC} = 15.0\text{ V}$, $R_L = 20\text{ k}\Omega$, $C_L = 100\text{ pF}$, $I_F = 16\text{ mA}$	7	8, 10

*All typicals at $T_A = 25^\circ\text{C}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Package Characteristics

Over recommended temperature ($T_A = 0^\circ\text{C}$ to 25°C) unless otherwise specified.

Parameter	Sym.	Device	Min.	Typ.*	Max.	Units	Test Conditions	Fig.	Note
Input-Output Momentary Withstand Voltage†	V_{ISO}	HCPL-4504	3750			V rms	RH ≤ 50%, t = 1 min., $T_A = 25^\circ\text{C}$		6, 13, 16
		HCPL-J454	3750						6, 14, 16
		HCPL-4504 Option 020	5000						6, 11, 15
		HCNW4504	5000						6, 15, 16
Input-Output Resistance	R_{I-O}	HCPL-4504		10^{12}		Ω	$V_{I-O} = 500\text{ Vdc}$		6
		HCPL-0454							
		HCPL-J454							
		HCNW4504	10^{12}	10^{13}	$T_A = 25^\circ\text{C}$				
			10^{11}				$T_A = 100^\circ\text{C}$		
Capacitance (Input-Output)	C_{I-O}	HCPL-4504		0.6		pF	f = 1 MHz		6
		HCPL-0454							
		HCPL-J454		0.8					
		HCNW4504		0.5	0.6				

*All typicals at $T_A = 25^\circ\text{C}$.

†The Input-Output Momentary Withstand Voltage is a dielectric voltage rating that should not be interpreted as an input-output continuous voltage rating. For the continuous voltage rating refer to the IEC/EN/DIN EN 60747-5-2 Insulation Related Characteristics Table (if applicable), your equipment level safety specification or Agilent Application Note 1074 entitled "Optocoupler Input-Output Endurance Voltage."

Notes:

- Derate linearly above 70°C free-air temperature at a rate of $0.8\text{ mA}/^\circ\text{C}$ (8-Pin DIP).
Derate linearly above 85°C free-air temperature at a rate of $0.5\text{ mA}/^\circ\text{C}$ (SO-8).
- Derate linearly above 70°C free-air temperature at a rate of $1.6\text{ mA}/^\circ\text{C}$ (8-Pin DIP).
Derate linearly above 85°C free-air temperature at a rate of $1.0\text{ mA}/^\circ\text{C}$ (SO-8).
- Derate linearly above 70°C free-air temperature at a rate of $0.9\text{ mW}/^\circ\text{C}$ (8-Pin DIP).
Derate linearly above 85°C free-air temperature at a rate of $1.1\text{ mW}/^\circ\text{C}$ (SO-8).
- Derate linearly above 70°C free-air temperature at a rate of $2.0\text{ mW}/^\circ\text{C}$ (8-Pin DIP).
Derate linearly above 85°C free-air temperature at a rate of $2.3\text{ mW}/^\circ\text{C}$ (SO-8).
- CURRENT TRANSFER RATIO in percent is defined as the ratio of output collector current, I_O , to the forward LED input current, I_F , times 100.
- Device considered a two-terminal device: Pins 1, 2, 3, and 4 shorted together and Pins 5, 6, 7, and 8 shorted together.
- Under TTL load and drive conditions: Common mode transient immunity in a Logic High level is the maximum tolerable (positive) dV_{CM}/dt on the leading edge of the common mode pulse, V_{CM} , to assure that the output will remain in a Logic High state (i.e., $V_O > 2.0\text{ V}$). Common mode transient immunity in a Logic Low level is the maximum tolerable (negative) dV_{CM}/dt on the trailing edge of the common mode pulse signal, V_{CM} , to assure that the output will remain in a Logic Low state (i.e., $V_O < 0.8\text{ V}$).
- Under IPM (Intelligent Power Module) load and LED drive conditions: Common mode transient immunity in a Logic High level is the maximum tolerable dV_{CM}/dt on the leading edge of the common mode pulse, V_{CM} , to assure that the output will remain in a Logic High state (i.e., $V_O > 3.0\text{ V}$). Common mode transient immunity in a Logic Low level is the maximum tolerable dV_{CM}/dt on the trailing edge of the common mode pulse signal, V_{CM} , to assure that the output will remain in a Logic Low state (i.e., $V_O < 1.0\text{ V}$).
- The $1.9\text{ k}\Omega$ load represents 1 TTL unit load of 1.6 mA and the $5.6\text{ k}\Omega$ pull-up resistor.
- The $R_L = 20\text{ k}\Omega$, $C_L = 100\text{ pF}$ load represents an IPM (Intelligent Power Module) load.
- See Option 020 data sheet for more information.
- Use of a $0.1\text{ }\mu\text{F}$ bypass capacitor connected between Pins 5 and 8 is recommended.
- In accordance with UL 1577, each optocoupler is proof tested by applying an insulation test voltage $\geq 4500\text{ V rms}$ for 1 second (leakage detection current limit, $I_{L-O} \leq 5\text{ }\mu\text{A}$).
- In accordance with UL 1577, each optocoupler is proof tested by applying an insulation test voltage $\geq 4500\text{ V rms}$ for 1 second (leakage detection current limit, $I_{L-O} \leq 5\text{ }\mu\text{A}$).
- In accordance with UL 1577, each optocoupler is proof tested by applying an insulation test voltage $\geq 6000\text{ V rms}$ for 1 second (leakage detection current limit, $I_{L-O} \leq 5\text{ }\mu\text{A}$).
- This test is performed before the 100% Production test shown in the VDE 0884 Insulation Related Characteristics Table, if applicable.
- The difference between t_{PLH} and t_{PHL} between any two devices (same part number) under the same test condition. (See Power Inverter Dead Time and Propagation Delay Specifications section.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

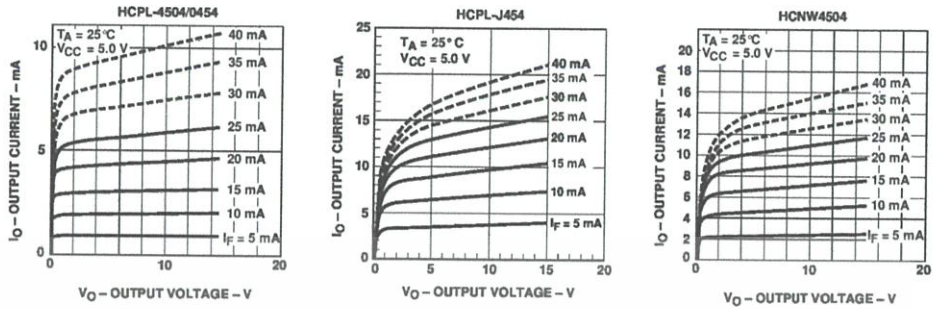


Figure 1. DC and Pulsed Transfer Characteristics.

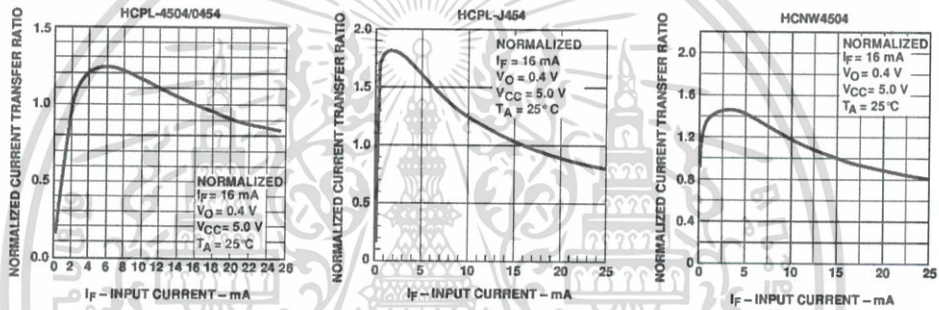


Figure 2. Current Transfer Ratio vs. Input Current.

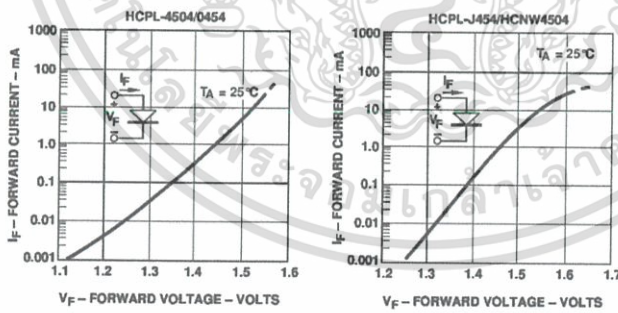


Figure 3. Input Current vs. Forward Voltage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

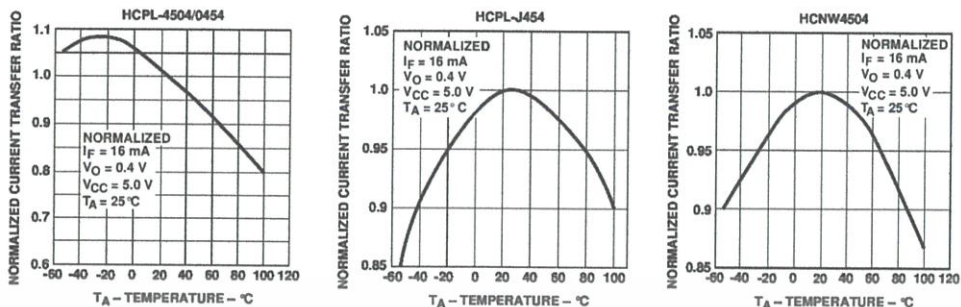


Figure 4. Current Transfer Ratio vs. Temperature.

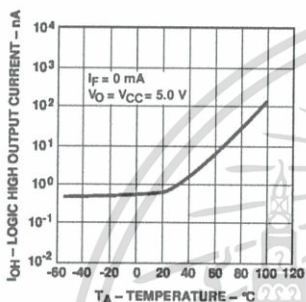


Figure 5. Logic High Output Current vs. Temperature.

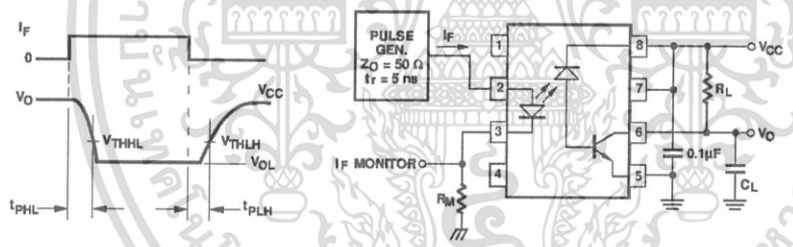


Figure 6. Switching Test Circuit.

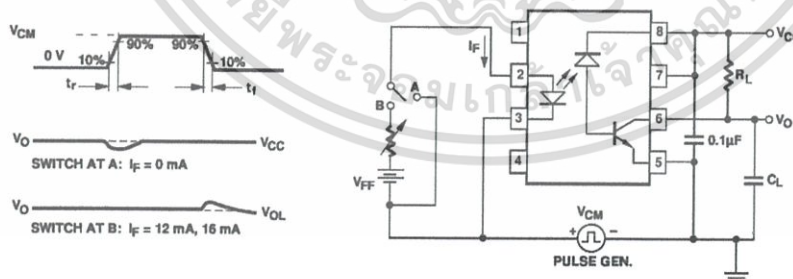


Figure 7. Test Circuit for Transient Immunity and Typical Waveforms.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

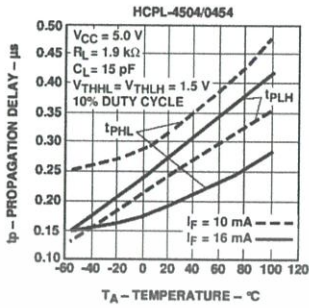


Figure 8. Propagation Delay Time vs. Temperature.

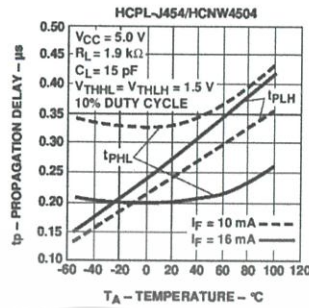


Figure 9. Propagation Delay Time vs. Load Resistance.

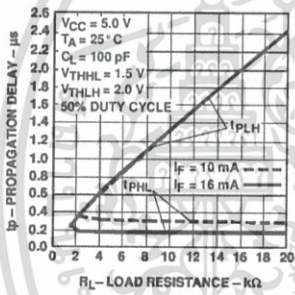


Figure 10. Propagation Delay Time vs. Load Resistance.

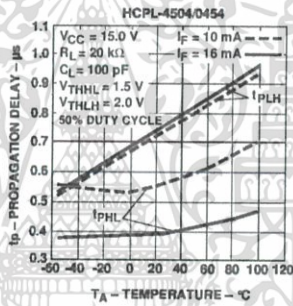


Figure 11. Propagation Delay Time vs. Temperature.

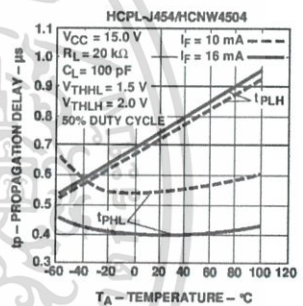


Figure 12. Propagation Delay Time vs. Load Resistance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

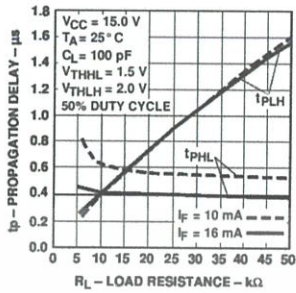


Figure 12. Propagation Delay Time vs. Load Resistance.

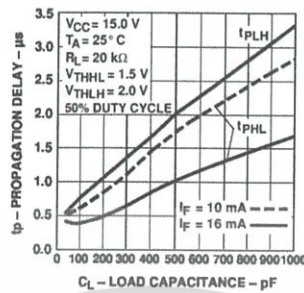


Figure 13. Propagation Delay Time vs. Load Capacitance.

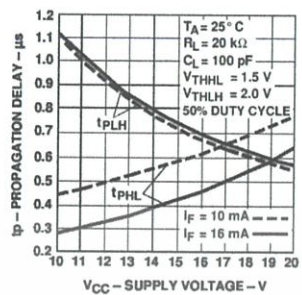


Figure 14. Propagation Delay Time vs. Supply Voltage.

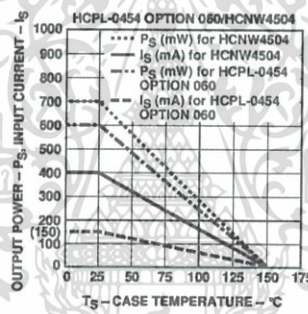
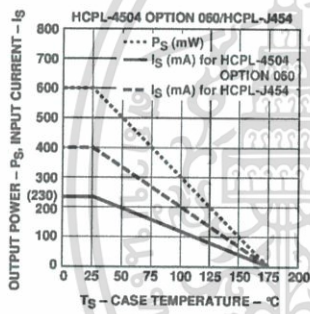


Figure 15. Thermal Derating Curve, Dependence of Safety Limiting Valve with Case Temperature per IEC/EN/DIN EN 60747-5-2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

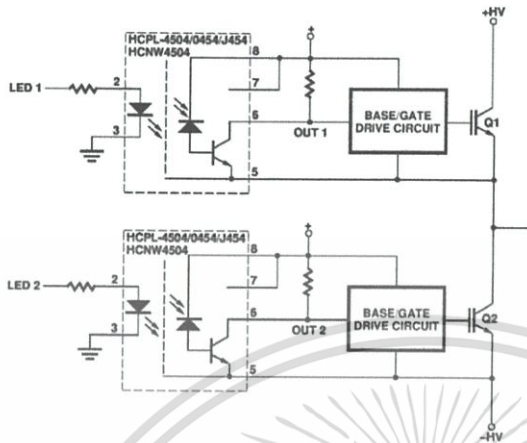


Figure 16. Typical Power Inverter.

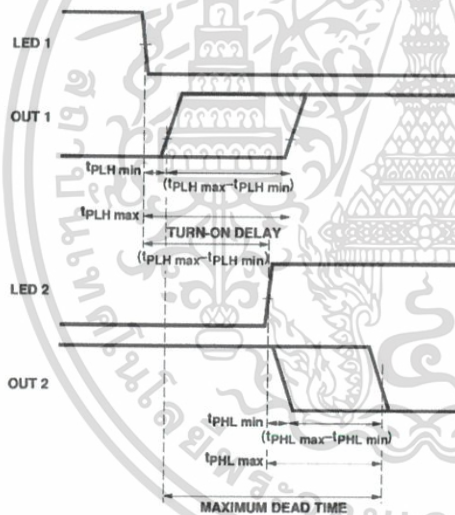


Figure 17. LED Delay and Dead Time Diagram.

Power Inverter Dead Time and Propagation Delay Specifications

The HCPL-4504/0454/J454 and HCNW4504 include a specification intended to help designers minimize "dead time" in their power inverter designs. The new "propagation delay difference" specification ($t_{PLH} - t_{PHL}$) is useful for determining not only how much optocoupler switching delay is needed to prevent "shoot-through" current, but also for determining the best achievable worst-case dead time for a given design.

When inverter power transistors switch (Q1 and Q2 in Figure 17), it is essential that they never conduct at the same time. Extremely large currents will flow if there is any overlap in their conduction during switching transitions, potentially damaging the transistors and even the surrounding circuitry. This "shoot-through" current is eliminated by delaying the turn-on of one transistor (Q2) long enough to ensure that the opposing transistor (Q1) has completely turned off. This delay introduces a small amount of "dead time" at the output of the inverter during which both transistors are off during switching transitions. Minimizing this dead time is an important design goal for an inverter designer.

The amount of turn-on delay needed depends on the propagation delay characteristics of the optocoupler, as well as the characteristics of the transistor base/gate drive circuit. Considering only the delay characteristics of the optocoupler (the characteristics of the base/gate drive circuit can be analyzed in the

DATASHEET 56V MODULE

FEATURES AND BENEFITS*

- Up to 14 year DC life
- 56V DC working voltage
- Resistive cell balancing
- Overvoltage outputs
- High power density
- 4U, half-rack package
- UL registered

TYPICAL APPLICATIONS

- UPS systems



PRODUCT SPECIFICATIONS

ELECTRICAL

BMOD0130 P056 B03

Rated Capacitance ¹	130 F
Minimum Capacitance, initial ¹	130 F
Maximum Capacitance, initial ¹	156 F
Maximum ESR _{DC} initial ¹	8.1 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR _{DC} ¹	100 A
Rated Voltage	56 V
Absolute Maximum Voltage ²	62 V
Absolute Maximum Current	1,900 A
Leakage Current at 25°C, maximum ³	120 mA
Maximum Series Voltage	750 V
Capacitance of Individual Cells ⁴	3,000 F
Stored Energy, Individual Cell ⁵	3.0 Wh
Number of Cells	23

TEMPERATURE

Operating Temperature (Cell case temperature)	
Minimum	-40°C
Maximum	40°C
Storage Temperature (Stored uncharged)	
Minimum	-40°C
Maximum	70°C

*Results may vary. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details and enclosed information for applicable operating and use requirements.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DATASHEET 56V MODULE
PRODUCT SPECIFICATIONS (Cont'd)

PHYSICAL		BMOD0130 P056 B03
Mass, typical		18 kg
Power Terminals		M8/M10
Recommended Torque - Terminal		20/30 Nm
Vibration Specification		Telcordia GR-63-CORE Zone 4
Shock Specification		N/A
Environmental Protection		IP30
Cooling		Natural Convection
MONITORING / CELL VOLTAGE MANAGEMENT		
Internal Temperature Sensor		N/A
Temperature Interface		N/A
Cell Voltage Monitoring		Overvoltage Alarm
Connector		Deutsch DTM
Cell Voltage Management		Passive
POWER & ENERGY		
Usable Specific Power, P_d^4		2,600 W/kg
Impedance Match Specific Power, P_{max}^5		5,400 W/kg
Specific Energy, E_{max}^6		3.1 Wh/kg
Stored Energy ⁷		57 Wh
SAFETY		
Short Circuit Current, typical (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)		6,900 A
Certifications		RoHS, UL810a (750V)
High-Pot Capability ⁸		4,000 V DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

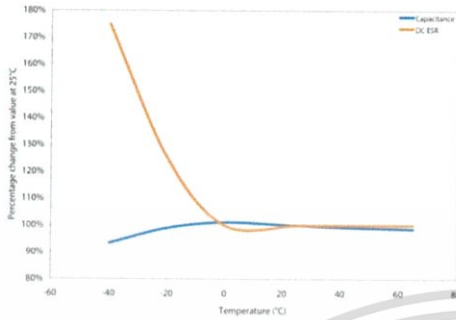
DATASHEET 56V MODULE
TYPICAL CHARACTERISTICS

THERMAL CHARACTERISTICS		BMOD0130 P056 B03
Thermal Resistance (R_{θ} , All Cell Cases to Ambient), typical ^a		0.50°C/W
Thermal Capacitance (C_{θ}), typical		16,000 J/°C
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$) ^b		61 A, RMS
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$) ^b		99 A, RMS
LIFE		
DC Life at High Temperature ¹ (held continuously at Rated Voltage & Maximum Operating Temperature)		8 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)		20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)		100%
Projected DC Life at 25°C ¹ (held continuously at Rated Voltage)		14 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)		20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)		100%
Shelf Life (Stored uncharged at 25°C)		4 years

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

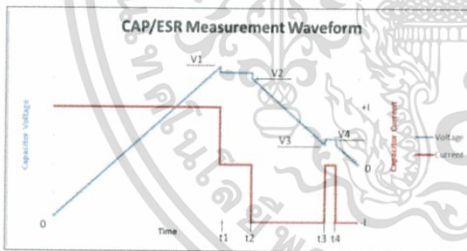
DATASHEET 56V MODULE

ESR AND CAPACITANCE VS TEMPERATURE



NOTES

1. Capacitance and ESR_{DC} measured at 25°C using specified test current per waveform below.
2. Absolute maximum voltage, non-repeated. Not to exceed 1 second.
3. After 72 hours at rated voltage. Initial leakage current can be higher.
4. Per IEC 62391-2, $P_d = \frac{0.12V^2}{ESR_{DC} \times \text{mass}}$
5. $P_{max} = \frac{V^2}{4 \times ESR_{DC} \times \text{mass}}$
6. $E_{max} = \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3,600 \times \text{mass}}$
7. $E_{stored} = \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3,600}$
8. $\Delta T = I_{RMS}^2 \times ESR \times R_{ca}$
9. Per United Nations material classification UN3499, all Maxwell ultracapacitors have less than 10 Wh capacity to meet the requirements of Special Provisions 361. Both individual ultracapacitors and modules composed of those ultracapacitors shipped by Maxwell can be transported without being treated as dangerous goods (hazardous materials) under transportation regulations.
10. Duration = 60 seconds. Not intended as an operating parameter.



$V1 = V_{rated}$
 $V3 = 0.5 \times V_{rated}$
 $t2 - t1 = 15 \text{ seconds}$
 $t4 - t3 = 5 \text{ seconds}$
 $\text{Capacitance} = 1 \times (t3 - t2) / (V2 - V3)$
 $\text{ESR} = (V4 - V3) / I$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DATASHEET 56V MODULE

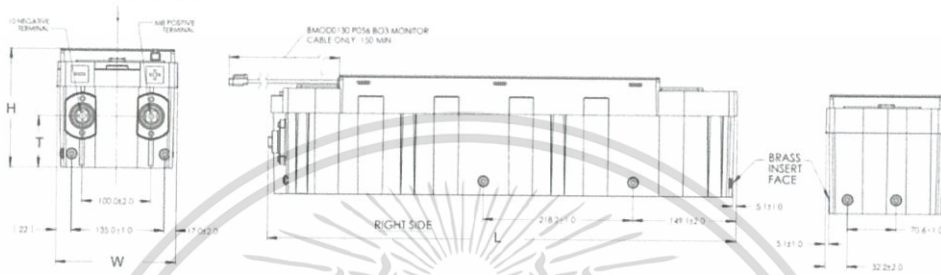
MOUNTING RECOMMENDATIONS

Please refer to the user manual for installation recommendations.

MARKINGS

Products are marked with the following information: Rated capacitance, rated voltage, product number, name of manufacturer, positive and negative terminal, warning marking, serial number.

BMOD0130 P056 B03



Part Description	Dimensions (mm)				Package Quantity
	L (max)	W (max)	H (max)	T (±2mm)	
BMOD0130 P056 B03	683	177	175	74.9	1

Product dimensions are for reference only unless otherwise identified. Product dimensions and specifications may change without notice. Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application. All products featured on this datasheet are covered by the following U.S. patents and their respective foreign counterparts: 6643119, 7295423, 7342770, 7352558, 7384433, 7440258, 7492571, 7508651, 7791860, 7791861, 7859826, 7883553, 7935155, 8072734, 8098481, 8279580, and patents pending.



Maxwell Technologies, Inc.
Global Headquarters
 3888 Calle Fortunada
 San Diego, CA 92123
 USA
 Tel: +1 858 503 3300
 Fax: +1 858 503 3301



Maxwell Technologies SA
 Route de Montena 65
 CH-1728 Rossens
 Switzerland
 Tel: +41 (0)26 411 85 00
 Fax: +41 (0)26 411 85 05



Maxwell Technologies, GmbH
 Leppoldstrasse 244
 80807 München
 Germany
 Tel: +49 (0)89 / 4161403 0
 Fax: +49 (0)89 / 4161403 99



Maxwell Technologies Shanghai Trading Co. Ltd.
 Unit A2c, 12th Floor
 Huarun Times Square
 500 Zhiangyang Road,
 Pudong New Area
 Shanghai 200122,
 P.R. China
 Phone: +86 21 3852 4000
 Fax: +86 21 3852 4099



Maxwell Technologies Korea, Ltd.
 Room 1524, D-Cube City
 Office Tower, 15F #662
 Gyeongin-Ro, Guro-Gu,
 Seoul, 152-706
 South Korea
 Phone: +82 10 4518 9829

MAXWELL TECHNOLOGIES, MAXWELL, MAXWELL CERTIFIED INTEGRATOR, ENABLING ENERGY'S FUTURE, BOOSTCAP, CELL, DC/DC and their respective designs and/or logos are either trademarks or registered trademarks of Maxwell Technologies, Inc. and may not be copied, imitated or used, in whole or in part, without the prior written permission from Maxwell Technologies, Inc. All contents copyright © 2013 Maxwell Technologies, Inc. All rights reserved. No portion of these materials may be reproduced in any form, or by any means, without prior written permission from Maxwell Technologies, Inc.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1-2 The module specifications (AM01202CCA05A)

Item	Specifications	Remarks
Nominal voltage *1	27.6V DC	-
Nominal capacity *1	40Ah	Discharging@25deg.C 0.2 C (8A) *2
Max allowed current *1	120A (Charge/discharge)	@25 deg.C
Operating voltage *1	18.0V~32.4V	-
Cell composition	2 in parallel and 12 in serial (2P12S)	Use of SCiB [®] 20Ah cell
Function	-Measuring of cell voltages and module temperatures	-The notification of cell voltages and module temperatures
	-Measuring of cell voltages and module temperatures -Cell balancing operation -External notification through CAN -Automatically numbered CMU-ID by UART	-The notification of cell voltages and module temperatures through CAN -Cell balancer can be operated through CAN -CAN 2.0B: 500kbps -UART: 1200bps
Number of connections	Below 22 modules in series	(22 modules in series. Nominal voltage: 607.2V)
Charge/discharge terminal	Specified M6 screw	Tool: T20 Hexalobular wrench
Dimensions	187.3(H) x 358.5(D) x 122.65(W)	Unit: mm (Excluding protrusions) (Tolerance refers to "1.3 Appearance/Dimensions")
Weight	14kg (Approx.)	-
External interface	CAN 2.0B 1ch UART ISO9141 Equivalent 1ch	CAN communication connector (8 poles) SM08B-CPTK-1A-TB (Manufactured by JST)
CMU operating power supply	Voltage: DC12V(10.2~13.2V) Rated consumption current: 17mA	Supplied from external power source Instantaneous interruption: less than 10msec Rush current: (Approx. 7A (Only 1 in series), ~Approx. 11A (22 in series))
Environmental condition	Operating temperature range	-30~+55deg.C No condensation *3
	Storage temperature range	-30~+55deg.C Recommended: -10~+25deg.C No condensation *3.
	Humidity	15~85%RH No condensation *3.
	Operating altitude range	Below 1,000m When this module is used in an area over 1,000m, please contact us at the address described at the end of this document.

Note *1. Initial characteristics in manufacturing.

*2. Charge/discharge condition

• Charge: 40A, 20A, 8A, 4A, 2A/cell 2.7V cut Step charge

• Discharge: 8A/cell 1.5V cut Constant current discharge

*3. This module may be damaged and become unusable due to condensation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด
และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์

Hybrid Energy Storages System between Ultracapacitor
and Li-ion Battery by DC-DC Converters

นายภาสกร ราชเดิม นายสรวิวัฒน์ ทำใหญ่

นางสาวศิริภา ธรรมรัตน์ และนางสาวดวงกมล อุ่นอุ่มรักษ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-mail:U.doungkamon@gmail.com

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด คือมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการอัดและคายประจุได้รวดเร็ว ในทางกลับกันแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นมีข้อดีคือมีความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูง เป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้าได้นาน ดังนั้นจึงจะเป็นประโยชน์อย่างมาก หากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำทั้งสองแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้ามาใช้ผสมผสานกัน เนื่องจากจะทำให้ได้ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่างกันได้ โดยในการผสมผสานทั้งสองแหล่งกักเก็บพลังงานจะประยุกต์ใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ ชนิดบัก-บูสต์ในการเชื่อมต่อ พิกัดคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอมีขนาดแรงดันที่ 96 โวลต์ สามารถจ่ายกำลังได้สูงสุดที่ 1 กิโลวัตต์ จากการทดลองสามารถนำระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าทั้งสองมาใช้ร่วมกันได้และสามารถอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดได้ในเวลา 14 นาที ที่พิกัดแรงดัน 168 โวลต์ 4.93 กิโลวัตต์ และถ่ายโอนพลังงานจากการคายประจุของตัวเก็บไฟฟ้าแบบยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในช่วงบัคได้ตั้งแต่ช่วง 168 โวลต์จนถึง 96 โวลต์ และเปลี่ยนมาทำงานในช่วงบูสต์ได้ในช่วง 96 โวลต์จนถึง 64 โวลต์ โดยใช้พิกัดแรงดันที่ 96 โวลต์ กระแสที่ 10 แอมแปร์ ใช้เวลาทั้งสิ้น 5 ชั่วโมง 11 นาที ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้าที่มีความต้องการระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่มีข้อจำกัดในด้านในการอัดประจุไฟฟ้าที่รวดเร็ว

คำสำคัญ: ระบบกักเก็บพลังงาน, ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด, แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน, วงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์

Abstract

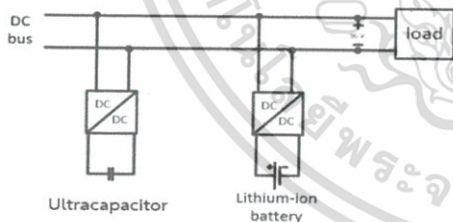
This thesis presents a system of a combination of two energy storages which consist of ultracapacitors and lithium-ion batteries by applying DC-DC converters. The basic characteristic of ultracapacitor is a great power density, which implies the ability to charge and discharge faster over a short period of time. On the other hand, the battery has much higher energy density allowing the battery to store more energy over a long period of time. In this thesis, the combination of a battery and an ultracapacitor in a hybrid energy storages system would be very useful because of the high efficiency and the ability to transfer energy between them. In this hybrid energy storages system, the Buck-Boost DC-DC converter has been applied. The converters which are presented in this thesis is worked at the rated 96 Volts and can produce a maximum power up to 1 kW. From the experiment, the combination of the two energy sources is available and can charge the ultracapacitors within 14 minutes at the rated of 168 Volts 4.93 kW. As the rated voltage of 96 Volts 10 Amperes, the system can transfer the energy from the ultracapacitors to lithium-ion batteries in buck mode at the rated of 168 to 96 volts with a duty of 90 percent and able to change in boost mode at the rated of 96 to 64 volts with a duty of 20 percent within 5 hours and 11 minutes. The experimental results can show the combination ability between two energy storages. The system can also store higher energy density and higher power density. This hybrid energy storages system can be applied to the electric vehicles that need to reduce gross weight, and this hybrid energy storages system also has the special qualification of fast charging.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานเข้ามามีบทบาทในการดำเนินชีวิตประจำวันของคนทั่วไปและยังคงกล่าวได้ว่าพลังงานยังมีส่วนสำคัญการขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งปัจจุบันปัญหาเรื่องการขาดแคลนพลังงานนั้นมีความซับซ้อนในทางกลับกันความต้องการพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะภาคการขนส่งที่มีแนวโน้มความต้องการเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นเหตุจำเป็นที่ทำให้ต้องมองหาพลังงานทางเลือกชนิดอื่นที่มาจากแหล่งพลังงานที่ผลิตมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล พลังงานทางเลือกจึงเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งส่วนแล้วแต่เป็นการผลิตพลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้นและสอดคล้องกับนวัตกรรมของเทคโนโลยีในสมัยปัจจุบันที่ได้มีการออกแบบให้พัฒนาไปในทิศทางเดียวกันกับพลังงานตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ รถยนต์ที่เริ่มมีการเปลี่ยนจากการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมาใช้พลังงานไฟฟ้า

เนื่องจากในปัจจุบันแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้ายังมีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ช่วงเวลาการอัดประจุและช่วงเวลาการคายประจุที่ช้า มีอายุใช้งานจำกัด จึงต้องมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา โครงการนี้จึงได้นำเสนอถึงการศึกษาร่วมกันของแหล่งกักเก็บพลังงาน 2 แหล่งเพื่อหาการทำงานร่วมกันของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดที่จะสามารถลดเวลาในการอัดประจุลงได้ เนื่องจากนำตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้ในระบบกักเก็บพลังงานซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญและเป็นองค์ประกอบหลักในการอัดประจุไฟฟ้าลงไป จากข้อดีของตัวเก็บประจุไฟฟ้า จึงทำให้ลดเวลาในการอัดประจุลงได้ นอกจากนี้การศึกษาคูสมบัติของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อที่จะนำมาซึ่งการหาวิธีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับการนำแหล่งกักเก็บพลังงานทั้ง 2 แหล่ง



รูปที่ 1.1 Hybrid Energy Storage System Diagram

2 ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน (HESS: Hybrid Energy Storage Systems)

ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน คือ คือนำแหล่งกักเก็บพลังงานสองแหล่งหรือมากกว่าที่มีข้อดีของเทคโนโลยีการเก็บพลังงานมาใช้งานร่วมกัน

2.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Ultracapacitor)

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีส่วนประกอบหลัก คือ ขั้วบวกและลบ มักทำด้วยคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวสูง มีรูพรุนจำนวนมาก เช่น Activated carbon

กันระหว่างขั้ว ซึ่งไอออนสามารถผ่านได้เช่นเดียวกับแบตเตอรี่ และสารละลายอิเล็กโทรไลต์มักจะเป็น Acetonitrile หรือ Polycarbonate คุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าชนิดอื่น จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดทั้งด้านพลังงานจำเพาะ กำลังจำเพาะ ค่าความจุไฟฟ้า เวลาในการอัดและคายประจุและอายุการใช้งาน มีค่าอยู่ระหว่างค่าของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุชนิดอื่น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจึงนับว่าเป็นเทคโนโลยีที่สามารถเติมช่องว่างระหว่างเทคโนโลยีแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุได้

2.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion Battery)

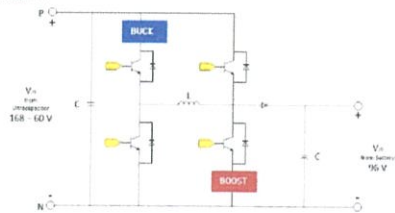
การนำโลหะลิเทียมมาใช้ในแบตเตอรี่ ใช้เป็นรูปของไอออน จะมีความปลอดภัยกว่ารูปแบบของโลหะ ความหนาแน่นพลังงานของเซลล์ลิเทียมไอออน มีค่าสูงกว่าเซลล์โลหะชนิดอื่นเกิดแคแอดเมียม 2 เท่า เนื่องจากมีแรงดันที่สูงกว่า และข้อดีที่มีแรงดันที่สูงนี้เอง เซลล์ในแพคเกจแบตเตอรี่จึงใช้จำนวนเซลล์ที่น้อยก็สามารถให้พลังงานได้อย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังไม่มีปัญหาเรื่องความจำของแบตเตอรี่ ข้อดีของลิเทียมไอออน คือ ความหนาแน่นพลังงานสูง ไม่จำเป็นต้องกระตุ้นก่อนใช้ มีอัตราการคายประจุตัวเองต่ำ และไม่ต้องดูแลรักษา และข้อจำกัดของลิเทียมไอออน คือ จำเป็นต้องใช้วงจรป้องกันแรงดันและกระแสให้อยู่ในเขตปลอดภัย มีการเสื่อมอายุตามเวลาแม้ว่าจะไม่มีการใช้งาน และอัตราการจ่ายกระแสไม่สูงมาก ไม่เหมาะกับงานที่ใช้โหลดขนาดใหญ่

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

Characteristics	Li-Ion battery	Supercapacitors	
		Carbon Supercapacitor	Li-Ion Supercapacitor
Specific Energy (Wh/kg)	100-265	1-10	10-15
Specific Power (W/kg)	300-1,500	500-10,000	>100,000
Cell Voltage (V)	2.5-4.2	1.2-3.3	2.2-3.8
Capacitance (F)	-	0.1-12,000	300-3,300
Discharge time	min-h	s-min	s-min
Charging time	min-h	s-min	min
Charge/Discharge time efficiency (%)	90	85-98	90
Cycle life (cycles)	≤5,000	≥500,000	10,000-100,000

2.3 Bidirectional DC-DC Converter

วงจรแปรผันพลังงานไฟฟ้า 2 ทิศทาง ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณแรงดันไฟฟ้าและควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าในการถ่ายโอนพลังงาน โดยวงจรจะประกอบไปด้วย ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และสวิตช์กำลังจำนวน 2 สวิตช์ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ วงจรบิโคมและวงจรบูสต์ วงจรบิโคมจะเก็บพลังงานไว้ในด้านแรงดันสูง และวงจรบูสต์จะเก็บพลังงานไว้ในด้านแรงดันต่ำ ในการโอนถ่ายพลังงานทั้ง 2 ทิศทางจะต้องมีสวิตช์เป็นตัวควบคุมการไหลทั้ง 2 ทิศทาง



รูปที่ 2.1 Basic bidirectional dc-dc converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวชี้เซลล์เบื้องต้นของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์คำนวณได้จากสมการที่ 1 ขนาดตัวเหนี่ยวนำที่ทำให้วงจรสามารถทำงานได้แบบกระแสต่อเนื่องในโหมดบัสคำนวณได้จากสมการที่ 2 และค่าตัวเก็บประจุสำหรับวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์คำนวณได้จากสมการที่ 3

$$D = \frac{V_o}{V_s} \tag{1}$$

$$L_{min} = \frac{(1-D)}{2f} \times \frac{V_o}{I_o} \tag{2}$$

$$\frac{\Delta I_o}{I_o} = \frac{(1-D)}{8LCf^2} \tag{3}$$

ค่าตัวชี้เซลล์เบื้องต้นของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์คำนวณได้จากสมการที่ 4 ขนาดตัวเหนี่ยวนำที่ทำให้วงจรสามารถทำงานได้แบบกระแสต่อเนื่องในโหมดบัสคำนวณได้จากสมการที่ 5

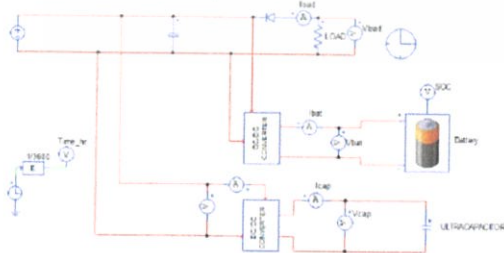
$$\frac{1}{1-D} = \frac{V_o}{V_s} \tag{4}$$

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2}{2f} \times \frac{V_o}{I_o} \tag{5}$$

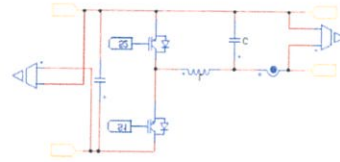
- โดยที่
- L_{min} คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต่ำที่สุด
 - D คือ ค่าตัวชี้เซลล์
 - f คือ ค่าความถี่สวิตซ์ซึ่ง
 - V_s คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า
 - V_o คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก
 - I_o คือ กระแสไฟฟ้าขาออก
 - ΔI_o คือ อัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าขาออก

3. การจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์

การออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน โดยใช้โปรแกรม PSIM 10 ดังรูปที่ 3.1 และวงจรย่อยของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน



รูปที่ 3.2 Sub-circuit of Ultracapacitor and Lithium-ion Battery

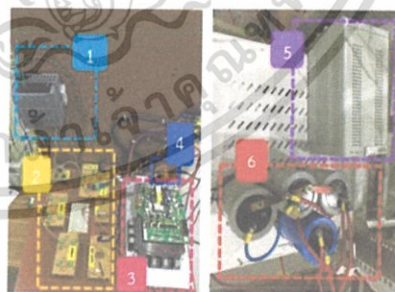
โดยแบ่งช่วงการทดลองออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงการอัดประจุจากเครื่องอัดประจุไฟฟ้าไปยังตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและภาระทางไฟฟ้า และช่วงการถ่ายโอนประจุจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไปยังภาระทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 กราฟผลการทดลองค่าแรงดันทางไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสานจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม PSIM

4. การออกแบบระบบและเครื่องต้นแบบ

จุดประสงค์หลักของโครงการคือการที่จะนำการออกแบบนี้ไปประยุกต์ใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบและการสร้างชิ้นงานต้นแบบต้องอยู่บนพื้นฐานของแนวคิดของการสร้างชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ประหยัดพื้นที่ น้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพที่สูง แสดงดังรูปที่ 4.1



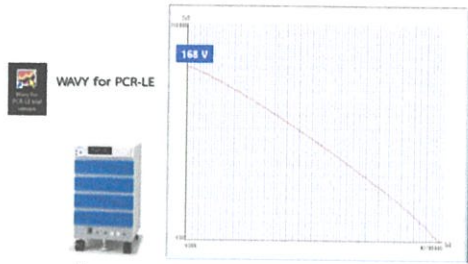
- 1 PLC
- 2 ชุดควบคุม
- 3 Bidirectional Buck-Boost DC-DC Converter module
- 4 ตัวเหนี่ยวนำ
- 5 DC power supply
- 6 ตัวเก็บประจุ

รูปที่ 4.1 เครื่องต้นแบบทั้งหมด

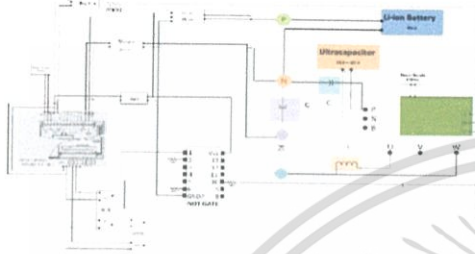
ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจำลอง

เนื่องด้วยเก็บประจุยิ่งยวดนั้นมีข้อจำกัดที่ราคาสูงมาก ในขั้นตอนการออกแบบและสร้างชิ้นงานจริงนี้จึงใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า PCR4000LE จาก KIKUSUIELECTRONICS CORP ดังรูปที่ 4.2 เพื่อจำลองเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยใช้โปรแกรม WAVY ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถจำลองกราฟการคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



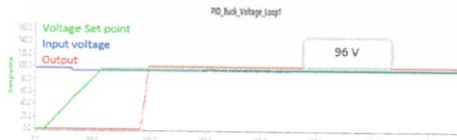
รูปที่ 4.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและ โปรแกรม WAVY



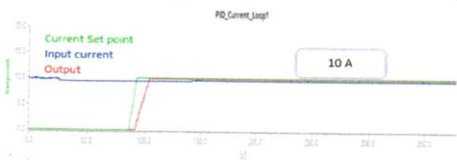
รูปที่ 4.3 โค้ดแกรมของวงจรกำลังและวงจรควบคุม

5. ผลการทดลอง

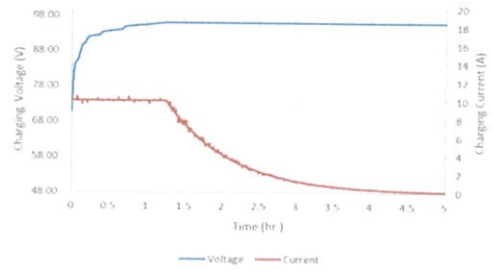
จากการทดลองแบ่งการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานเป็น 4 สภาวะ สภาวะการทำงานที่ 1 การอัดประจุตัวอัดประจุยิ่งยวดและ แบตเตอรี่ลิเธียม ไอออน ไม่สามารถทำการทดลองอัดประจุจริง ได้เนื่อง ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีราคาสูงจึงใช้การจำลองจาก โปรแกรม Wavy ดังนั้น ผลการทดลองจึงอ้างอิงจากผล Simulation จาก โปรแกรม PSIM สภาวะ ที่ 2 การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวด ไปยังแบตเตอรี่ลิเธียม ไอออน จากการทดลองพบว่าวงจรต้นแบบคิซีคิซีคอนเวอร์เตอร์สามารถ ถ่ายโอนพลังงานได้ตามรูปแบบกระแสและแรงดันคงที่ โดยสามารถ ควบคุมให้แรงดันเพิ่มขึ้นแบบ Ramp เพื่อป้องกันการเสียหายของ แบตเตอรี่ ซึ่งเมื่อจ่ายถึงค่าแรงดัน set point ที่ต้องการ จะเกิดการอัดประจุ กระแสและแรงดันคงที่ทั้ง โหมดบักและโหมดคυσต์ สภาวะที่ 3 การถ่าย โอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวด ไปยังแบตเตอรี่ลิเธียม ไอออนและ โหลด ผลการทดลองจะเหมือนสภาวะที่ 2 และ 4 และสภาวะที่ 4 การถ่าย โอนพลังงานจากแบตเตอรี่ลิเธียม ไอออนไปยังโหลด จากการทดลองใน โหลด ขนาด 14 โอห์ม เพื่อดึงกระแสคงที่ 10 แอมแปร์ ซึ่งพบว่า แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะลดลงอย่างช้าๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.4



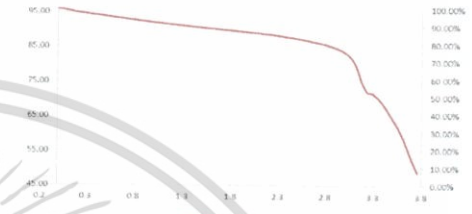
รูปที่ 5.1 กราฟการควบคุมแรงดันในโหมดบักและโหมดคυσต์



รูปที่ 5.2 กราฟการควบคุมกระแสในโหมดบักและโหมดคυσต์



รูปที่ 5.3 กราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าในการถ่ายโอนพลังงานจากตัว เก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่



รูปที่ 5.4 กราฟการถ่ายโอนพลังงานจากแบตเตอรี่ไปยังโหลดและ SOC

6. สรุปผลการทดลอง

ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานนี้ทำงานที่พิกัดแรงดัน 96 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ โดยใช้วงจรคิซีคิซีคอนเวอร์เตอร์โมดูล PM100CLA120 มาประยุกต์ใช้ในถ่ายโอนพลังงานระหว่างแหล่งกักเก็บ พลังงานทั้งสอง และภาระทางไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม PLC ในการ ควบคุมการทำงานของวงจร และใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงรุ่น PCR1400LE และ โปรแกรม Wavy ในการจำลองการคายประจุของตัว เก็บ ไฟฟ้ายิ่งยวด จากผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถอัดประจุให้แก่ ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดได้ในเวลา 14 นาที ที่พิกัดแรงดัน 168 โวลต์ 4.93 กิโลวัตต์ และถ่ายโอนพลังงานจากการคายประจุของตัวเก็บไฟฟ้า แบบยิ่งยวด ไปยังแบตเตอรี่ลิเธียม ไอออนในช่วงบักได้ตั้งแต่ช่วง 168 โวลต์จนถึง 96 โวลต์ที่คิวดี ไซเคิล 90 เปอร์เซนต์ และเปลี่ยนมาทำงาน ในช่วงคυσต์ได้ใน ช่วง 96 โวลต์จนถึง 64 โวลต์ที่คิวดี ไซเคิล 20 เปอร์เซนต์ โดยใช้พิกัดแรงดันที่ 96 โวลต์ กระแสที่ 10 แอมแปร์ ใช้เวลา ทั้งหมด 5 ชั่วโมง 11 นาที จะเห็นได้ว่าจากการศึกษาและทดลองพบว่า วงจร Bidirectional DC-DC converter ที่ใช้ในการถ่ายโอนพลังงานของ แหล่งกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด และแบตเตอรี่ลิเธียม ไอออน สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

เอกสารอ้างอิง

- [1]"www.scib.jp," TOSHIBA, 23 3 2017. [Online]. Available: [http:// www.scib.jp/en/product/module.htm](http://www.scib.jp/en/product/module.htm).
- [2]"www.maxwell.com," maxwell, [Online]. Available: [http:// www.maxwell.com/products/ultracapacitors/56v-modules](http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/56v-modules). [Accessed 19 11 2016].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายภาสกร ราชเดิม

วัน เดือน ปีเกิด 12 มกราคม 2538

ที่อยู่ 1/2 หมู่1 ตำบลบ้านนิคม อำเภอบางขัน จังหวัดนครศรีธรรมราช
80360

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2555

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนบูรณะรำลึก
จังหวัดตรัง

ปีการศึกษา 2559

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรม
พลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท โกลว์พลังงาน จำกัด จังหวัดระยอง ฝ่ายซ่อมบำรุง
ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 กรกฎาคม 2559



ชื่อ-นามสกุล นายสรวิทย์ ท่าใหญ่

วัน เดือน ปีเกิด 27 มีนาคม 2538

ที่อยู่ 29 หมู่ 1 ตำบลโพหัก อำเภอบางแพะ จังหวัดราชบุรี 70160

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2555

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ
ราชบุรี

ปีการศึกษา 2559

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรม
พลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท ผลิตไฟฟ้าราชบุรี จำกัด ฝ่ายการผลิตและประสิทธิภาพ
ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 กรกฎาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ-นามสกุล นางสาวสิริฎา ธรรมรัตน์

วัน เดือน ปีเกิด 18 สิงหาคม 2536

ที่อยู่ 156/2 หมู่ที่3 ตำบลท่าศาลา อำเภอท่าศาลา จังหวัด นครศรีธรรมราช 80160

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2555

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสาธิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ปีการศึกษา 2559

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรม พลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท บางกอกโซลาร์พาวเวอร์ จำกัด ฝ่ายควบคุมและซ่อมบำรุง ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 กรกฎาคม 2559



ชื่อ-นามสกุล นางสาวดวงกมล อุ่นอุดมรักษ์

วัน เดือน ปีเกิด 28 มกราคม 2538

ที่อยู่ 259/25 ถนนผังเมือง4 ซอยอุโชคชัย2 ตำบลสะเตงนอก อำเภอ เมือง จังหวัดยะลา 95000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2555

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนคณะราษฎรบำรุง จังหวัดยะลา

ปีการศึกษา 2559

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรม พลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท บางกอกโซลาร์พาวเวอร์ จำกัด ฝ่ายควบคุมและซ่อมบำรุง ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 กรกฎาคม 2559