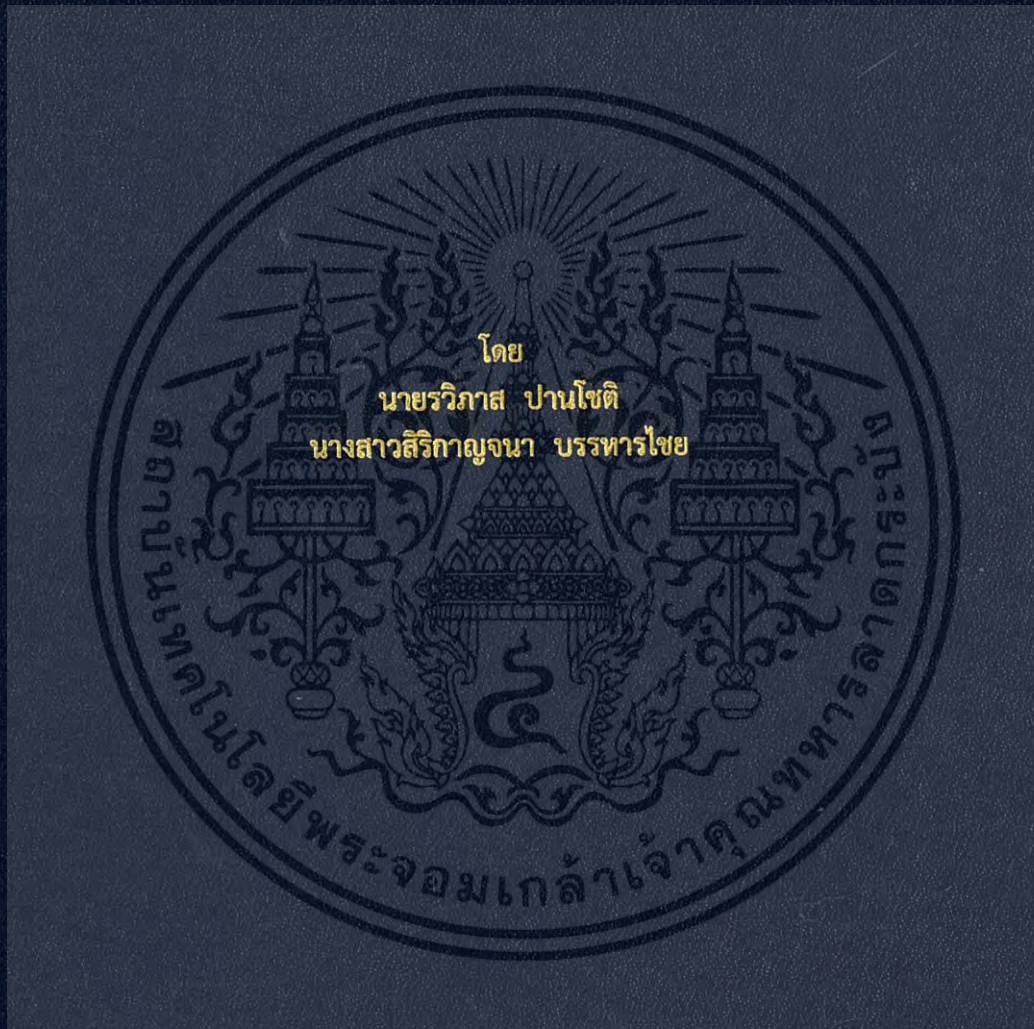


ระบบการจัดการการกักเก็บพลังงานโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่
Energy Storage Management System based on Supercapacitor and Battery



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

ระบบการจัดการการกักเก็บพลังงานโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่

Energy Storage Management System based on Supercapacitor and Battery



7B00243

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Energy Storage Management System based on Supercapacitor and Battery



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2017

ปีการศึกษา 2560

ระบบการจัดการการกักเก็บพลังงานโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่

Energy Storage Management System based on Supercapacitor and battery



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ร.อ.ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน

ดร. วิวัฒน์ เกยรวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบการจัดการการกักเก็บพลังงานโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่

ผู้จัดทำ

1. นาย รวิภาส ปานโชติ
2. นางสาวสิริกาญจนา บรรหารไชย



[Handwritten signature]

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ร.อ.ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน)

[Handwritten signature]

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร. วิวัฒน์ เกยูรวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการจัดการการกักเก็บพลังงานโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่

นาย รวิภาส ปานโชติ, นาง สาสสิริกาญจนา บรรรหารไชย

อาจารย์ที่ปรึกษา: รศ.ร.อ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: ดร. วิวัฒน์ เกษรวงศ์

ภาควิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการทำงานของระบบการจัดการการกักเก็บพลังงานโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ ซึ่งคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดพบว่ามีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าชั่วขณะสูงกว่าแบตเตอรี่และมีความจุพลังงานสูงกว่าตัวเก็บประจุทั่วไป ทำให้สามารถนำมาช่วยในการทำงานของมอเตอร์บางโหมดการทำงานได้ โดยการใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดบัสคอนเวอร์เตอร์และรีเลย์ในการทำให้แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน 38 โวลต์ใช้การต่อแบบอนุกรม 10 ชุด ชุด 3 เซลล์(10S3P)พลังงาน 360 วัตต์-ชั่วโมง และตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิด EDLC 48 โวลต์ที่ใช้การต่อแบบอนุกรม 18 ชุด ชุด 1 เซลล์(18S1P) ความจุ 6.7 ฟารัดพลังงาน 2.4 วัตต์-ชั่วโมง ทำงานร่วมกันได้ และทำการวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ โดยแสดงผลด้วยโปรแกรม LABVIEW เป็นแท่งแรงดันไฟฟ้า 3 แท่งของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแต่ละชุด แท่งกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด 1 ชุด แท่งกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ 1 ชุด ในการวิจัยนี้ศึกษาการทำงานของมอเตอร์ 2 โหมดการทำงาน คือ 1. โหมดการเริ่มเดินเครื่อง 2. โหมดการขับเคลื่อนทั่วไป โดยในโหมดแรกพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปลงถ่านขนาด 250 วัตต์ 24 โวลต์คือตัวเก็บประจุยิ่งยวด และหน่วงเวลา 1.5 วินาทีก่อนรีเลย์จะเลือกแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายให้กับมอเตอร์และขับมอเตอร์เป็นเวลา 24 วินาที จากการศึกษาพบว่าเมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนพลังงานที่ตัวเก็บประจุจ่ายให้กับมอเตอร์มีค่าเฉลี่ย 3 ครั้งเท่ากับ 0.1758 วัตต์-ชั่วโมง เมื่อรีเลย์ทำงานเกิดการกระเพื่อมของกระแสในแบตเตอรี่ ระบบมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Energy Storage Management System Based on Supercapacitor and Battery

Mr. Rawiphas Panchot, Ms. Siriganjana Bunhanchai

Advisor: Assoc.Prof Dr.Werachet Khan-ngern

Subadvisor: Dr.Wiwat Keyoonwong

Department of electrical engineering

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok,
Thailand

Abstract

The purpose of this thesis is an experimental research of energy storage management system based on supercapacitor and battery. The research of supercapacitor is high power density and has energy density more than general capacitor based on standard cell voltage. It is because supercapacitor is used for cooperating with battery to supply BLDC motor. In this topology, we use buck converter for cooperating between lithium-ion battery 38 Volt (10S3P, 360 Wh) and EDLC Supercapacitor 48 Volt (18S1P, 6.7 Farad, 2.4 Wh). Data are analyzed using LABVIEW by supercapacitor voltage (1 tank per pack, each of tank is 16 Volt), supercapacitor current, and battery current. Data is recorded and sent to excel program for graphing and calculation. In this study, we study about 2 mode of driving: 1. Starting driving mode 2. Normal mode. In first mode, supercapacitor has source to supply BLDC motor 250 W 24 V for 1.5 seconds. Then, relay selects battery for supplying BLDC motor and has driven for 24 seconds. The result of experiment, supercapacitor supplied average energy about 0.1758 Wh in first mode. When relay selected battery, battery current is oscillation. This system has stability of temperature

สารบัญ

บทคัดย่อ	I
Abstract.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญรูปภาพ.....	VII
สารบัญตาราง.....	IX
กิตติกรรมประกาศ.....	X
บทที่ 1	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	3
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	3
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	4
1.5 แผนการดำเนินโครงการ.....	5
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	5
บทที่ 2	6
2.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	6
2.1.1 Electrochemical Double-Layer (EDLC).....	6
2.2 แบตเตอรี่(Battery)	7
2.2.1 ลิเทียม-ไอออนแบตเตอรี่.....	8
2.2.2 ชาร์จและดิชาร์จของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่.....	10
2.3 Brushless DC motor.....	11
2.3.1 โครงสร้างของ Brushless DC motor	11
2.3.2 การทำงานของ Brushless DC motor.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การขับ Brushless DC motor	13
2.4 Energy Storage Management System	14
2.5 Battery Management System	15
2.5.1 วงจร Battery Management System.....	17
2.5.2 การ control ของ Battery management System	18
2.5.3 การวัดของ Battery Management System.....	19
2.6 บัคคอนเวอร์เตอร์(Buck converter)	20
บทที่ 3	23
3.1 การออกแบบโครงสร้างของระบบ	23
3.2 หลักการออกแบบวงจร.....	25
3.3 หลักการออกแบบโปรแกรม	30
3.4 การเก็บข้อมูล	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	41
4.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1	41
4.1.1 แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 1	41
4.1.2 กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 1	42
4.1.3 กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 1	43
4.1.4 กราฟแสดงกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 1.....	44
4.1.5 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 1	45
4.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2	46
4.2.1 แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 2	46
4.2.2 กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 2	47
4.2.3 กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 2	48

4.2.4 กราฟแสดงกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 2.....	49
4.2.5 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 2	50
4.3 ผลการทดลองครั้งที่ 3	51
4.3.1 แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 3	51
4.3.2 กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 3	52
4.3.3 กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 3	53
4.3.4 กราฟแสดงกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 3.....	54
4.3.5 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 3	55
4.4 ข้อมูลการวัดคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดระยะสั้น.....	56
4.4.1 การวัดคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ระยะสั้น	56
4.4.2 การวัดคุณสมบัติของแบตเตอรี่ระยะสั้น.....	56
4.4.3 การวัดคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดระยะสั้น.....	57
4.5 ข้อมูลการวัดคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดระยะยาว	58
4.4.1 การวัดคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ระยะยาว	58
4.4.2 การวัดคุณสมบัติของแบตเตอรี่ระยะยาว	59
4.4.3 การวัดคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดระยะยาว	60
4.6 การประเมินความคุ้มค่าสำหรับการลงทุน	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	62
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	62
5.2 ปัญหาที่พบบ่อยระหว่างดำเนินโครงการ.....	63
5.3 แนวทางการแก้ไขปัญหาและพัฒนา.....	63
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก ก.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1	ข้อมูลการเสียชีวิตก่อนวัยจากมลพิษทางอากาศจากฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า PM. 2.5.....	1
รูปที่ 2.1	โครงสร้างการกักเก็บพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด	6
รูปที่ 2.2	หลักการทำงานของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่.....	10
รูปที่ 2.3	โครงสร้างมอเตอร์	11
รูปที่ 2.4	วงจรควบคุมการขับเคลื่อน.....	12
รูปที่ 2.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ.....	12
รูปที่ 2.6	การเคลื่อนที่ของมอเตอร์.....	13
รูปที่ 2.7	แผนภาพการคอมมิวเตชัน	14
รูปที่ 2.8	วงจรกำลังการจัดการการกักเก็บพลังงานโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่.....	14
รูปที่ 2.9	โหมดเริ่มเดินเครื่องของวงจรกำลังการจัดการการกักเก็บพลังงาน	15
รูปที่ 2.10	โหมดการขับเคลื่อนทั่วไปของวงจรกำลังการจัดการการกักเก็บพลังงาน	15
รูปที่ 2.11	แผนภาพแบบง่ายของ BUILDING BLOCKS ของระบบการจัดการแบตเตอรี่	16
รูปที่ 2.12	BATTERY MANAGEMENT SYSTEM	17
รูปที่ 2.13	วงจร BATTERY MANAGEMENT SYSTEM	17
รูปที่ 2.14	ภาพตัดปะ FET SCHEMATIC.....	18
รูปที่ 2.15	วงจรสมมูลบัคคอนเวอร์เตอร์	20
รูปที่ 2.16	วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงาน	21
รูปที่ 2.17	วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์เมื่อมอเตอร์ไม่ทำงาน.....	21
รูปที่ 3.1	วงจรกำลังระบบการจัดการการกักเก็บพลังงานโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่.....	23
รูปที่ 3.2	วงจรการจัดการการกักเก็บพลังงาน	23
รูปที่ 3.3	วงจรควบคุมและวัดในวงจรระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน	24
รูปที่ 3.4	แผนผังวงจรควบคุมและวัดในวงจรระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน	24
รูปที่ 3.5	วงจรสมมูลสัญญาณขับมอเตอร์ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	27
รูปที่ 3.6	วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์.....	28
รูปที่ 3.7	วงจรลดระดับแรงดันไฟฟ้าสำหรับการวัดและการแสดงผลในโปรแกรม LABVIEW.....	29
รูปที่ 3.8	ARDUINO UNO R3	30
รูปที่ 3.9	อุปกรณ์ที่ติดตั้งบน Front panel ของโปรแกรม LabVIEW	32

รูปที่ 3.10 ลายวงจรที่เขียนใน BLOCK DIAGRAM ของโปรแกรม LABVIEW.....	33
รูปที่ 3.11 ARDUINO NANO.....	34
รูปที่ 3.12 DHT11 Digital Temperature and Humidity Sensor.....	36
รูปที่ 3.13 ตำแหน่งการติดตั้ง TEMPERATURE SENSOR บนแบตเตอรี่.....	39
รูปที่ 3.14 ตำแหน่งการติดตั้ง TEMPERATURE SENSOR บนตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	40
รูปที่ 3.15 ตำแหน่งการติดตั้ง TEMPERATURE SENSOR บนอินเวอร์เตอร์.....	40
รูปที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 1	41
รูปที่ 4.2 กระแสไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 1.....	42
รูปที่ 4.3 กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 1	43
รูปที่ 4.4 กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 1	44
รูปที่ 4.5 กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 1	45
รูปที่ 4.6 แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 2	46
รูปที่ 4.7 กระแสไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 2.....	47
รูปที่ 4.8 กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 2.....	48
รูปที่ 4.9 กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 2	49
รูปที่ 4.10 กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 2.....	50
รูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 3.....	51
รูปที่ 4.12 กระแสไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 3	52
รูปที่ 4.13 กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 3.....	53
รูปที่ 4.14 กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 3	54
รูปที่ 4.15 กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 3.....	55
รูปที่ 4.16 อุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์ในการทดลองที่ 2.....	56
รูปที่ 4.17 อุณหภูมิของแบตเตอรี่ในการทดลองที่ 2.....	56
รูปที่ 4.18 อุณหภูมิของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองที่ 2.....	57
รูปที่ 4.19 อุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์ในการทดลองที่ 3	58
รูปที่ 4.20 อุณหภูมิของแบตเตอรี่ในการทดลองที่ 3.....	59
รูปที่ 4.21 อุณหภูมิของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองที่ 3.....	60

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 ตารางการดำเนินงาน	5
ตารางที่ 3.1 วงจรการต่อและลักษณะของแบตเตอรี่	25
ตารางที่ 3.2 วงจรและลักษณะของตัวเก็บประจุยิ่งยวด	26
ตารางที่ 3.3 คุณลักษณะของ ARDUINO UNO R3	30
ตารางที่ 3.4 อุปกรณ์ใน BLOCK DIAGRAM ของโปรแกรม LABVIEW	31
ตารางที่ 3.5 อุปกรณ์ที่กดขวาเพิ่มจาก BLOCK DIAGRAM ของ ฟังก์ชันโปรแกรม LABVIEW	31
ตารางที่ 3.6 อุปกรณ์ที่กดขวาเพิ่มจาก FRONT PANEL โปรแกรม LABVIEW	31
ตารางที่ 3.7 คุณลักษณะของ ARDUINO NANO	34



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รศ. ร.อ. ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงินและดร. วิวัฒน์ เกตุวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณคุณมากร คิตติได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย เป็นอย่างดี

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ เปิดใช้เครื่องมือ ตลอดจนคุณกมลวรรณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิก ใบเสร็จของโครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การ สนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการ จัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

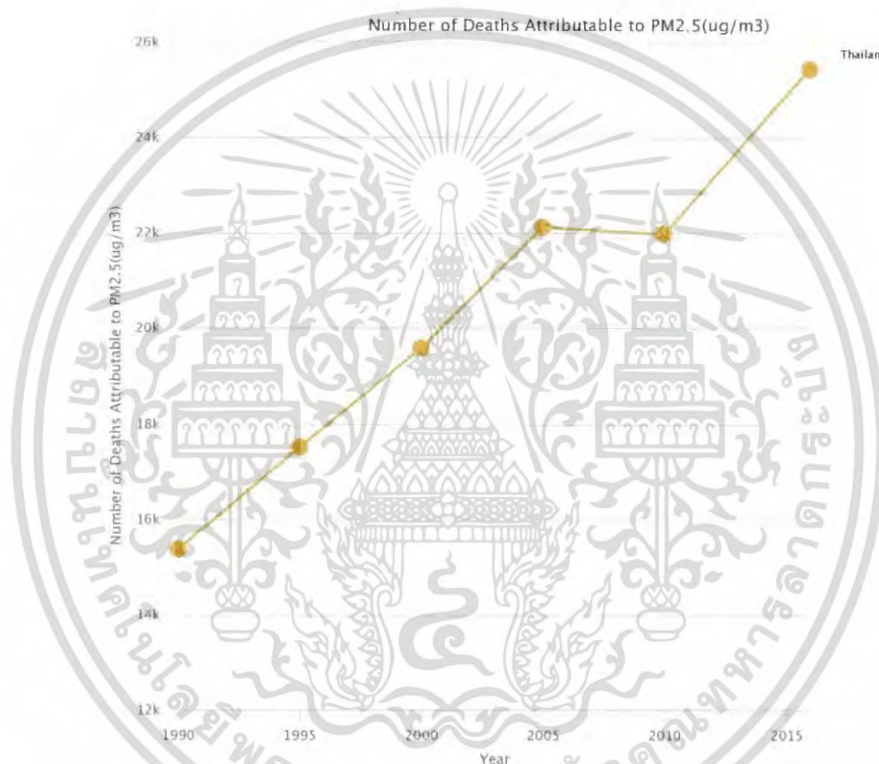
คณะผู้จัดทำ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาภาวะมลพิษทางอากาศของไทยจากการจราจรที่แออัดในประเทศ ทำให้ประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณริมถนนหรือในเมืองที่แออัดเสี่ยงต่อการเป็นโรคในระบบทางเดินหายใจ



รูปที่ 1.1 ข้อมูลการเสียชีวิตก่อนวัยอันเนื่องมาจากมลพิษทางอากาศจากฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมคอน

จากการศึกษาปัญหาหมอกควันทางอากาศจากฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมคอนในประเทศไทยพบว่า มีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นทุกปี โดยข้อมูลล่าสุดใน State of Global Air รายงานว่าปี 2561 ก่อเกิดการเสียชีวิตก่อนวัยอันควรเนื่องจากมลพิษทางอากาศ 25,432 คนดังรูปที่ 1.1 โดยฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมคอนหลักๆที่เป็นผลทำให้เกิดมลพิษทางอากาศประกอบด้วย ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ไนโตรเจนไดออกไซด์(NO₂) คาร์บอนมอนอกไซด์(CO) ก๊าซโอโซน(O₃) โดยปริมาณปล่อยมลพิษทางอากาศจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คมนาคมขนส่ง 50,240 คันต่อปี จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า หากเปลี่ยนรถเครื่องยนต์น้ำมันทั้งหมดเป็นรถไฟฟ้า จะช่วยลดปัญหาในการปล่อยมลพิษทางอากาศจากการคมนาคมได้ถึงปีละ 50,240 คัน ดังนั้นในอนาคต รถไฟฟ้าเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับชีวิตที่ดีของประชาชนชาวไทย แต่เทคโนโลยีของรถไฟฟ้าในปัจจุบันยังไม่เป็นที่เพียงพอต่อการสร้างรถไฟฟ้าที่มีศักยภาพสูง หนึ่งในปัญหานั้นคือเรื่องของกำลังในการจ่ายโหลดชั่วขณะ เนื่องด้วยแบตเตอรี่ปัจจุบันมีความสามารถที่จะทำงานในโหมดที่ใช้กำลังในการจ่ายโหลดชั่วขณะที่สูงได้แต่เกิดการดิ่งกระแสมากเป็นเหตุให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลงและจำเป็นต้องใช้ขนาดของแบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการกำลังในการจ่ายโหลดชั่วขณะ จากการศึกษาตัวเก็บประจุยิ่งยวดพบว่า มีความสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าชั่วขณะได้สูงและมีความจุพลังงานมากกว่าตัวเก็บประจุทั่วไป จึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาระบบการจัดการการกักเก็บพลังงานขึ้น

ระบบการจัดการการเก็บพลังงานไฟฟ้า(energy storage management system) ในที่นี้คือระบบการจัดการพลังงานตามโหมดการทำงานของมอเตอร์ โดยมุ่งเน้นไปที่การลดพลังงานในแบตเตอรี่ โดยในปริญญานิพนธ์นี้เราให้ความสนใจไปที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวด(supercapacitor)เป็นแหล่งเก็บพลังงานสำหรับกำลังไฟฟ้าชั่วขณะของรถไฟฟ้า และแหล่งพลังงานหลักเป็นแบตเตอรี่ เนื่องด้วยโหลดทางกลของรถไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติทนแรงจุด ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน(Li-ion battery) สามารถทำงานตามโหมดการทำงานของมอเตอร์นั้นได้และมีข้อดีในเรื่อง แรงดันไฟฟ้าคงที่ตอนการปลดปล่อยพลังงานจนกว่าพลังงานจะหมด อายุการใช้งานยาวนาน และมีความจุพลังงานที่มากกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ จึงเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับงานวิจัยนี้ แต่ในบางโหมดของรถยนต์แบตเตอรี่ไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านกำลังการจ่ายโหลด(power density) เช่น โหมดในการเริ่มเดินเครื่อง หรือการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างรวดเร็ว หากทำงานในโหมดเหล่านี้ก็จะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง ด้วยเหตุนี้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด(supercapacitor)จึงถูกนำมาใช้ร่วมกับแบตเตอรี่ เพื่อทำงานในโหมดดังกล่าว ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดมีกำลังการจ่ายโหลด(power density)ที่สูง เมื่อนำมาใช้ร่วมกับแบตเตอรี่จะช่วยชดเชยกำลังการจ่ายโหลด(power density)ที่ต่ำ โดยเราจะเรียกระบบที่ใช้แบตเตอรี่ร่วมกับตัวเก็บประจุยิ่งยวดว่า ระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน (Energy Storage Management System)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 ศึกษาหลักการทำงานของตัวเก็บประจุในวงจรการจัดการการกักเก็บพลังงาน
- 1.2.2 ออกแบบและประกอบสร้างวงจรการจัดการการกักเก็บพลังงาน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการจ่ายพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวด กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่
- 1.2.4 เพื่อศึกษาเสถียรภาพทางอุณหภูมิของระบบในรูปแบบของ อุณหภูมิแบตเตอรี่ อุณหภูมิตัวเก็บประจุยิ่งยวด อุณหภูมิอินเวอร์เตอร์

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

- 1.3.1 ทำวงจรการจัดการการกักเก็บพลังงาน(Energy Storage Management System)โดยใช้วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์และรีเลย์เป็นวงจรเชื่อมการทำงานของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด
- 1.3.2 ทำการขับมอเตอร์ด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด(supercapacitor)และแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน(Li-ion battery)โดยศึกษาวงจรระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน (Energy Storage Management System) 2 โหมดการทำงาน คือ โหมดเริ่มเดินเครื่องและโหมดการขับเคลื่อนทั่วไป
- 1.3.3 การทดลองเร่งความเร็วจาก 0 ถึงความเร็วสูงสุด(1200 rpm) โดยให้ตัวเก็บประจุทำงาน 1.5 วินาทีก่อนเปลี่ยนเป็นแบตเตอรี่ 24 วินาที
- 1.3.4 ศึกษาตัวแปรแรงดันไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวด กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ในการวิเคราะห์การทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด
- 1.3.5 ศึกษาเสถียรภาพทางอุณหภูมิของระบบในรูปแบบของ อุณหภูมิแบตเตอรี่ อุณหภูมิตัวเก็บประจุยิ่งยวด อุณหภูมิอินเวอร์เตอร์
- 1.3.6 แนวโน้มการเพิ่มของอุณหภูมิพิจารณาได้เฉพาะเพียงแค่การหมุน 4 ชั่วโมงเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

- 1.4.1 ออกแบบวงจรการจัดการการกักเก็บพลังงานที่ประกอบด้วย วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ วงจรลดระดับแรงดัน รีเลย์ Arduino UNO และ Arduino nano
- 1.4.2 ประกอบสร้างวงจรระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน
- 1.4.3 เขียน Code Arduino nano เพื่อควบคุมรีเลย์
- 1.4.4 เขียน Code LABVIEW เพื่อวัด แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่
- 1.4.5 ใช้โปรแกรม LABVIEW ในการแสดงผล แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่
- 1.4.6 ใช้ Temperature and Humidity sensor ต่อกับ Arduino nano เพื่อวัดอุณหภูมิ



1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 ตารางการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	เดือนที่							
	ส.ค. 60	ก.ย. 60	ต.ค. 60	พ.ย. 60	ธ.ค. 60	ม.ค. 61	ก.พ. 61	มี.ค. 61
ศึกษาและค้นคว้างานวิจัย เรื่อง -ตัวเก็บประจุยิ่งยวด -BMS -Buck converter -HESS	←--→							
ออกแบบและทำการจำลองวงจรระบบ การกักเก็บพลังงาน			←--→					
ทดสอบวงจรระบบการกักเก็บพลังงาน กับมอเตอร์						←--→		
วิเคราะห์ สรุป และเรียบเรียงผลการ ทดลอง						←--→		
สนทนางานวิจัย								←--→

←→ กำหนดการ

←--→ ดำเนินการเสร็จแล้ว

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.6.1 หลักการทำงานและกลไกการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด
- 1.6.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน (Li-ion battery)
- 1.6.3 หลักการทำงานของระบบการจัดการแบตเตอรี่(BMS)
- 1.6.4 โหมดการทำงานของระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน(ESMS)
- 1.6.5 ทักษะและกระบวนการทำวงจรระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน

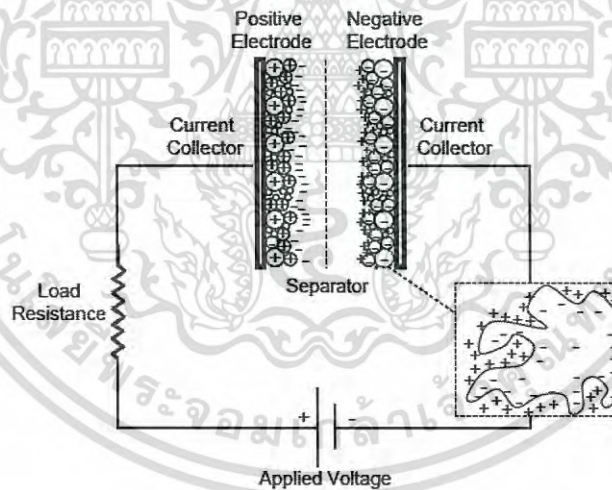
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด คือ อุปกรณ์กักเก็บพลังงานระยะสั้นชนิดหนึ่งซึ่งมีโครงสร้างส่วนหนึ่งคล้ายกับตัวเก็บประจุทั่วไปทำให้มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าบางอย่างคล้ายกัน เช่น มีโครงสร้างการเก็บพลังงานในรูปแบบไฟฟ้า แต่สิ่งที่ต่างกันคือในตัวเก็บประจุยิ่งยวดนี้ ไม่ได้มีกลไกเฉพาะการโพลาไรเซชันอย่างเดียว แต่ยังมีกลไกอื่นๆเข้ามาร่วมด้วยตามแต่ชนิดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด โครงสร้างโดยทั่วไปประกอบไปด้วย Current collector, Electrode, Electrolyte, และ Separator โดยในแต่ละส่วนจะมีหน้าที่ที่ต่างกัน Current collector คือส่วนที่ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อของกระแสเพื่อต่อขั้วไฟฟ้าที่เก็บพลังงานในระดับนาโนมารวมถึงกันได้ Electrode คือส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้าในการเก็บประจุไฟฟ้าเพื่อสะสมพลังงาน Electrolyte คือสารละลายที่สามารถแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้าได้เพื่อเกิดกระบวนการในการสะสมพลังงาน Separator คือแผ่นฉนวนที่มีรูพรุนเพื่อป้องกันไม่ให้ Electrode ทั้ง 2 ผังโดนกัน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการกักเก็บพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามกลไกการเก็บพลังงาน คือ 1. Electrochemical Double-Layer Capacitor (EDLC) 2. Pseudocapacitor 3. Hybridcapacitor

2.1.1 Electrochemical Double-Layer (EDLC)

Electrochemical Double-Layer (EDLC) เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานอย่างหนึ่งซึ่งเก็บและปลดปล่อยพลังงานที่โครงสร้างนาโนบริเวณผิวสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้า (electrode) และ Electrolyte

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่เก็บสะสมอยู่ใน EDLC แปรผกผันกับความหนาของชั้น EDLC ประกอบด้วยชั้นบวก และชั้นลบ มีค่ากำลังการจ่ายโหลด(power density)ที่สูงมากเมื่อเทียบกับตัวเก็บประจุทั่วไป โมเดล EDLC อย่างง่ายของแฮมโฮสและปรับแต่งโดยเกาต์และแซบแมน พิจารณาการกระจายตัวอย่างต่อเนื่องของไอออนอิเล็กโตรไลต์(electrolyte ions)ซึ่งก็คือไอออนบวก(cation)และไอออนลบ(Anion)ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์เคลื่อนที่ด้วยความร้อนอยู่ในชั้นของการแพร่(diffuse layer) อย่างไรก็ตามโมเดลของเกาต์-แซบแมนนำไปสู่การประมาณที่เกินจริงของ EDLC ค่าความจุของสองแนวประจุที่แยกจากกันแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างแนว ดังนั้นค่าความจุ(Capacitance)จะมีค่ามากหากประจุไอออนอยู่ติดกับพื้นผิวชั้นไฟฟ้า ต่อมา สะเทิน ได้รวมโมเดลแฮมโฮสและโมเดลเกาต์-แซบแมน เป็นพื้นที่การกระจายตัวของไอออนที่แสดงชัดเจนโดยพื้นที่ภายในเรียกว่าชั้นแน่น(compact layer)หรือชั้นสะเทิน(stern layer)และชั้นของการแพร่(diffuse layer)โครงสร้างที่อิเล็กโตรไลต์สองชั้นและสื่อกลางการดูดซับในขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นที่สารละลายในน้ำ ทว่และคณะแสดงรูปแบบทางคณิตศาสตร์ทั่วไปสำหรับจำลองตัวเก็บประจุยิ่งยวด EDLC ด้วยโครงสร้าง 3 มิติ ขอบเขตเงื่อนไขขั้วไฟฟ้าไปถูกกำหนดเพื่ออธิบายชั้นสะเทิน(stern layer)ในโดเมนการคำนวณ ขอบเขตเงื่อนไข อนุภาคขั้วไฟฟ้าหรือรูพรุนถูกแสดงด้วย ระนาบ ทรงกลม และ ทรงกระบอกของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีความซับซ้อนทางเรขาคณิตแบบละเอียดที่สุดสำหรับชั้นสะเทิน(stern layer)และชั้นการแพร่(diffuse layer)โมเดลที่แสดงที่อยู่ทั้งหมดไม่ใช่แค่โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของขั้วไฟฟ้าแต่ยังมีขนาดไอออนที่มีจำกัดและสนามที่ขึ้นอยู่กับค่า dielectric permittivity ของอิเล็กโตรไลต์

2.2 แบตเตอรี่(Battery)

แบตเตอรี่(battery) คือ อุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปปฏิกิริยาเคมี(reaction) โครงสร้างประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า(Electrode) และอิเล็กโตรไลต์(Electrolyte) เช่น ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่เมื่อบรรจุพลังงาน ปฏิกิริยารีดอกซ์จะเกิดขึ้นโดยลิเทียมไอออนที่อยู่ในผลึกของโลหะออกไซด์ เช่น โคบอลต์ ออกไซด์ เป็นต้น จะรับอิเล็กตรอนกลายเป็นโลหะลิเทียมในขั้วไฟฟ้าของกราไฟต์ เป็นต้น ในขณะที่การคายพลังงานจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือโลหะลิเทียมสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นลิเทียมไอออนกลับไปขั้วไฟฟ้าที่มีโลหะออกไซด์อยู่ ถึงแม้ว่าแบตเตอรี่จะสามารถสะสมพลังงานได้มากแต่ความสามารถในการจ่ายกำลังชั่วขณะยังค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้ใช้เวลาในการชาร์ตพลังงานช้า เพราะจลนศาสตร์ของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นยังค่อนข้างช้านอกจากนั้นแบตเตอรี่ยังมีเสถียรภาพต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติ ข้อดีและข้อเสียของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดกับแบตเตอรี่ พบว่ากลไกการเก็บพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดอาศัยการดูดซับเชิงฟิสิกส์ของอิเล็กโตรไลต์ ขณะที่แบตเตอรี่อาศัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ส่งผลให้แบตเตอรี่มีข้อจำกัดเรื่องความสามารถในการจ่ายโหลดชั่วขณะต่ำ หรือชาร์ต และดิสชาร์ตพลังงานต่ำ อีกทั้งในปัจจุบันวัสดุนาโนที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงได้ถูกนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้าของ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดส่งผลให้เก็บประจุไฟฟ้าเคมีได้สูงขึ้นแบตเตอรี่แบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

1. แบตเตอรี่แบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง หรือ แบตเตอรี่ชนิดปฐมภูมิ (primary batteries)
2. แบตเตอรี่แบบชาร์จไฟใหม่ได้ หรือ แบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ (rechargeable batteries)

แบตเตอรี่แบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง เมื่อปฏิกิริยาเคมีเกิดไปบ้างแล้ว (ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วบวกและปฏิกิริยา ออกซิเดชันที่ขั้วลบ) จะไม่สามารถเกิดย้อนกลับได้จึงใช้ได้เพียงครั้งเดียว ส่วนแบตเตอรี่ที่ชาร์จไฟใหม่ได้ ปฏิกิริยาเคมีสามารถเกิดไปข้างหน้า และย้อนกลับได้เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แบตเตอรี่ (ชาร์จแบตเตอรี่) จึงใช้ได้หลายครั้ง

2.2.1 ลิเทียม-ไอออนแบตเตอรี่

จุดเด่นของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนคือความจุพลังงานและกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าแบตเตอรี่ ทรูกลุณิกเกิดและกรดตะกั่ว นอกจากนี้ยังมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูง มีอัตราการสูญเสียประจุระหว่างไม่ใช้งาน (self-discharge rate) ที่ต่ำ ไม่มีปรากฏการณ์ความจำและมีความปลอดภัยสูงกว่าแบตเตอรี่ที่ใช้โลหะ ลิเทียมเป็นขั้ว

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

1. ขั้วลบ มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนที่มีรูพรุน (เช่น แกรไฟต์) เคลือบบนแผ่นทองแดง
2. ขั้วบวกเป็นลิเทียมเมทัลออกไซด์เคลือบบนแผ่นอะลูมิเนียม
3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ประกอบด้วยเกลือของลิเทียม เช่น LiPF_6

หรือ LiBF_4 ในตัวทำละลาย เช่นเอทิลีนคาร์บอนเนต (ethylene carbonate) ไดเอทิลคาร์บอนเนต (diethyl carbonate) และ/หรือ ไดเมทิลคาร์บอนเนต (dimethyl carbonate)

4. เยื่อเลือกผ่าน (separator) กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง ทำจากพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) และ/หรือพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE)

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีใช้ในปัจจุบันมี 6 ประเภทหลัก

ลิเทียม-ไอออนประเภทที่ 1 วัสดุที่ใช้ทำขั้วบวกเป็น Lithium Cobalt Oxide (LiCoO_2 , LCO) ขั้วลบเป็นแกรไฟต์ ออกแบบโดยเน้นความจุพลังงานเป็นหลัก ช่วงแรงดันไฟฟ้าการใช้งานอยู่ในช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5-4.2 โวลต์แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 3.6-3.7 โวลต์ ความจุพลังงานต่อน้ำหนักชนิด pouch มีค่า 250-450 Wh/kg ชนิด cylindrical มีค่า 175-240 Wh/kg อายุการใช้งานมากกว่า 500 รอบใช้งานใน โทรศัพท์มือถือ แท็บเล็ต แล็ปท็อป กล้องดิจิทัล

ลิเทียม-ไอออนประเภทที่ 2 วัสดุที่ใช้ทำขั้วบวกเป็น Lithium Manganese Oxide (LiMn_2O_4 , LMO) ขั้วลบเป็นแกรไฟต์ ออกแบบโดยเน้นกำลังไฟฟ้า ช่วงแรงดันไฟฟ้าการใช้งานอยู่ในช่วง 2.5-4.2 โวลต์แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 3.7-3.8 โวลต์ ความจุพลังงานต่อน้ำหนักมีค่า 100-150 Wh/kg อายุการใช้งานมากกว่า 500 รอบใช้งานใน เครื่องมือไฟฟ้า (Power tools) อุปกรณ์การแพทย์ ระบบส่งกำลังใน ยานพาหนะไฟฟ้า

ลิเทียม-ไอออนประเภทที่ 3 วัสดุที่ใช้ทำขั้วบวกเป็น Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide ($\text{Li}(\text{Ni},\text{Mn},\text{CO})\text{O}_2$, NMC, NCM) ขั้วลบเป็นแกรไฟต์ ออกแบบโดยเน้นความจุพลังงานและกำลังไฟฟ้า ช่วงแรงดันไฟฟ้าการใช้งานอยู่ในช่วง 2.5-4.2 โวลต์แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 3.6-3.7 โวลต์ ความจุพลังงานต่อน้ำหนักมีค่า 100-240 Wh/kg อายุการใช้งานมากกว่า 500 รอบใช้งานใน จักรยานไฟฟ้า อุปกรณ์การแพทย์ ระบบส่งกำลังในยานพาหนะไฟฟ้า (มักใช้ ในรถไฮบริด) ระบบสำรองไฟฟ้า

ลิเทียม-ไอออนประเภทที่ 4 วัสดุที่ใช้ทำขั้วบวกเป็น Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide ($\text{Li}(\text{Ni},\text{CO},\text{Al})\text{O}_2$, NCA) ขั้วลบเป็นแกรไฟต์ ออกแบบโดยเน้นความจุพลังงานเป็นหลัก ช่วงแรงดันไฟฟ้าการใช้งานอยู่ในช่วง 2.5-4.2 โวลต์แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 3.6-3.7 โวลต์ ความจุพลังงานต่อน้ำหนักชนิด pouch มีค่า 250-450 Wh/kg ชนิด cylindrical มีค่า 175-240 Wh/kg อายุการใช้งานมากกว่า 500 รอบใช้งานในอุปกรณ์การแพทย์ ระบบส่งกำลังใน ยานพาหนะไฟฟ้า (เช่นที่พบใน Tesla Model S) ระบบสำรองไฟฟ้า

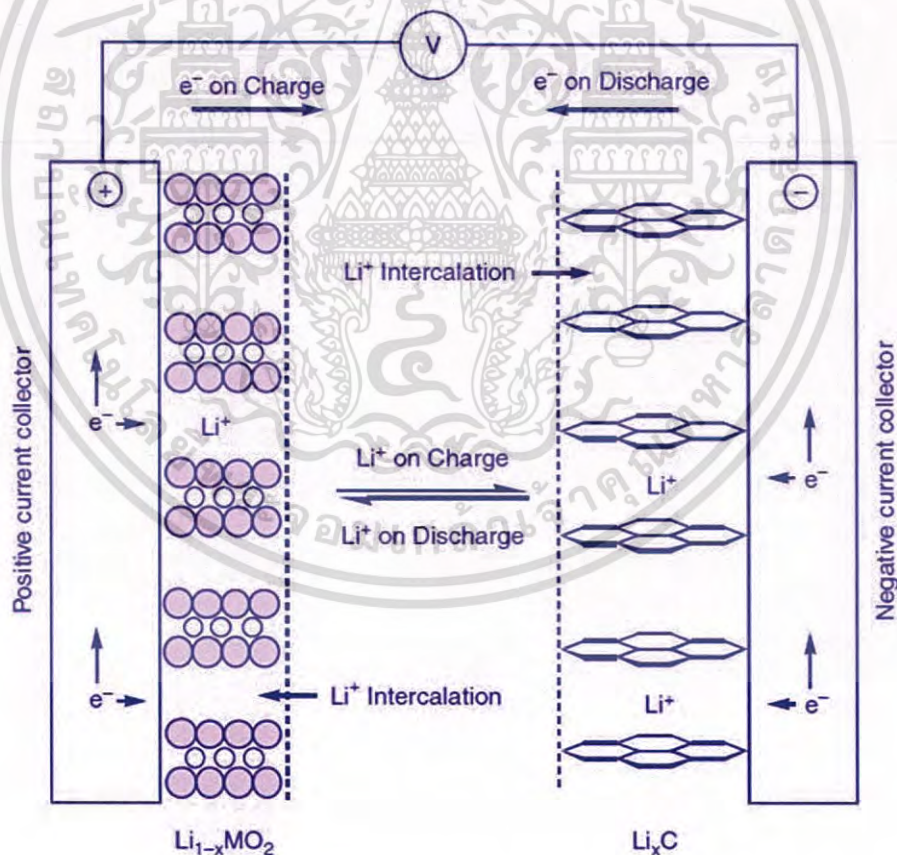
ลิเทียม-ไอออนประเภทที่ 5 วัสดุที่ใช้ทำขั้วบวกเป็น Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4 , LFP) ขั้วลบเป็นแกรไฟต์ ออกแบบโดยเน้นกำลังไฟฟ้าเป็นหลัก ช่วงแรงดันไฟฟ้าการใช้งานอยู่ในช่วง 2.0-3.6 โวลต์แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 3.3 โวลต์ ความจุพลังงานต่อน้ำหนักมีค่า 60-110 Wh/kg อายุการใช้งานมากกว่า 1000 รอบใช้งานในระบบส่งกำลังในยานพาหนะไฟฟ้า หรือแทนแบตเตอรี่รถตะกั่วใน รถยนต์ (Start-Lighting-Ignition battery) ระบบที่ต้องการกระแส และความทนทานสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิเทียม-ไอออนประเภทที่ 6 วัสดุที่ใช้ทำขั้วบวกเป็น แกรไฟต์ หรือ LMO ขั้วลบเป็น Lithium Titanate ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO) ออกแบบโดยเน้นจำนวนรอบการใช้งาน ช่วงแรงดันไฟฟ้าการใช้งาน อยู่ในช่วง 1.5-2.8 โวลต์แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 2.3 โวลต์ ความจุพลังงานต่อน้ำหนักมีค่า 70 Wh/kg อายุการใช้งานมากกว่า 4000 รอบใช้งานในระบบสำรองไฟฟ้า ระบบส่งกำลังไฟฟ้าใน ยานพาหนะไฟฟ้า (Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV)

2.2.2 ชาร์จและดิซชาร์จของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่

เมื่อมีการอัดประจุ (charge) ไอออนของลิเทียม จะเคลื่อนออกจากโครงสร้างของ ขั้วบวก ผ่านเยื่อ เลือกผ่าน เข้าสู่ขั้วลบ เกิดเป็นสารประกอบของลิเทียม และคาร์บอน และขณะเดียวกัน อิเล็กตรอนจะเคลื่อน จากขั้วบวกสู่ขั้วลบผ่านวงจรภายนอก และขณะ เกิดการคายประจุ (discharge) ปฏิกิริยาจะเกิดใน ทางตรงกันข้าม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 กระบวนการที่ ไอออนของลิเทียมสอดแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้าง ของวัสดุขั้วบวกหรือขั้วลบ เรียกว่า lithium intercalation หรือ lithium insertion



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่

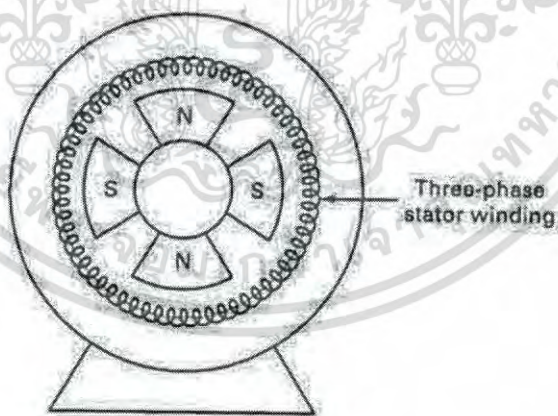
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 Brushless DC motor

มอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่าน (brushless dc motor) เป็นซิงโครนัสมอเตอร์ชนิดหนึ่งซึ่งกระแสอาร์มาเจอร์ในสเตเตอร์ถูกควบคุม โดยวงจรมอสเฟส 6 สเต็ปในลักษณะที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วที่กำหนดในมอเตอร์กระแสตรงมาตรฐานใช้แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ ทำให้แกนแม่เหล็กของฟลักซ์สนามและของฟลักซ์อาร์มาเจอร์ทำมุม 90° องศาไฟฟ้าในสเปซ ทำให้ฟลักซ์มีค่าคงที่จึงทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดที่ ความเร็วกำหนด

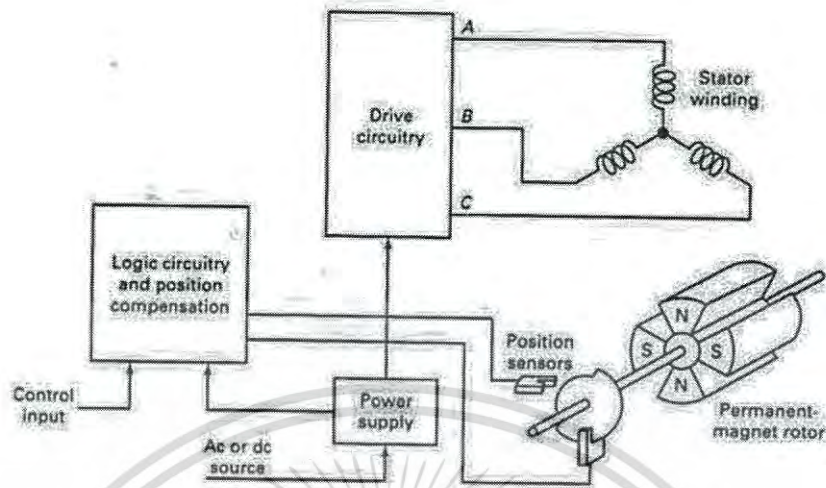
2.3.1 โครงสร้างของ Brushless DC motor

จากรูปที่ 4 เป็นระบบการควบคุมมอเตอร์ ดี.ซี.แบบไร้แปรงถ่านชนิด 3 เฟส ซึ่งประกอบด้วยที่สเตเตอร์มีขดลวดอาร์มาเจอร์จำนวน 3 ชุด โดยได้รับการกระตุ้นจากวงจรขับเคลื่อนอิเล็กทรอนิกส์และมีสัญญาณตรวจจับตำแหน่งอยู่ที่เพลา ซึ่งโครงสร้างของมอเตอร์ ดี.ซี.แบบไร้แปรงถ่านมีลักษณะคล้ายกันกับของมอเตอร์ซิงโครนัส จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์จะถูกกำหนดตามจำนวนขั้วของแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์ คุณลักษณะของแรงบิดและความเร็วรอบที่ได้ เกิดจากการควบคุมขนาดกระแสของขดลวดอาร์มาเจอร์และเวลาในการสวิตช์ของชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้จะให้ความเร็วรอบที่คงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง สังเกตได้จากกราฟรูปที่ 2.5

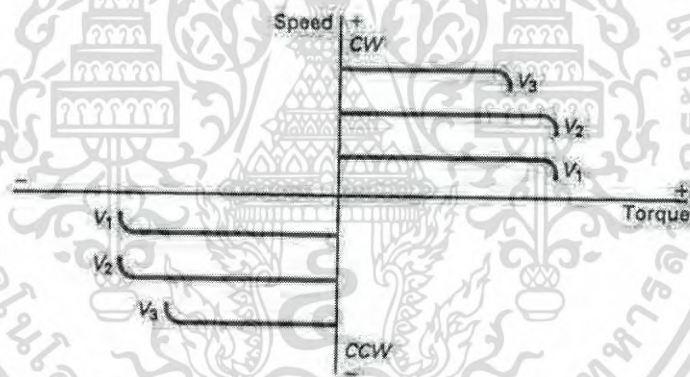


รูปที่ 2.3 โครงสร้างมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 วงจรควบคุมการขับเคลื่อน



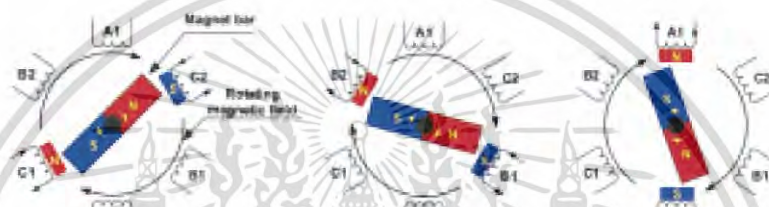
รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ

2.3.2 การทำงานของ Brushless DC motor

โดยทฤษฎีแล้วในเครื่องจักรกลกระแสตรง ตำแหน่งของขดลวดสนามและของขดลวดอาร์มาเจอร์อาจจะกลับกันได้กล่าวคือขดลวดสนามอยู่บนโรเตอร์และขดลวดอาร์มาเจอร์อยู่บนสเตเตอร์ก็ได้ อย่างไรก็ตามมอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่านจะใช้ตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์ (rotor position sensor) และอินเวอร์เตอร์ในการควบคุมกระแสในขดลวดสเตเตอร์ ดังนั้น ตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์และสวิตช์โซลิตสเตต กำลังในอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เหมือนกับแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ ทางกลของมอเตอร์กระแสตรง มาตรฐานความเร็วของสนามแม่เหล็กของ สเตเตอร์จะเท่ากับความเร็วของโรเตอร์ตลอดเวลา (synchronism) เนื่องจากความถี่ของการ ตัด-ต่อของ สวิตช์โซลิตสเตตกำลังถูกควบคุมให้เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

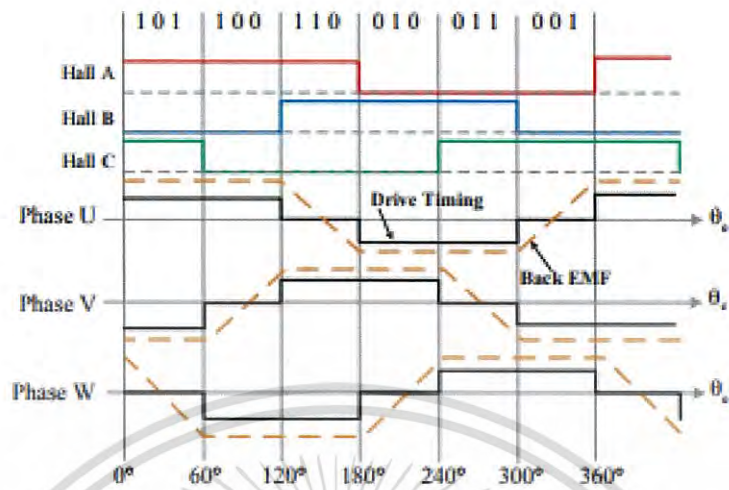
ความเร็วของโรเตอร์โดยอัตโนมัติเพราะว่ารับสัญญาณจากตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์ การทำงานของมอเตอร์จะอาศัยพื้นฐานของแรงดูด (attraction) และแรงผลัก (repulsion) ระหว่างขั้วแม่เหล็กที่อาศัยหลักการเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับซิงโครนัสที่มี ตัวหมุนเป็นแม่เหล็กถาวรดังรูปที่ 2.6 โดยมีขั้นตอนการเริ่มหมุน เมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดชุดที่หนึ่งของชุดขดลวดที่สเตเตอร์ ทั้งสาม และสร้างขั้วแม่เหล็กนั้นเป็นแรงดูดให้สนามแม่เหล็ก ครอบรอบของขั้วที่ต่างกัน โรเตอร์จะเคลื่อนที่ไปถ้ากระแสเลื่อน ไปที่ขดลวดที่ติดกัน เกิดลำดับการเปลี่ยนแปลงแต่ละชุด ขดลวดทำให้โรเตอร์ติดตามการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กหมุน



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของมอเตอร์

2.3.3 การขับ Brushless DC motor

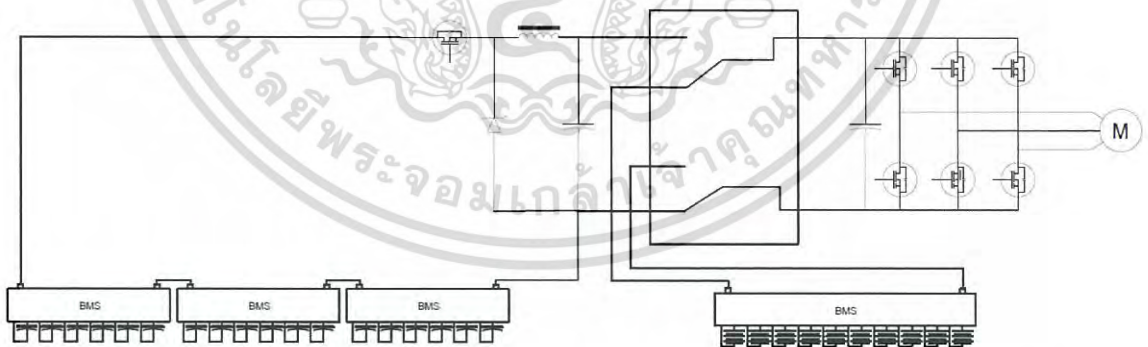
โดยการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรง ถ่านจะอาศัยการทำงานครึ่งละสองเฟส ผลลัพธ์คือจะทำให้ เกิดแรงบิดมาก ด้วยเหตุที่เฟสที่สามหยุดทำงานซึ่งเป็นข้อดี ของระบบขับเคลื่อนทางกลที่ต้องการแรงบิดมาก สำหรับการ ควบคุมการทำงานแบบสองเฟสจะใช้หลักการนำพลังงาน ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นให้สอดคล้องกับตำแหน่งของตัวโรเตอร์ โดยใช้ตัวตรวจจับสัญญาณด้วยตัวตรวจจับฮอลล์ทั้งสามตำแหน่งที่ ติดตั้งที่สเตอร์ โดยสัญญาณจากตัวตรวจจับตำแหน่งจะถูกนำมาสร้างตัวเลขนสามหลักที่มีการเปลี่ยนแปลงทุกๆ 60 องศา ทางไฟฟ้า โดยสัญญาณจากตัวตรวจจับฮอลล์นี้จะถูกนำไปกำหนดจังหวะเวลาการขับ (drive timing) ของสวิตซ์กำลัง และขณะมอเตอร์หมุนจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back electromotive forces) โดยสัญญาณแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพการคอมมิวเตชัน

2.4 Energy Storage Management System

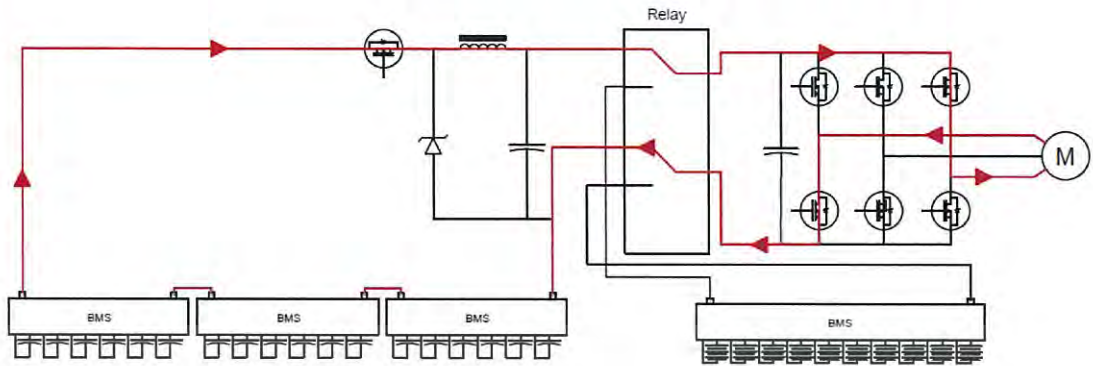
วงจรการจัดการการกักเก็บพลังงาน คือวงจรที่ใช้ในการเลือกแหล่งจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ตามโหมดการทำงานของมอเตอร์ โดยแหล่งจ่ายพลังงานที่ใช้ในปฏิญานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย ลิเทียม-ไอออน แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ในการศึกษาเลือกโหมดการทำงาน 2 โหมดได้แก่ 1. โหมดเริ่มเดินเครื่อง 2. โหมดการขับเคลื่อนทั่วไป



รูปที่ 2.8 วงจรกำลังการจัดการการกักเก็บพลังงานโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่

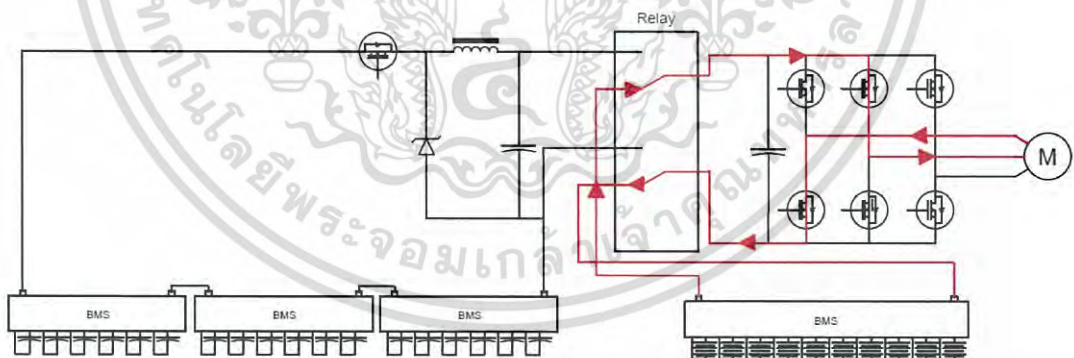
ในโหมดเริ่มเดินเครื่องนั้น ตัวเก็บประจุเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชั่วขณะให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้า ผ่านวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์โดยรูปแบบการไหลของพลังงานตามรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 โหมดเริ่มเดินเครื่องของวงจรกำลังการจัดการการกักเก็บพลังงาน

ในโหมดเริ่มเดินเครื่องรีเลย์จะเลือกตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ในโหมดนี้พลังงานจะถูกดึงออกจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดซึ่งตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดออกมาในการเริ่มปล่อยพลังงานเริ่มแรกให้แก่มอเตอร์ทำให้มอเตอร์สามารถที่จะดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดอย่างทันทีทันใดจากระบบได้ ไม่จำเป็นต้องมีการค่อยๆจ่ายพลังงานงานให้เพื่อลดค่ายอดกำลังไฟฟ้าของระบบเหมือนในเครื่องจักรไฟฟ้าในอุตสาหกรรม ซึ่งกำลังไฟฟ้าชั่วขณะนี้จะสูงมากเมื่อความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดสูง ต่อมาเมื่อความเร็วของมอเตอร์คงที่ กระแสที่มอเตอร์ต้องการจะคงที่ซึ่งในโหมดนี้เรื่องการขับเคลื่อนทั่วไป รีเลย์จะเลือกแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์ตามรูปที่ 2.10



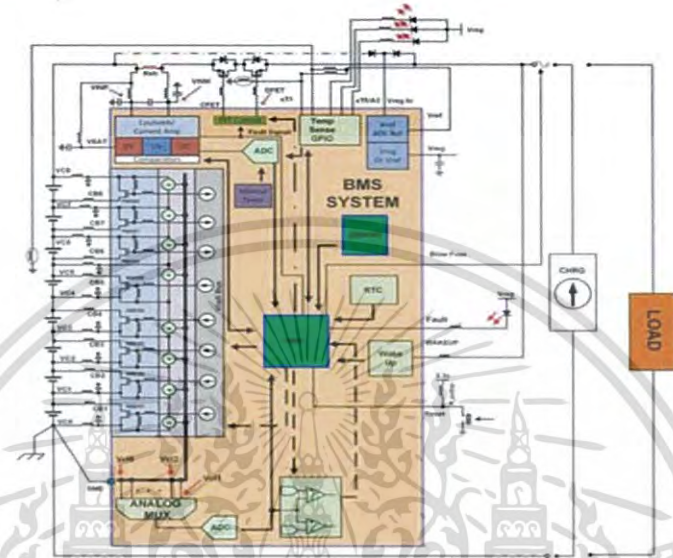
รูปที่ 2.10 โหมดการขับเคลื่อนทั่วไปของวงจรกำลังการจัดการการกักเก็บพลังงาน

2.5 Battery Management System

ระบบการจัดการแบตเตอรี่สามารถประกอบไปด้วยชุดควบคุมที่หลากหลาย ได้แก่ : เครื่องวัด FETs, เครื่องตรวจวัดเชื้อเพลิง, เครื่องตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า, ความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าของเซลล์, นาฬิกาแบบเรียลไทม์ (RTC), จอภาพอุณหภูมิและเครื่องควบคุมสถานะ มี ICs การจัดการแบตเตอรี่หลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

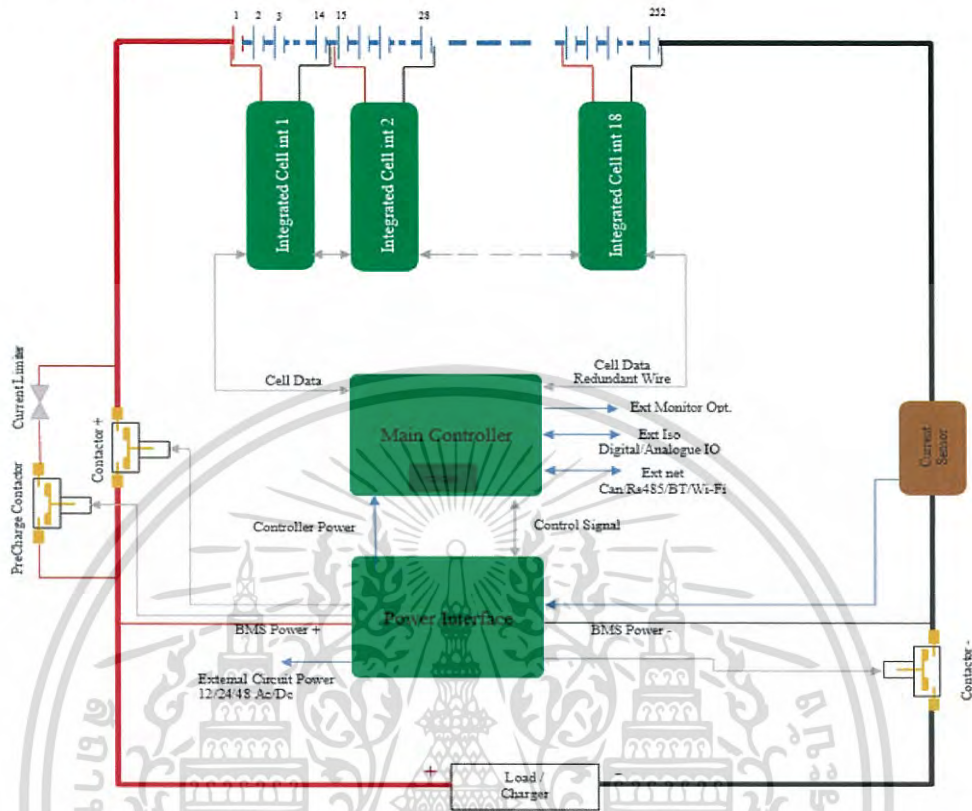
ประเภท การจัดกลุ่มบล็อกการทำงานแตกต่างกันออกไปจากส่วนหน้าแบบอะนาล็อกที่เรียบง่ายซึ่งให้การ
ถ่วงดุลและการตรวจสอบและต้องใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เซอร์ (MCU) เป็นโซลูชันแบบสแตนด์อโนแบบ
บูรณาการที่ทำงานโดยอัตโนมัติ



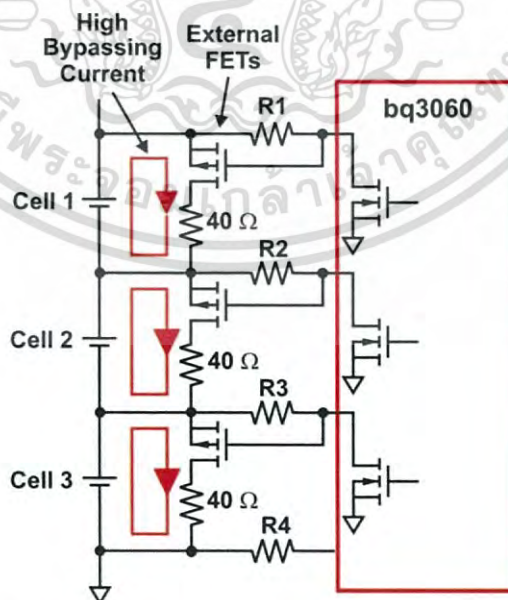
รูปที่ 2.11 แผนภาพแบบง่ายของ BUILDING BLOCKS ของระบบการจัดการแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 วงจร Battery Management System



รูปที่ 2.12 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM



รูปที่ 2.13 วงจร BATTERY MANAGEMENT SYSTEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไปสู่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของอุปกรณ์ชาร์จ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ CHMON ถูกเปิดใช้งานเพื่อให้อุปกรณ์ BMS ทราบว่ามีที่ชาร์จอยู่ การเชื่อมต่อโหนดถูกกำหนดโดยการฉีดกระแสเข้าสู่โหนดเพื่อกำหนดว่าโหนดมีอยู่หรือไม่ หากแรงดันไฟฟ้าที่ขาไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อกระแสไฟฟ้าถูกฉีดเข้าไปผลลัพธ์จะพิจารณาว่ามีโหนดอยู่หรือไม่ DFET ของไดรเวอร์ FET จะเปิดขึ้น รูปแบบการเชื่อมต่อสำหรับรูปที่ 14B ช่วยให้ออนบอร์ดเตอรีทำงานขณะชาร์จ

ไดรเวอร์ FET สามารถออกแบบมาเพื่อเชื่อมต่อกับด้านสูงหรือด้านต่ำของก้อนแบตเตอรี่ การเชื่อมต่อแบบไฮไซด์จำเป็นต้องมีไดรเวอร์ของเครื่องชาร์จประจุเพื่อเปิดใช้งาน NFS NMOS การใช้ไดรเวอร์ด้านสูงช่วยให้สามารถใช้งานได้กับพื้นผิวที่เป็นของแข็งสำหรับส่วนที่เหลือนองวงจร การเชื่อมต่อไดรเวอร์ FET แบบ low-side มีอยู่ในโซลูชันแบบครบวงจร 3 Intersil เพื่อลดต้นทุนเนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องชาร์จประจุไฟฟ้า การเชื่อมต่อแบบ low-side ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงซึ่งใช้พื้นที่ตายตัวขนาดใหญ่ การใช้เครื่องตัดแบบ FET ด้านต่ำจะทำให้การต่อสายดินของชุดแบตเตอรี่เป็นไปได้ทำให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดเสียงรบกวนจากการฉีดเข้าไปในการวัดซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของ IC บางตัว

2.5.3 การวัดของ Battery Management System

แท้จริงแล้วการทำงานของแท่งเชื้อเพลิงจะตรวจสอบการชาร์จเข้าและออกจากชุดแบตเตอรี่ การชาร์จเป็นผลของกระแสและเวลา มีเทคนิคหลายอย่างที่สามารถใช้เมื่อออกแบบมาตรวัดน้ำมันเชื้อเพลิง เครื่องขยายความรู้สึกในปัจจุบันและ MCU ที่มี ADC แบบรวมความละเอียดต่ำเป็นหนึ่งในวิธีการวัดกระแสไฟฟ้า เครื่องขยายความรู้สึกในปัจจุบันทำงานในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงและขยายสัญญาณทำให้สามารถวัดความละเอียดได้สูงขึ้น เทคนิคการออกแบบนี้เสียสละพลัง พิสัย, เทคนิคอื่น ๆ คือการใช้ ADC ความละเอียดสูงหรือซื้อ IC เชื้อเพลิงที่มีราคาแพง การทำความเข้าใจพฤติกรรมของโหนดในแง่ของการบริโภคในปัจจุบันเมื่อเทียบกับเวลาจะเป็นตัวกำหนดชนิดของการออกแบบมาตรวัดเชื้อเพลิงที่ดีที่สุด

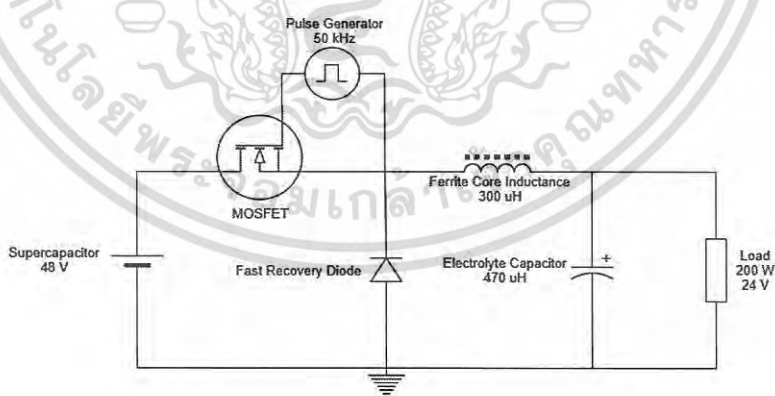
โซลูชันที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุดคือการวัดแรงดันไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานความรู้สึกโดยใช้ ADC ขนาด 16 บิตหรือสูงกว่าโดยมีการให้คะแนนโหนดออฟเซตต่ำและโหนดทั่วไปสูง ADC ความละเอียดสูงมีช่วงไดนามิกขนาดใหญ่ที่ค่าใช้จ่ายของความเร็ว หากแบตเตอรี่เชื่อมต่อกับโหนดที่ผิดปกติเช่นรถไฟฟ้า ADC ซ้ำอาจจะมีระดับความรุนแรงสูงและมีกระแสไฟฟ้าในควมถี่สูงที่ส่งมอบให้กับโหนดสำหรับการโหนดที่ผิดพลาด SAR ADC อาจมีส่วนขยายของเครื่องขยายเสียงในปัจจุบันที่น่าสนใจกว่านี้ ชดเชยใด ๆ ข้อผิดพลาดส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาดโดยรวมในการชาร์จแบตเตอรี่ ข้อผิดพลาดในการวัดเมื่อ

เวลาผ่านไปจะทำให้ข้อผิดพลาดสถานะการชาร์จแบตเตอรี่อย่างมีนัยสำคัญ การวัดค่าชดเชย $50 \mu\text{V}$ หรือน้อยกว่าที่มีความละเอียด 16 บิตเพียงพอสำหรับการวัดค่า

ด้วยเครื่องวัดค่าปัจจุบันมีเครื่องเปรียบเทียบแบบอนาล็อกตรวจสอบการลัดวงจรและสภาวะการณ์ปัจจุบัน สัญญาณเปรียบเทียบแบบอนาล็อกจะเชื่อมต่อโดยตรงกับไดรเวอร์ FET เพื่อลดความหน่วงระหว่างเหตุการณ์และแยกแบตเตอรี่ออกจากโหลดหรือเครื่องชาร์จ เวลาแฝงของไมโครวินาทีหลายสิบวินาทีที่มีเพียงพอสำหรับแอปพลิเคชันส่วนใหญ่และในแอปพลิเคชันส่วนใหญ่จะทำให้เวลาในการถอดแบตเตอรี่ดีขึ้น

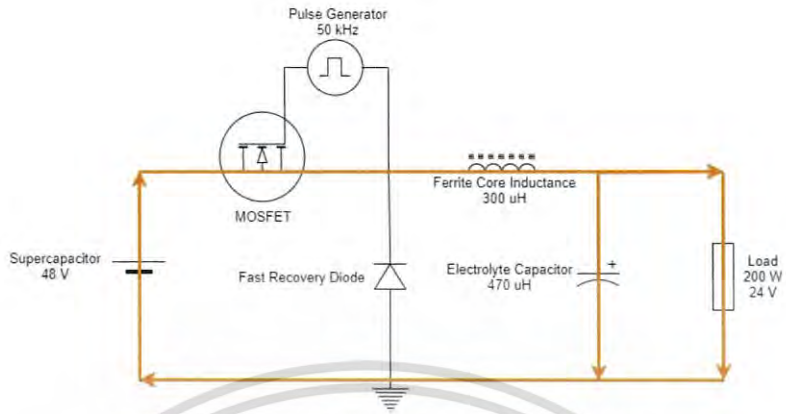
2.6 บัคคอนเวอร์เตอร์(Buck converter)

วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์(Buck converter)เป็นวงจรที่ใช้เพื่อลดแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลงเพื่อเหมาะสมกับการใช้งาน โครงสร้างของวงจรจะประกอบด้วย สวิตช์ที่สามารถสั่งให้ “ON” หรือ “OFF” ได้ทุกขณะตามที่เราต้องการในทางปฏิบัติสวิตช์ที่ใช้ในวงจรจริงคืออุปกรณ์ สวิตช์ซึ่งเช่น IGBT, MOSFET, ฯลฯ นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อีกคือ Capacitor, Inductance และ Diode ส่วนการทำงานของ Capacitor และ Inductance นั้นจะรับสัญญาณเป็นแบบต่อเนื่อง แต่สำหรับ Diode นั้นจะรับสัญญาณเป็นแบบไม่ต่อเนื่องเมื่อวงจรประกอบด้วยสวิตช์ที่มีการ “ON” หรือ “OFF” เกิดขึ้นจะต้องทำการแยก วงจรออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่ ON และ OFF เนื่องจากวงจรแตกต่างกัน

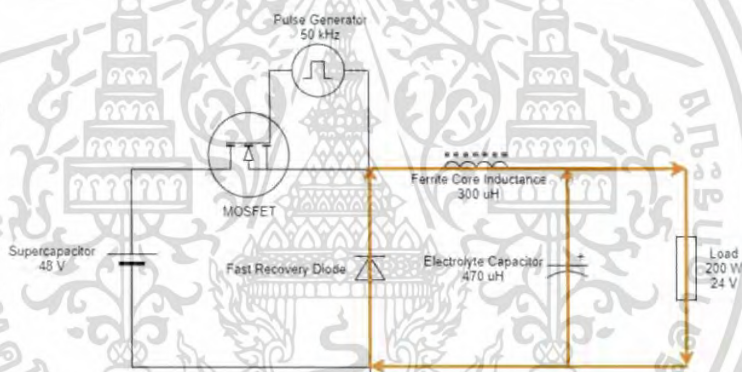


รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลบัคคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์เมื่อมอสเฟสทำงาน



รูปที่ 2.17 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์เมื่อมอสเฟสไม่ทำงาน

หลักการทํางาน

การทํางานของบัคคอนเวอร์เตอร์แบ่งเป็น 2 ช่วงเวลาคือ ขณะสวิตช์นำกระแส และขณะสวิตช์หยุดนำกระแส

ขณะสวิตช์นำกระแส กระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายผ่านสวิตช์ผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยที่กระแสส่วนหนึ่ง จะไหลผ่านตัวเก็บประจุซึ่งจะได้สมการที่สำคัญดังนี้

$$V_L = V_{in} - V_o - V_{MOSFET} \tag{2.1}$$

$$\Delta i_{L,on} = \left(\frac{V_{in} - V_o - V_{MOSFET}}{L} \right) \cdot DT \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะสวิตช์หยุดนำกระแส เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส ไดโอดจะได้รับ Forward bias กระแสด้านขาออกสามารถไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะได้สมการที่สำคัญดังนี้

$$V_L = -V_o - V_{\text{diode}} \quad (2.3)$$

$$\Delta i_{L,\text{off}} = \frac{-V_o - V_{\text{diode}}}{L} \cdot (1 - D)T \quad (2.4)$$

เนื่องจากในขณะสภาวะคงตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์ นำกระแส และขณะสวิตช์หยุดนำกระแส จะสมดุลกัน ซึ่งทำให้ได้สมการ อัตราขยายแรงดันของวงจรดังนี้

$$D = \frac{V_o - V_{\text{diode}}}{V_{\text{in}} - V_{\text{mosfet}} - 2V_{\text{diode}}} \quad (2.5)$$



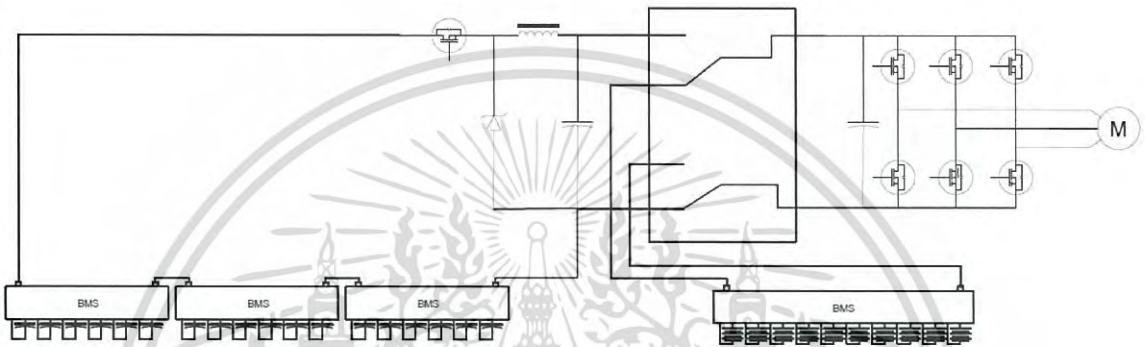
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ออกแบบการทดลอง

3.1 การออกแบบโครงสร้างของระบบ

ในปฏิยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์ 2 โหมดการทำงาน คือ โหมดเริ่มเดินเครื่อง และ โหมดการขับเคลื่อนทั่วไป โดยรูปแบบของวงจรแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรกำลังระบบการจัดการการกักเก็บพลังงานโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่

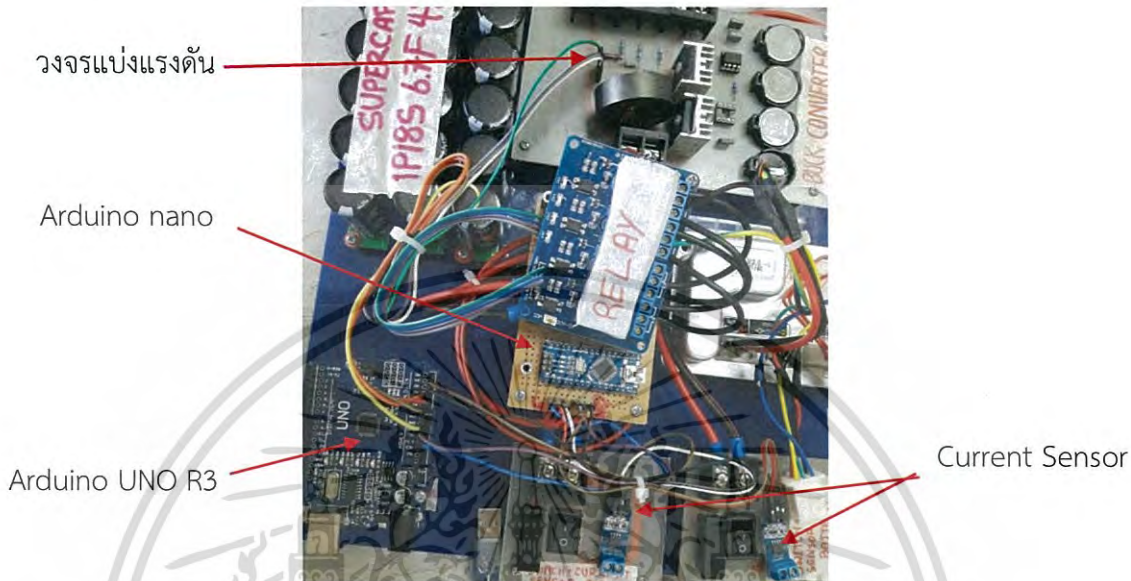
ในวงจรกำลังประกอบด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบตเตอรี่ วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ รีเลย์ และอินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 3.2



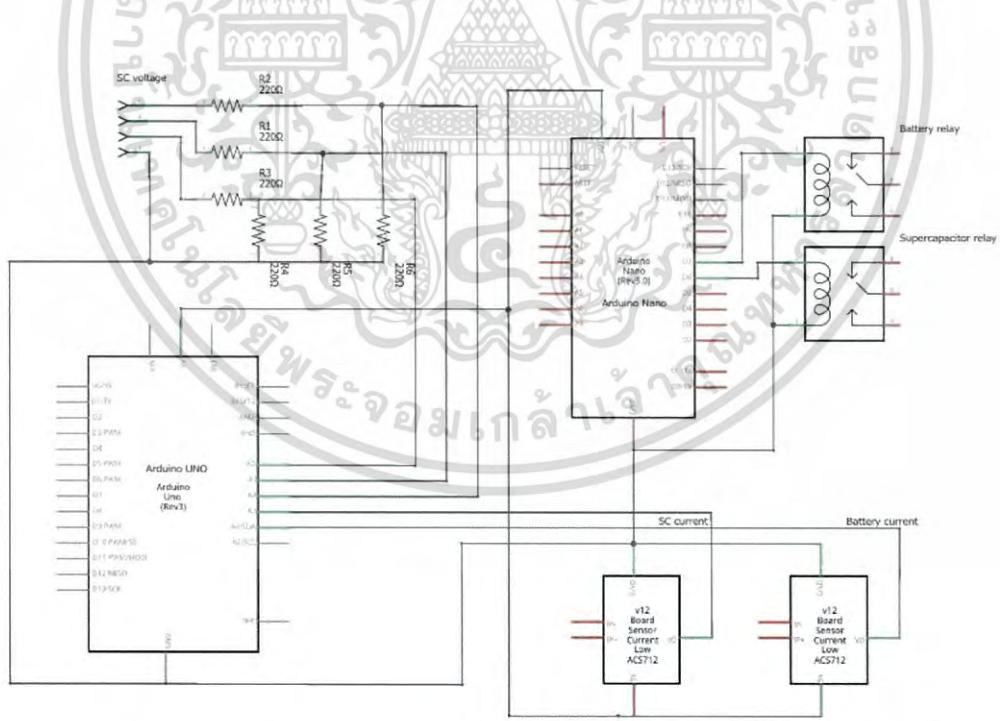
รูปที่ 3.2 วงจรการจัดการการกักเก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.2 นั้นมีวงจรควบคุมและวงจรวัดที่ประกอบด้วย วงจรลดระดับ Arduino UNO R3 Arduino nano current sensor แสดงในรูป 3.3 และมีแผนผังวงจรแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 วงจรควบคุมและวัดในวงจรระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 3.4 แผนผังวงจรควบคุมและวัดในวงจรระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 หลักการออกแบบวงจร

3.2.1 วงจรและลักษณะของแบตเตอรี่ในการทดลอง

แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน มีพิกัดดังตารางที่ 3.1 ซึ่งใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์ในโหมดการทำงานการขับเคลื่อนทั่วไป การต่อแบตเตอรี่ จะต่อแบบอนุกรม 10 ชุดใน 1 ชุดจะมีการต่อขนาด 3 ชุดเพื่อเพิ่มความจุให้กับแบตเตอรี่ และในแต่ละชุดจะต่อเข้ากับชุด BMS เพื่อป้องกันกรณีการทำงานของแบตเตอรี่เกินย่านความปลอดภัย

ตารางที่ 3.1 วงจรการต่อและลักษณะของแบตเตอรี่

		ลักษณะของแบตเตอรี่	
		ชนิด	ลิเทียม-ไอออน
	แรงดันที่ขั้วต่อเซลล์		3.75 V
	ความจุต่อเซลล์		3200 mAh
	น้ำหนักต่อเซลล์		50 กรัม
	จ่ายกระแสได้สูงสุด		6400 mAh
	รูปแบบการต่อ		10S3P
	ความจุ		9600 mAh
	ความจุพลังงาน		360 Wh
	ระบบป้องกัน		BMS
	น้ำหนักโดยรวม		450 กรัม
	ราคาต่อเซลล์		180 บาท
	ราคาแบตเตอรี่ทั้งหมด		5400 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 วงจรและลักษณะของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลอง

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิด EDLC ซึ่งมีพิกัดดังตารางที่ 3.2 ซึ่งใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานชั่วคราวให้แก่มอเตอร์ในโหมดการเริ่มเดินเครื่อง การต่อตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะต่อแบบอนุกรม 18 ชุดใน 1 ชุดจะมีการต่อขนาด 1 ชุดเพื่อเพิ่มระดับแรงดันให้กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด และในแต่ละชุดจะต่อเข้ากับชุด BMS เพื่อป้องกันกรณีการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเกินย่านความปลอดภัย

ตารางที่ 3.2 วงจรและลักษณะของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

		ลักษณะของตัวเก็บประจุยิ่งยวด	
		ชนิด	EDLC
		แรงดันที่ขั้วต่อเซลล์	2.7 V
		แรงดันที่ขั้ว	48 V
		ค่าความเหนี่ยวนำต่อเซลล์	120 F
		ค่าความเหนี่ยวนำ	6.7 F
		ESR, 1kHz	10 mΩ
		จ่ายกระแสต่อเนื่องได้สูงสุด	6.4 A
		จ่ายกระแสค่ายอดสูงสุด	67.5 A
		รูปแบบการต่อ	18S1P
		ความจุพลังงาน	2.13 Wh
		Life Cycle	500,000 cycle
		อายุการใช้งาน	10 ปี
		ระบบป้องกัน	BMS
		น้ำหนักโดยรวม	378 กรัม
		ราคาต่อเซลล์	180 บาท
		ราคาตัวเก็บประจุยิ่งยวดทั้งหมด	3,240 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

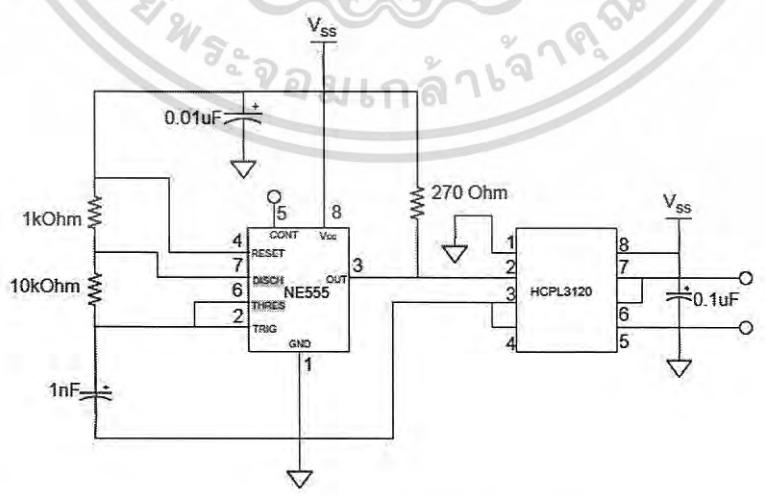
วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบการจัดการการกักเก็บพลังงานที่อยู่ในปริมาณที่น้อยนี้ได้ออกแบบเป็น 3 ส่วน คือ 1. วงจรสำหรับสร้างสัญญาณซิงโครสเฟสของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ 2. วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ 3. วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าก่อนเข้าวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์เพื่อวัดระดับแรงดันไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวด

3.2.3.1 วงจรสำหรับสร้างสัญญาณซิงโครสเฟสของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

อุปกรณ์ที่ใช้

1. ตัวต้านทาน	0.25 W, 10 kΩ	1	ตัว
2. ตัวต้านทาน	0.25 W, 1 kΩ	1	ตัว
3. ตัวต้านทาน	0.25 W, 270 Ω	1	ตัว
4. ตัวเก็บประจุ(Electrolyte)	0.01 uF	1	ตัว
5. ตัวเก็บประจุ(Electrolyte)	1 nF	1	ตัว
6. ตัวเก็บประจุ(Electrolyte)	0.1 uF	1	ตัว
7. IC NE555		1	ตัว
8. IC HCPL 3120		1	ตัว
9. ถ่านกระดุม 3V		4	เม็ด

วงจรสมมูล



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลสัญญาณซิงโครสเฟสของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

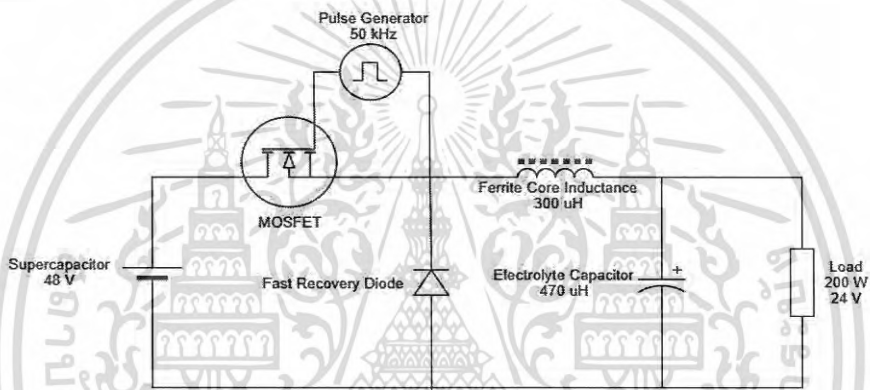
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.2 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

อุปกรณ์ที่ใช้

1. ตัวเหนี่ยวนำ(ferrite core)	300uH	1	ตัว
2. มอสเฟส IRFP064N		1	ตัว
3. ตัวเก็บประจุ(Electrolyte)	470 uF	1	ตัว
4. ไดโอด ISL9R3060G2		1	ตัว

วงจรสมมูล



รูปที่ 3.6 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

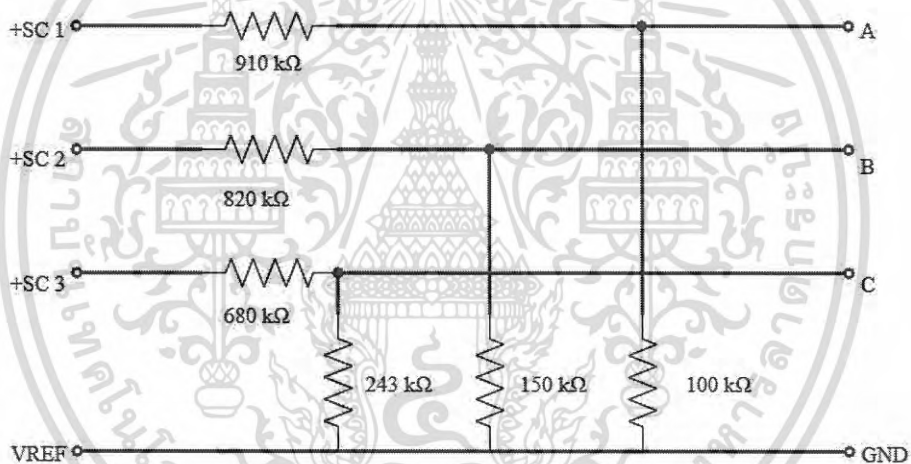
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.3 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ใช้

1.	ตัวต้านทาน	0.25W,910k Ω	1	ตัว
2.	ตัวต้านทาน	0.25W,820k Ω	1	ตัว
3.	ตัวต้านทาน	0.25W,243k Ω	1	ตัว
4.	ตัวต้านทาน	0.25W,680k Ω	1	ตัว
5.	ตัวต้านทาน	0.25W,100k Ω	1	ตัว
6.	ตัวต้านทาน	0.25W,150k Ω	1	ตัว

วงจรสมมูล



รูปที่ 3.7 วงจรลดระดับแรงดันไฟฟ้าสำหรับการวัดและการแสดงผลในโปรแกรม LABVIEW

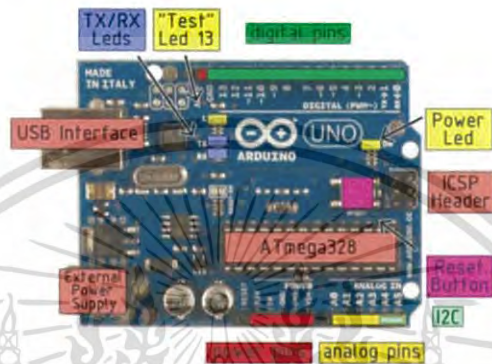
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 หลักการออกแบบโปรแกรม

3.3.1 โปรแกรม LABVIEW สำหรับการเก็บข้อมูลและแสดงผล สำหรับ Arduino UNO R3

อุปกรณ์

Arduino UNO R3



รูปที่ 3.8 ARDUINO UNO R3

องค์ประกอบ

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของ ARDUINO UNO R3


Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ตารางที่ 3.4 อุปกรณ์ใน BLOCK DIAGRAM ของโปรแกรม LABVIEW

ลำดับ	ตำแหน่ง	รูปร่างอุปกรณ์	จำนวน
1.	Structures /while loop	 While Loop	1
2.	MakerHub /LINK/Open	 Open	1
3.	MakerHub /LINK/Close	 Close	1
4.	MakerHub /LINK /peripherals /Analog /Read	 Read	5
5.	File I/O /Write to Measurement File	 Write Meas F...	1
6.	Timing /Wait(ms)	 Wait (ms)	1
7.	Numeric /Numeric constant	 Numeric Co...	20
8.	Numeric /Subtract	 Subtract	8
9.	Numeric /Multiply	 Multiply	7
10.	Numeric /Divide	 Divide	6
11.	Comparison/Greater or Equal To 0?	 Greater Or E...	2
12.	Structures /Cause Structures	 Case Structure	2

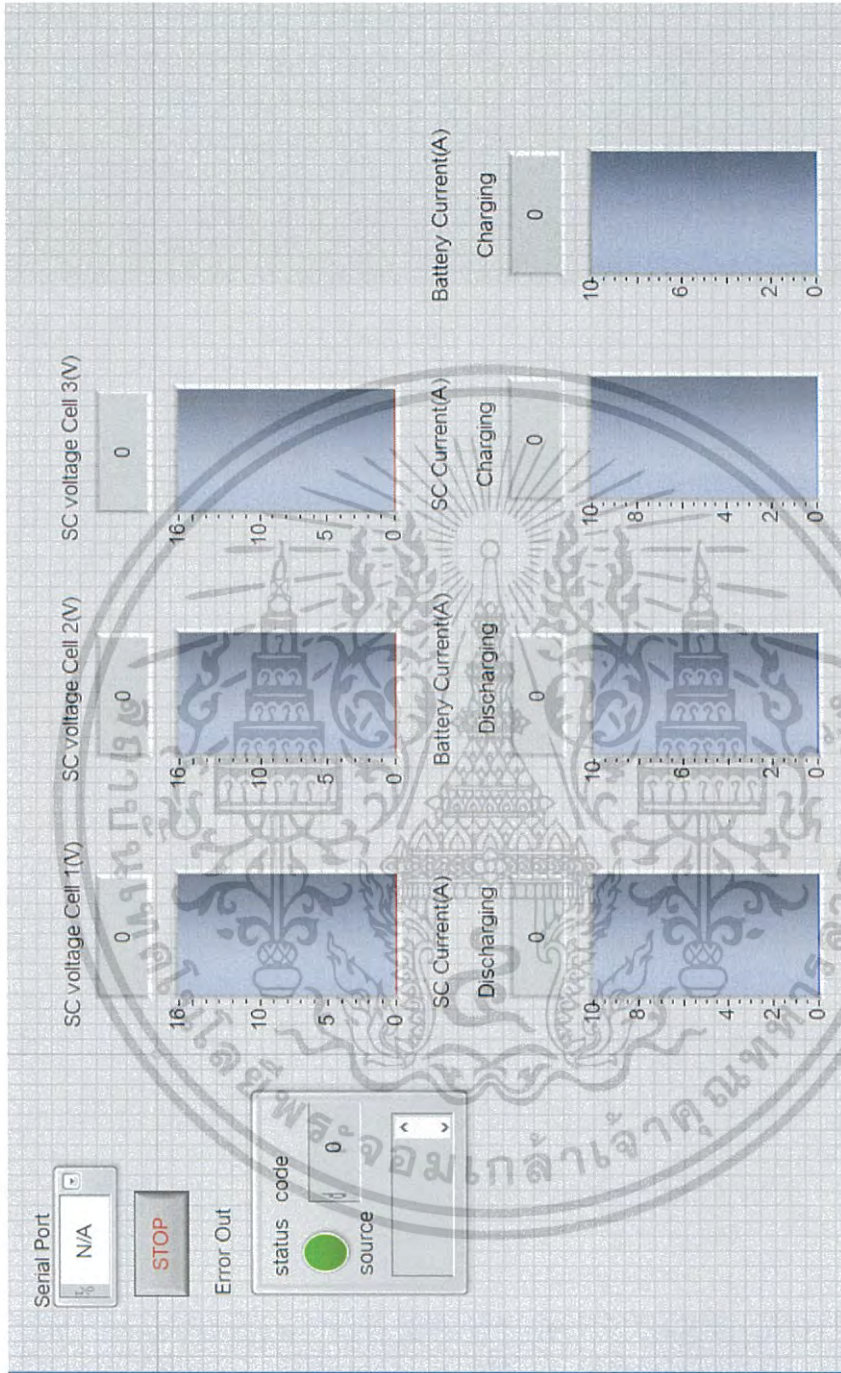
ตารางที่ 3.5 อุปกรณ์ที่กดขวาเพิ่มจาก BLOCK DIAGRAM ของ ฟังก์ชันโปรแกรม LABVIEW

ลำดับ	ชื่อขา	ชนิดการ Create	รูปร่างอุปกรณ์
1.	Serial Port	Control	 Open
2.	Error Out	Indicator	 Close
3.	Loop Condition	Control	

ตารางที่ 3.6 อุปกรณ์ที่กดขวาเพิ่มจาก FRONT PANEL โปรแกรม LABVIEW

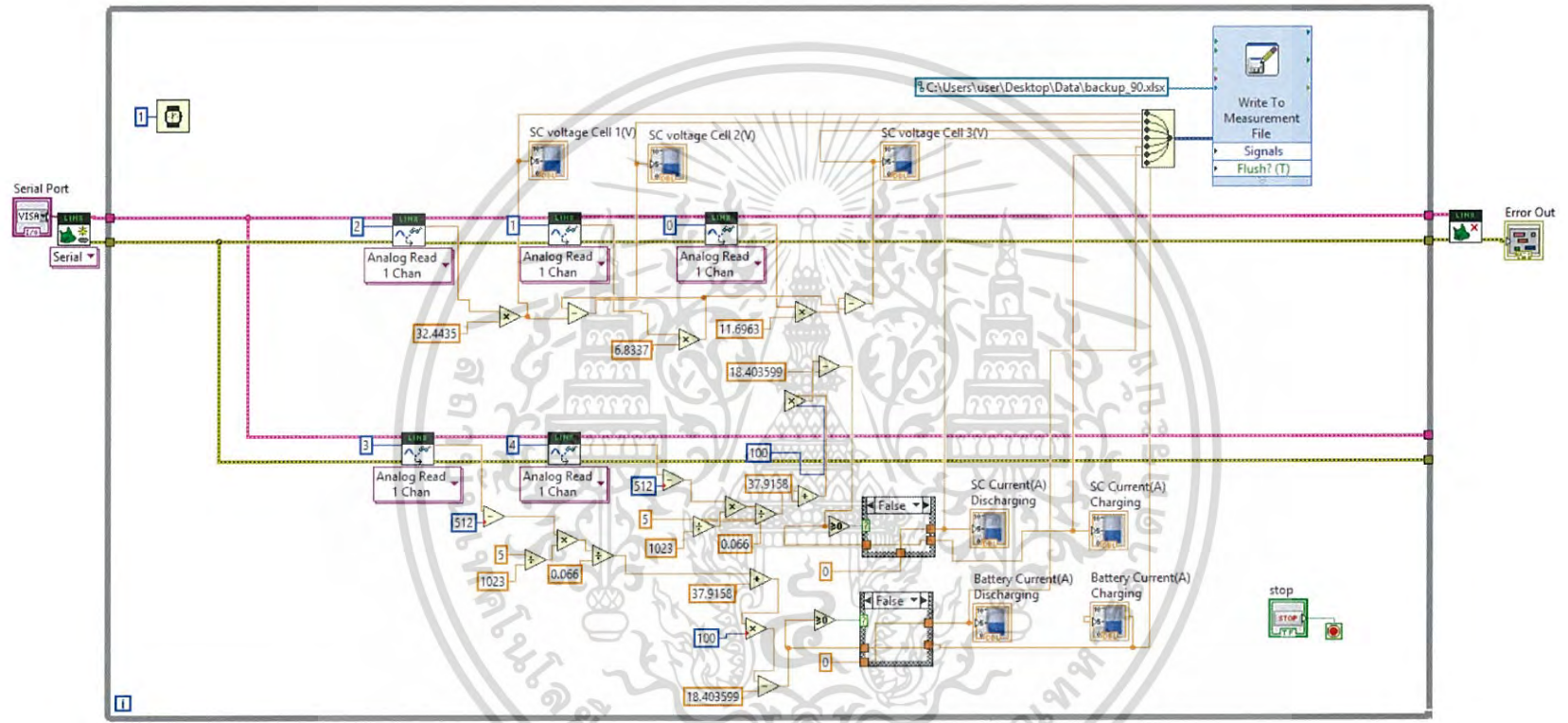
ลำดับ	ตำแหน่ง	รูปร่างอุปกรณ์	จำนวน
1.	Numeric /Tank	 Tank	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ที่ติดตั้งบน Front panel ของโปรแกรม LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

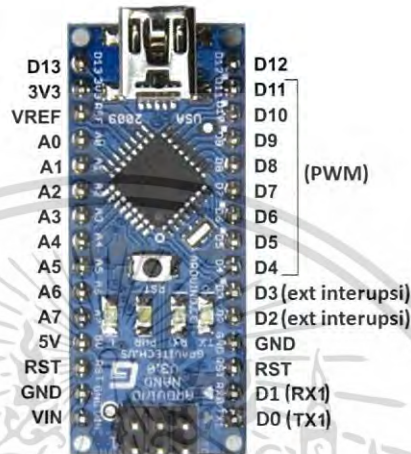


รูปที่ 3.10 ลายวงจรที่เขียนใน BLOCK DIAGRAM ของโปรแกรม LABVIEW

3.3.2 โปรแกรมสำหรับ Arduino nano สำหรับควบคุม Relay

อุปกรณ์

Arduino nano



รูปที่ 3.11 ARDUINO NANO

ตารางที่ 3.7 คุณลักษณะของ ARDUINO NANO

Microcontroller	Atmel ATmega168 untuk Arduino Nano 2.x
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	8
DC Current per I/O Pin	40 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	1 kbyte (ATmega168) dan 2 kbyte (ATmega328)
EEPROM	512 byte (Atmega168) dan 1 kbyte (Atmega328)
Clock Speed	16 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่เขียน

```
//ประกาศตัวแปร
int a = 6;
int b = 7;
void setup() {
//ประกาศสถานะ ขาสัญญาณ
  pinMode(a,OUTPUT);
  pinMode(b,OUTPUT);
//ตั้งสถานะเริ่มต้นของสัญญาณ
  digitalWrite(a,HIGH);
  digitalWrite(b,HIGH);
}
void loop() {
//หน่วงเวลารีเลย์ทำงาน
  delay(1000);
//เปลี่ยนโหมดการทำงาน
  digitalWrite(a,LOW);
  digitalWrite(b,LOW);
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 โปรแกรมสำหรับ Arduino nano สำหรับวัดอุณหภูมิ อุปกรณ์

1. Arduino nano
2. DHT11 Digital Temperature and Humidity Sensor



รูปที่ 3.12 DHT11 Digital Temperature and Humidity Sensor

โปรแกรมที่เขียน

```
#include "DHT.h"
DHT dht;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println();
  Serial.println("Status\tHumidity (%)\tTemperature (C)\t(F)");
  dht.setup(2); // data pin 2
}
void loop()
{
  delay(dht.getMinimumSamplingPeriod());
  float humidity = dht.getHumidity();
  float temperature = dht.getTemperature();
  Serial.print(dht.getStatusString());
  Serial.print("\t");
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Serial.print(humidity, 1);  
Serial.print("\t\t");  
Serial.print(temperature, 1);  
Serial.print("\t\t");  
Serial.println(dht.toFahrenheit(temperature), 1);  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเก็บข้อมูล

การทดลองที่ 1 การเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อ Arduino UNO R3 เข้ากับคอมพิวเตอร์ เปิดโปรแกรม LABVIEW ทำการอัปเดต Code ในโปรแกรมลงใน Arduino UNO R3 เพื่อแสดงผล
2. อัปเดต Code ลงใน Arduino nano เพื่อควบคุมรีเลย์
3. ตั้งหน่วยเวลารีเลย์ 1.5 วินาที โดยช่วงแรกให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งจ่ายให้กับมอเตอร์ และต่อมาเมื่อรีเลย์ทำงานให้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน 22 วินาที
4. กดปุ่มเริ่มการทำงานของ รีเลย์ แล้วเหยียบคันเร่งให้จากความเร็ว 0 ไปยังความเร็วสูงสุด 1200 rpm เมื่อครบ 24 วินาทีกดปุ่มหยุดในโปรแกรม excel
5. ทำการเปิดโปรแกรม excel พล็อตกราฟกระแสของตัวเก็บประจุยิ่งยวด แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่
6. ทำการทดลองตั้งแต่ 2-5 อีก 2 ครั้งโดยไม่ต้องชาร์ตตัวเก็บประจุยิ่งยวด
7. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

การทดลองที่ 2 การเก็บข้อมูลอุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดระยะสั้น

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด และอินเวอร์เตอร์
2. ทำการรันโปรแกรมเก็บผลอุณหภูมิขณะที่ทำการทดลองที่ 1
3. บันทึกข้อมูลลงในโปรแกรม excel
4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 3 การเก็บข้อมูลอุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดระยะยาว

ขั้นตอนการทดลอง

1. วัดอุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดก่อนเริ่มการทดลองที่ 1
2. ทำการทดลองที่ 1
3. วัดอุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดทุกๆ 15 นาทีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
4. บันทึกข้อมูลลงในโปรแกรม excel
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งการติดตั้ง TEMPERATURE SENSOR บนแบตเตอรี่



รูปที่ 3.14 ตำแหน่งการติดตั้ง TEMPERATURE SENSOR บนตัวเก็บประจุยิ่งยวด



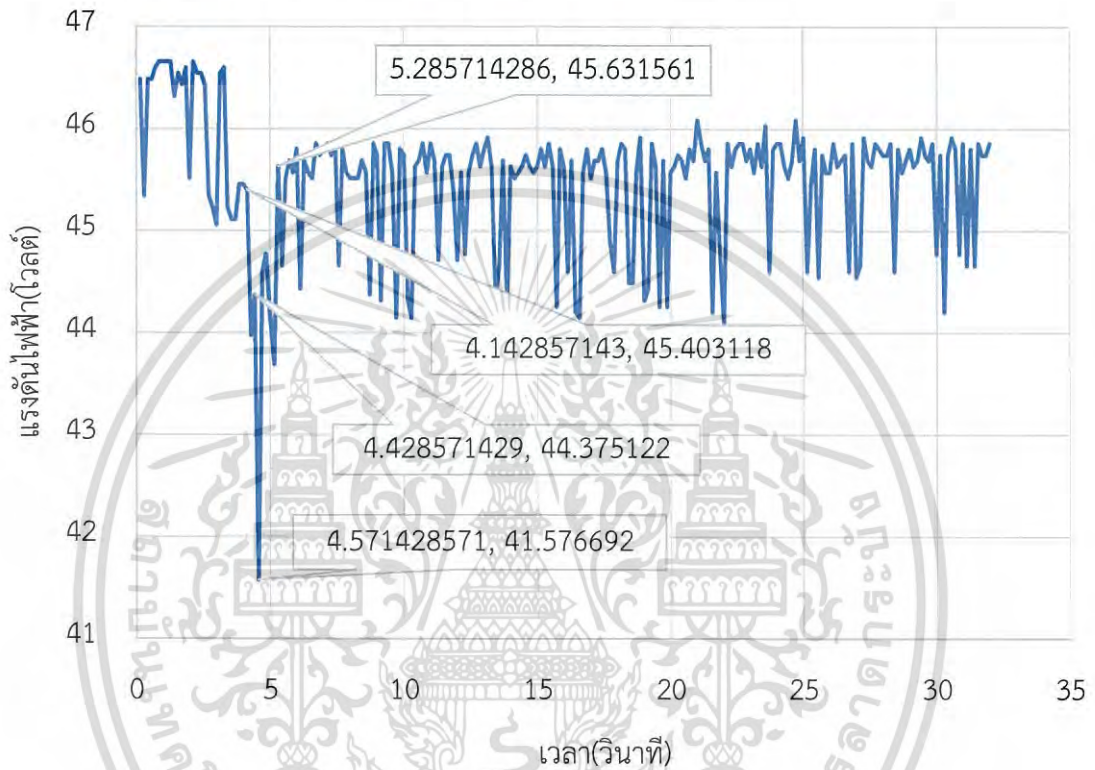
รูปที่ 3.15 ตำแหน่งการติดตั้ง TEMPERATURE SENSOR บนอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองวัดกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ครั้งที่ 1

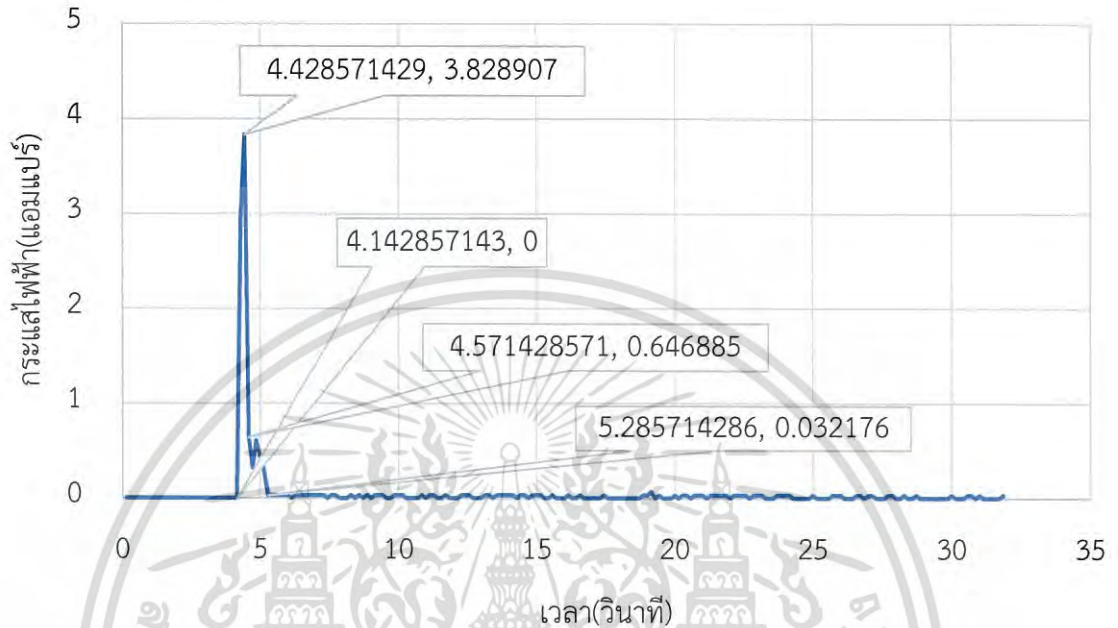
4.1.1 แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 1



รูปที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 1

จากราฟพบว่า ช่วงเวลาวินาที 0 ถึงวินาทีที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้ามีค่าประมาณ 46.5 โวลต์ และมีการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนในวงจร ช่วงเวลาวินาทีที่ 4.14 ถึงวินาทีที่ 5.29 มอเตอร์เริ่มหมุน ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ แรงดันไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวดตกลงจาก 46.5 โวลต์ลงมาอยู่ที่ประมาณ 44.5 โวลต์เนื่องจากการดึงพลังงานของมอเตอร์ ซึ่งตกลงต่ำสุดที่เวลาวินาทีที่ 4.57 เกิดกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 44.4 โวลต์ ณ วินาทีที่ 4.43 ช่วงเวลาวินาทีที่ 4.14 เป็นต้นไป วงจรบัคคอนเวอร์ชันไม่มีการจ่ายโหลดทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งแรงดันต่ำเท่ากับด้านแรงดันสูง แต่เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 45.6 โวลต์

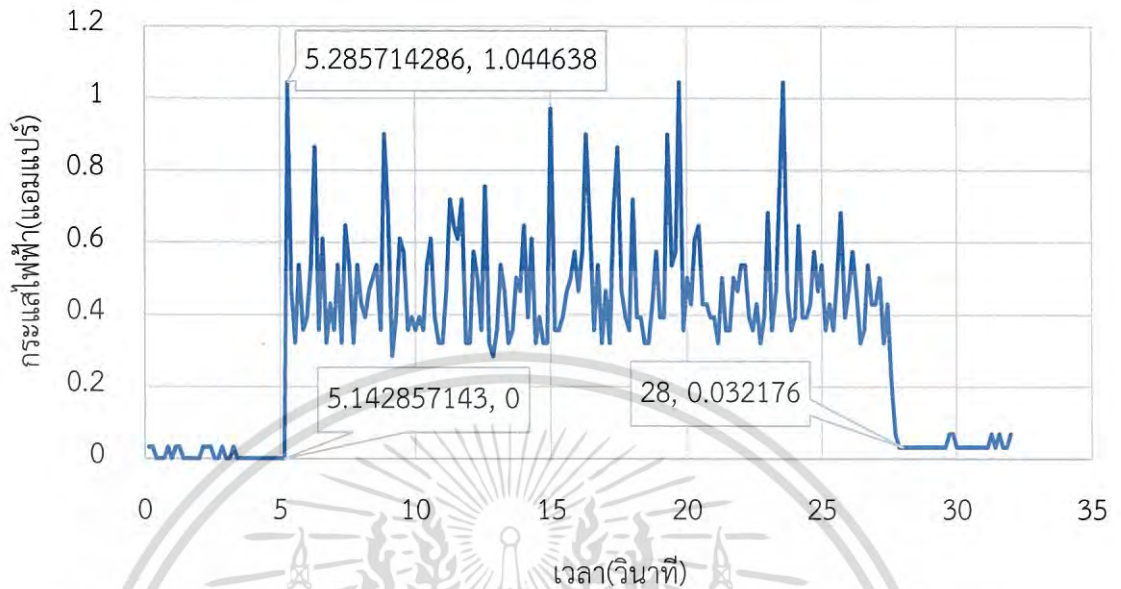
4.1.2 กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 1



รูปที่ 4.2 กระแสไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 1

จากกราฟพบว่า ช่วงเวลาวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 4.14 กระแสไฟฟ้ามีการกระเพื่อมเล็กน้อย อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนในวงจร ช่วงเวลาวินาทีที่ 4.14 ถึงวินาทีที่ 5.29 มอเตอร์เริ่มหมุน ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ กระแสไฟฟ้าพุ่งขึ้นจาก 0 ไป 4.43 แอมแปร์และตกลงมาที่ 0.65 แอมแปร์ต่อมาเกิดการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากความเร็วไม่คงที่ ช่วงวินาทีที่ 5.29 เป็นต้นไป รีเลย์เปลี่ยนแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าตกลงเป็นศูนย์ วงจรเกิดสัญญาณรบกวน ทำให้กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเกิดการกระเพื่อมเล็กน้อย

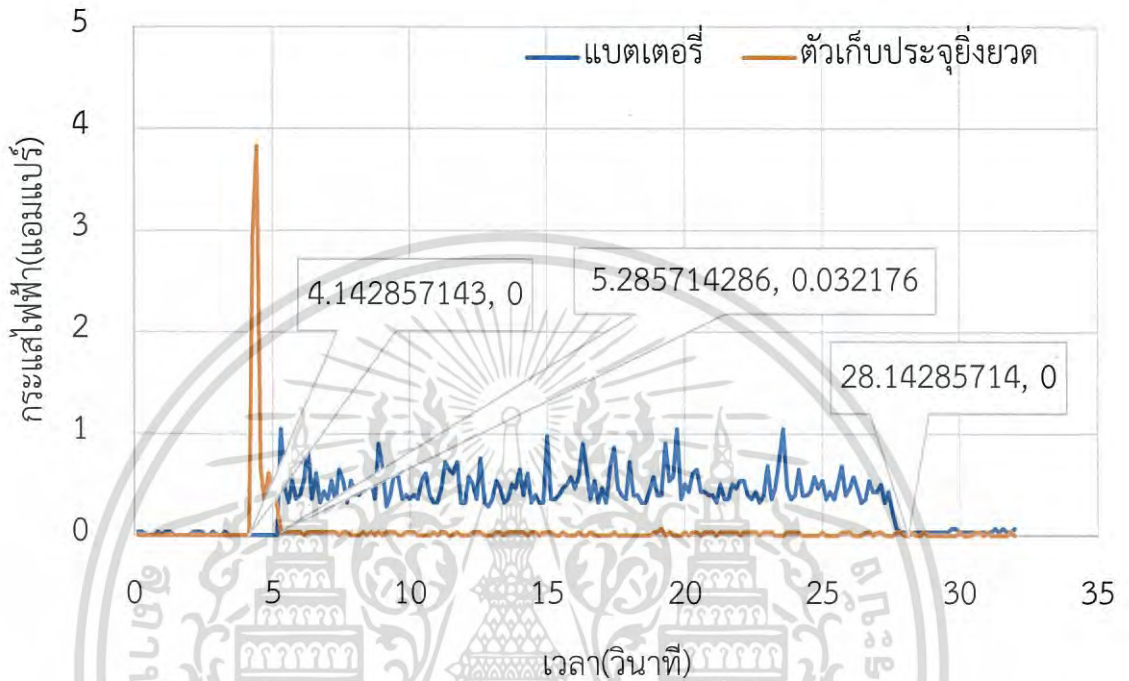
4.1.3 กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 1



รูปที่ 4.3 กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 1

จากรูปพบว่า ช่วงเวลาวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 5.14 กระแสไฟฟ้ามีการกระเพื่อมเล็กน้อย อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนในวงจร ช่วงเวลาวินาทีที่ 5.14 ถึงวินาทีที่ 28 รีเลย์เลือกแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้มอเตอร์ กระแสไฟฟ้าพุ่งขึ้นจาก 0 ไป 1.04 แอมแปร์และตกลงมาที่ 0.4 แอมแปร์ ต่อมาเกิดการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากความเร็วไม่คงที่ ช่วงเวลาวินาทีที่ 28 เป็นต้นไป มอเตอร์หยุดหมุน

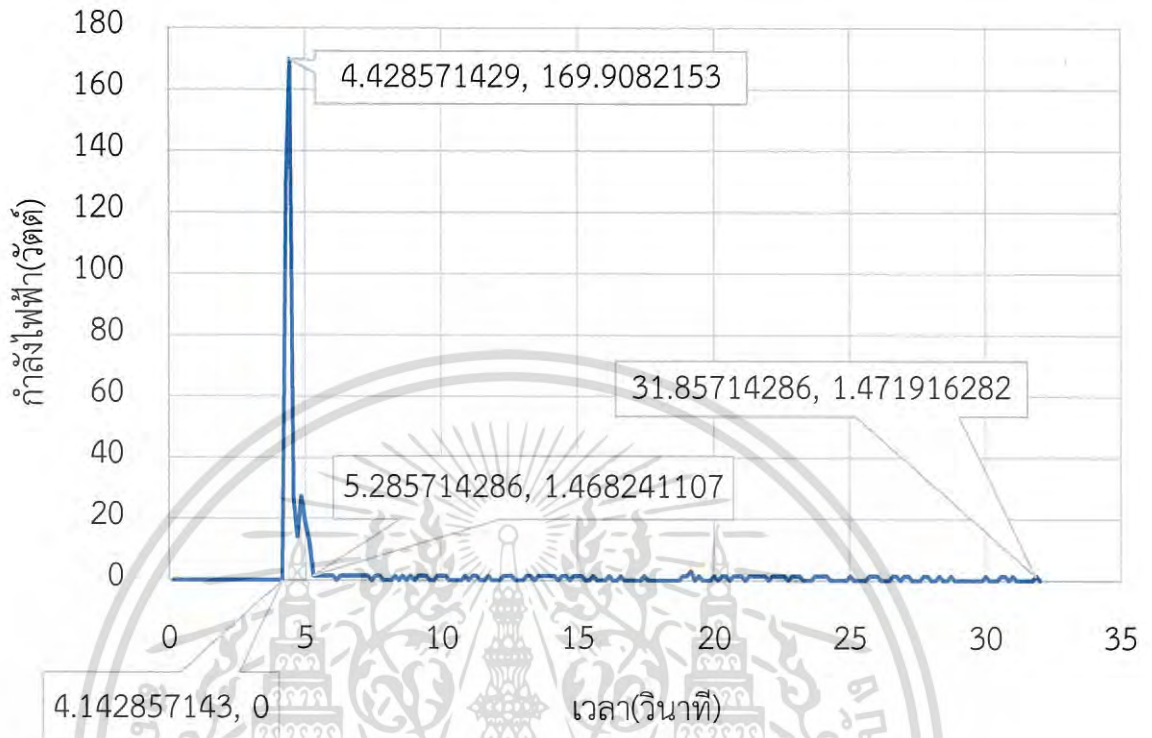
4.1.4 กราฟแสดงกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ตามโหมดการทำงานของมอเตอร์ในการทดลองครั้งที่ 1



รูปที่ 4.4 กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ตามโหมดการทำงานในการทดลองครั้งที่ 1

จากรูปพบว่าในช่วงแรกเป็นโหมดการเริ่มต้นเครื่องตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ โดยมอเตอร์เริ่มต้นเครื่องที่วินาทีที่ 4.14 ต่อจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 1.15 วินาที รีเลย์เปลี่ยนโหมดการทำงานให้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดตกลงเป็นศูนย์ ดังนั้นตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถทำงานในโหมดการเริ่มต้นเครื่องได้ มอเตอร์หมุนด้วยแหล่งจ่ายแบตเตอรี่เป็นเวลา 22.85 วินาที เวลาทั้งหมดในการทำงานทั้ง 2 โหมดเท่ากับ 24 วินาที

4.1.5 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 1



รูปที่ 4.5 กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 1

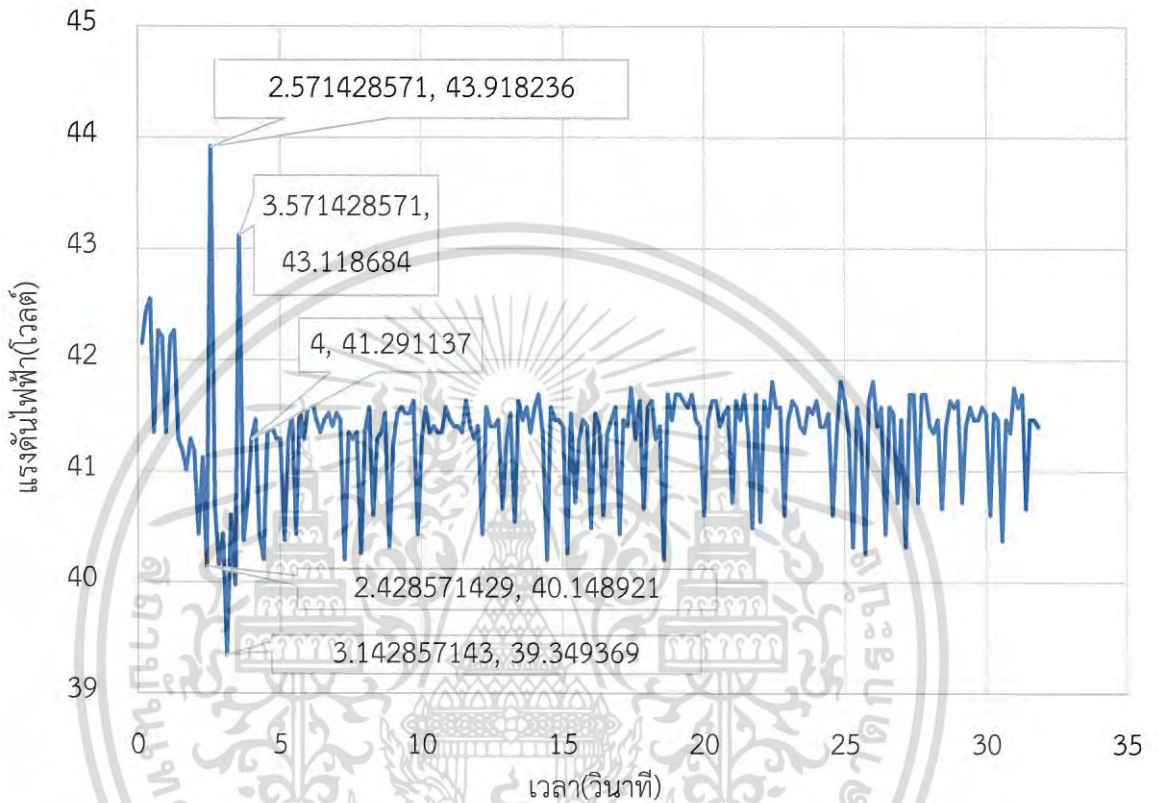
จากรูปพบว่า ช่วงเวลาวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 4.14 กระแสไฟฟ้ามีการกระเพื่อมเล็กน้อย อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนในวงจร ช่วงเวลาวินาทีที่ 4.14 ถึงวินาทีที่ 5.29 มอเตอร์เริ่มหมุน ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ กำลังไฟฟ้าพุ่งขึ้นจาก 0 ไป 169.91 วัตต์และตกลงมาที่ 20 วัตต์ ต่อมาเกิดการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้า เนื่องจากความเร็วไม่คงที่ ช่วงเวลาวินาทีที่ 5.29 เป็นต้นไป รีเลย์ เปลี่ยนแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ กำลังไฟฟ้าตกลงเป็นศูนย์ วงจรเกิดสัญญาณรบกวน ทำให้กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเกิดการกระเพื่อมเล็กน้อย

จากรูปที่ 4.5 พบว่า พื้นที่ใต้กราฟ ในช่วงเวลา 0 ถึงวินาทีที่ 31.86 มีพื้นที่เท่ากับ 534.92 หน่วย จากสมการที่ 4.1 พบว่า พลังงานที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดปล่อยออกมา มีค่าเท่ากับ 0.1486 วัตต์-ชั่วโมง

$$\text{พลังงานตัวเก็บประจุยิ่งยวด} = \text{พื้นที่ใต้กราฟกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 0 ถึงวินาทีที่ 31.86/3600} \quad (4.1)$$

4.2 ผลการทดลองวัดกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ครั้งที่ 2

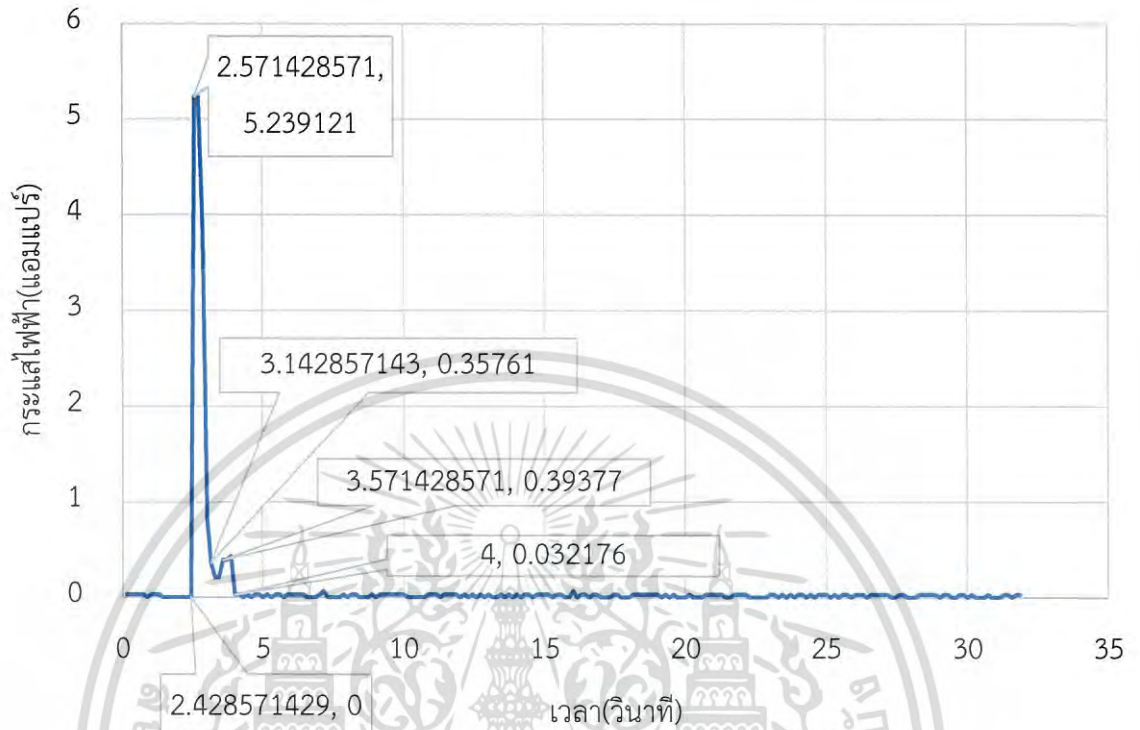
4.2.1 แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 4.6 แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 2

จากรูปพบว่า ช่วงเวลาวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 2.43 แรงดันไฟฟ้ามีค่าประมาณ 41.5 โวลต์และมีการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนในวงจร ช่วงเวลาวินาทีที่ 2.43 ถึง วินาทีที่ 4 มอเตอร์เริ่มหมุน ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ แรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวดตกลงจาก 42 โวลต์ลงมาอยู่ที่ประมาณ 40.5 โวลต์เนื่องจากการดึงพลังงานของมอเตอร์ ซึ่งตกลงต่ำสุดที่ เวลาวินาทีที่ 3.14 เกิดกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 43.9 โวลต์ ณ วินาทีที่ 2.57 ช่วงเวลา วินาทีที่ 4 เป็นต้นไป วงจรบัคคอนเวอร์ชันไม่มีการจ่ายโหลดทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งแรงดันต่ำเท่ากับ ด้านแรงดันสูง แต่เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 41.5 โวลต์

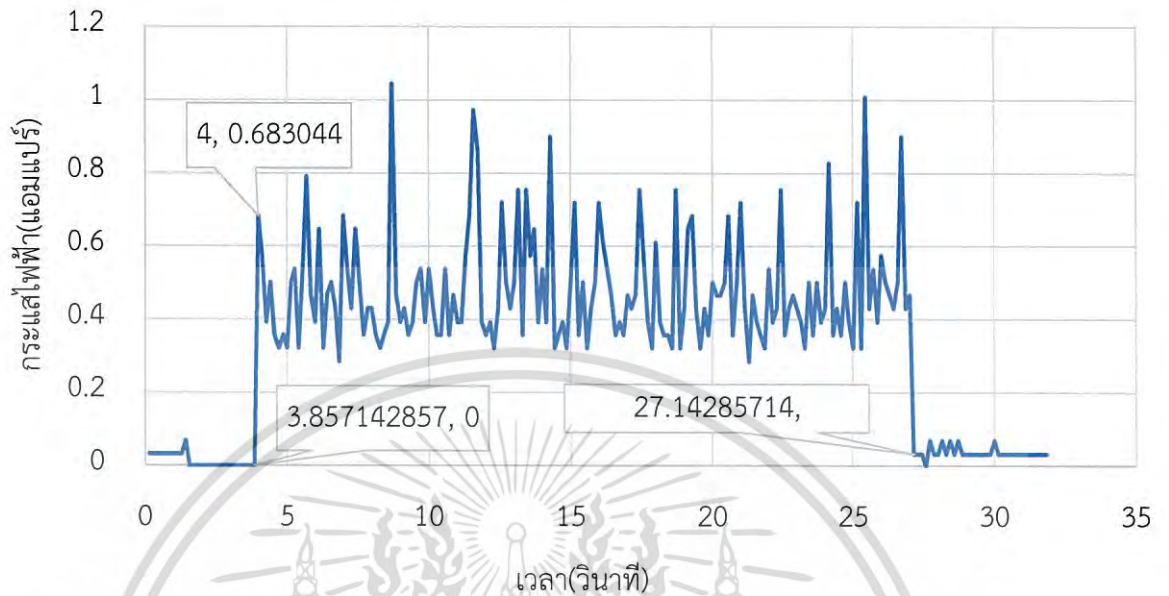
4.2.2 กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 4.7 กระแสไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 2

จากรูปพบว่า ช่วงเวลาวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 2.43 กระแสไฟฟ้ามีการกระเพื่อมเล็กน้อย อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนในวงจร ช่วงเวลาวินาทีที่ 2.43 ถึงวินาทีที่ 4 มอเตอร์เริ่มหมุน ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ กระแสไฟฟ้าพุ่งขึ้นจาก 0 ไป 5.24 แอมแปร์และตกลงมาที่ 0.36 แอมแปร์ต่อมาเกิดการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากความเร็วไม่คงที่ ช่วงเวลาวินาทีที่ 4 เป็นต้นไป รีเลย์เปลี่ยนแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าตกลงเป็นศูนย์ วงจรเกิดสัญญาณรบกวน ทำให้กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเกิดการกระเพื่อมเล็กน้อย

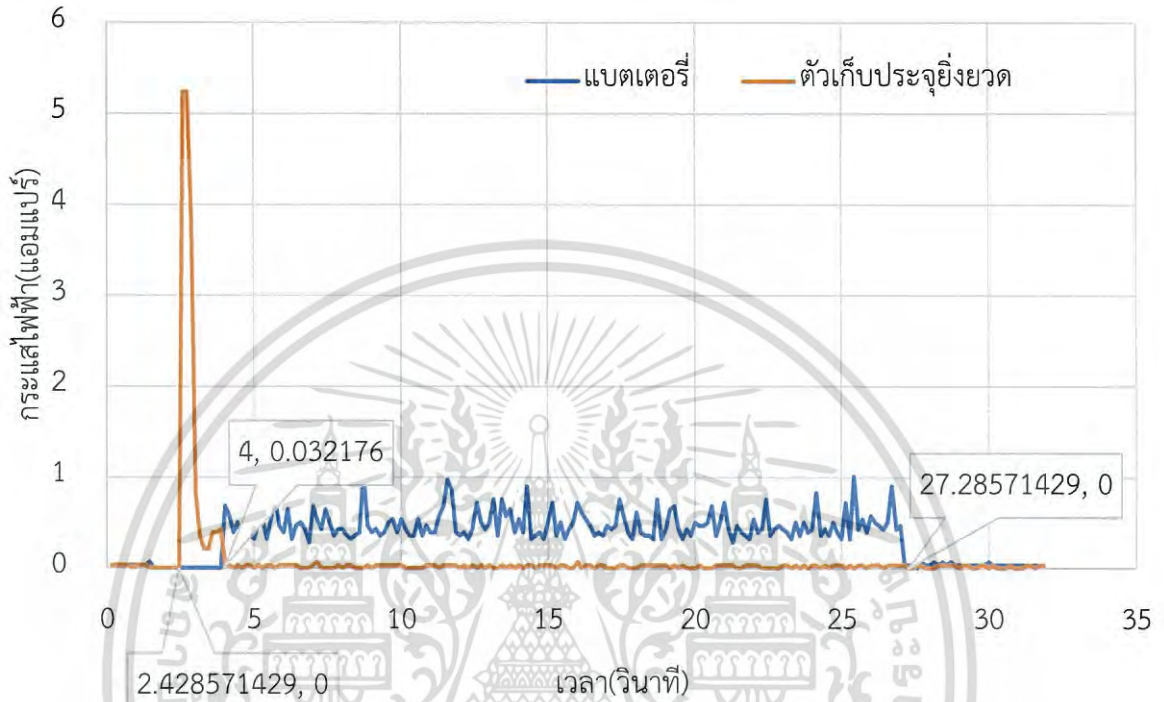
4.2.3 กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 4.8 กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 2

จากรูปพบว่า ช่วงเวลาวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 3.86 กระแสไฟฟ้ามีการกระเพื่อมเล็กน้อย อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนในวงจร ช่วงเวลาวินาทีที่ 3.86 ถึงวินาทีที่ 27.14 รีเลย์เลือกแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้มอเตอร์ กระแสไฟฟ้าพุ่งขึ้นจาก 0 ไป 0.68 แอมแปร์และตกลงมาที่ 0.4 แอมแปร์ ต่อมาเกิดการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากความเร็วไม่คงที่ ช่วงเวลาวินาทีที่ 27.14 เป็นต้นไป มอเตอร์หยุดหมุน

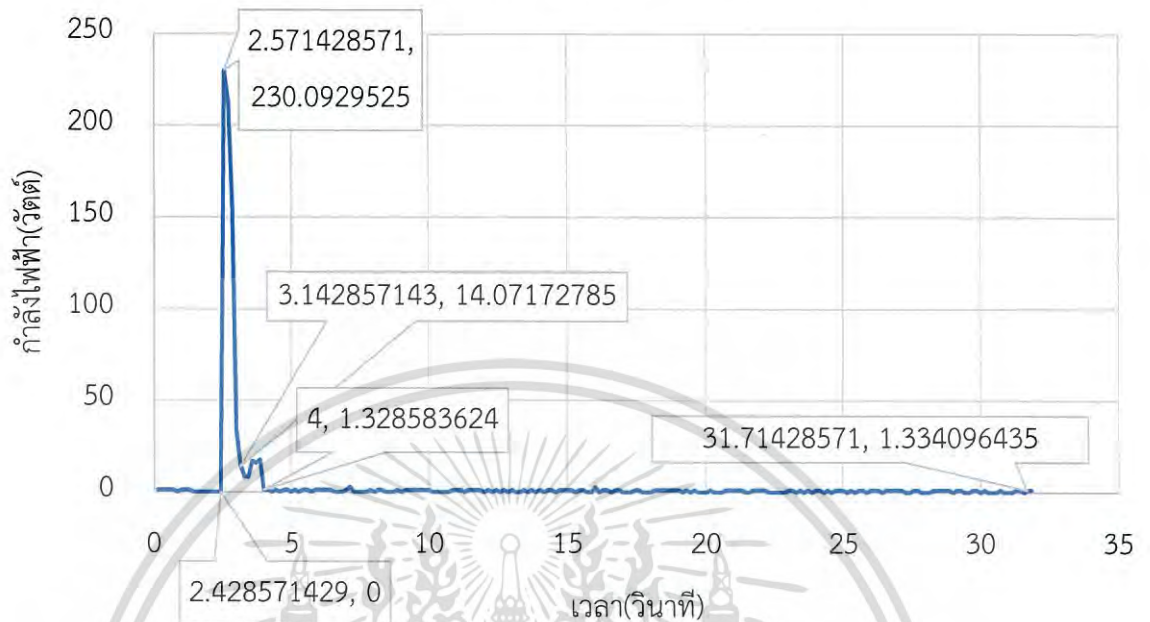
4.2.4 กราฟแสดงกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ตามโหมดการทำงานของมอเตอร์ในการทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 4.9 กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ตามโหมดการทำงานในการทดลองครั้งที่ 2

จากรูปพบว่าในช่วงแรกเป็นโหมดการเริ่มเดินเครื่องตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ โดยมอเตอร์เริ่มเดินเครื่องที่วินาทีที่ 2.43 ต่อจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 1.57 วินาที รีเลย์เปลี่ยนโหมดการทำงานให้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดตกลงเป็นศูนย์ ดังนั้นตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถทำงานในโหมดการเริ่มเดินเครื่องได้ และมอเตอร์หมุนด้วยแหล่งจ่ายแบตเตอรี่เป็นเวลา 23.29 วินาที เวลาทั้งหมดในการทำงานทั้ง 2 โหมดเท่ากับ 24.86 วินาที

4.2.5 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 4.10 กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 2

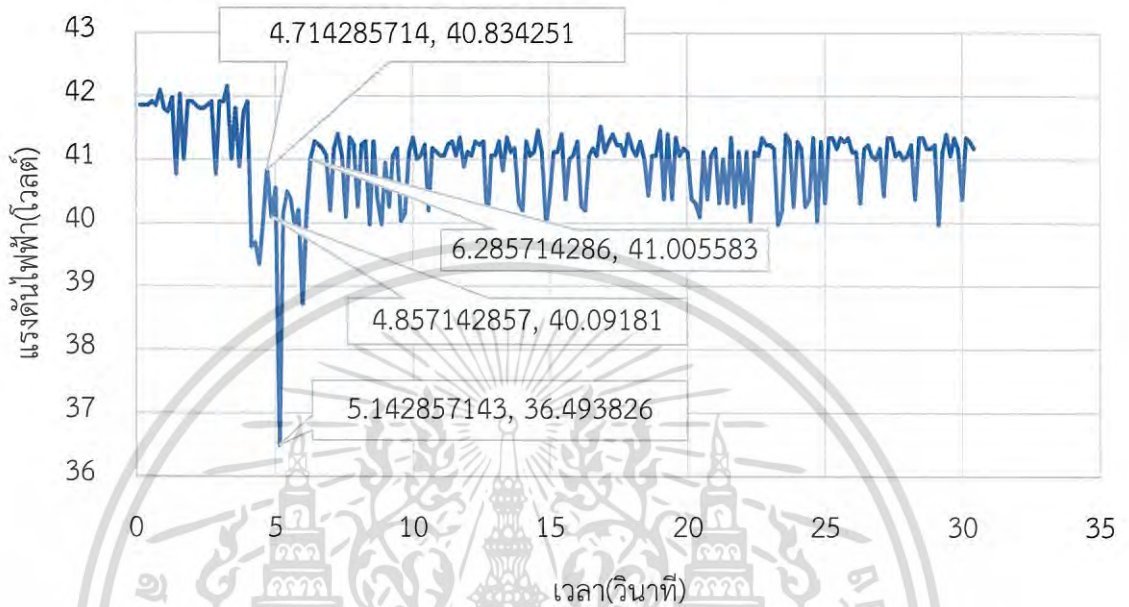
จากรูปพบว่า ช่วงเวลาวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 2.43 กระแสไฟฟ้ามีการกระเพื่อมเล็กน้อย อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนในวงจร ช่วงเวลาวินาทีที่ 2.43 ถึงวินาทีที่ 4 มอเตอร์เริ่มหมุน ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ กำลังไฟฟ้าพุ่งขึ้นจาก 0 ไป 230.09 วัตต์และตกลงมาที่ 14 วัตต์ต่อมาเกิดการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้า เนื่องจากความเร็วไม่คงที่ ช่วงเวลา 4 วินาทีเป็นต้นไป รีเลย์เปลี่ยนแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ กำลังไฟฟ้าตกลงเป็นศูนย์ วงจรเกิดสัญญาณรบกวน ทำให้กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเกิดการกระเพื่อมเล็กน้อย

จากรูปที่ 4.10 พบว่า พื้นที่ใต้กราฟ ในช่วงเวลา 0 ถึงวินาทีที่ 31.71 มีพื้นที่เท่ากับ 875.89 หน่วย จากสมการที่ 4.2 พบว่า พลังงานที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดปล่อยออกมามีค่าเท่ากับ 0.2433 วัตต์-ชั่วโมง

$$\text{พลังงานตัวเก็บประจุยิ่งยวด} = \text{พื้นที่ใต้กราฟกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 0 ถึงวินาทีที่ 31.71/3600} \quad (4.2)$$

4.3 ผลการทดลองวัดกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ครั้งที่ 3

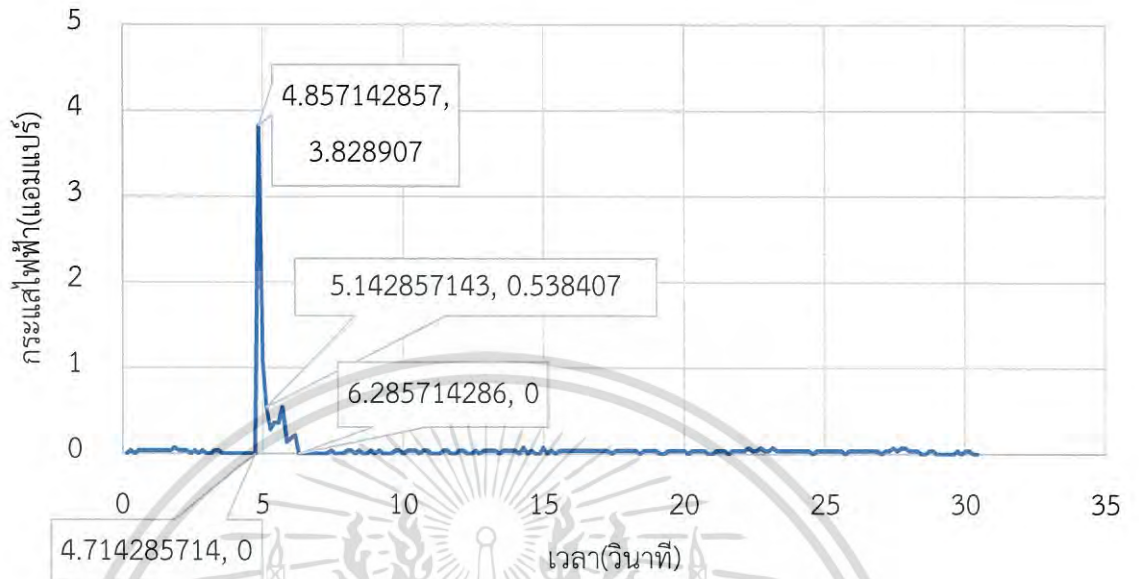
4.3.1 แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 3



รูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 3

จากรูปพบว่า ช่วงเวลาวินาที 0 ถึงวินาทีที่ 4.71 แรงดันไฟฟ้ามีค่าประมาณ 42 โวลต์ และมีการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนในวงจร ช่วงเวลาวินาทีที่ 4.71 ถึงวินาทีที่ 6.29 มอเตอร์เริ่มหมุน ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ แรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวดตกลงจาก 42 โวลต์ลงมาอยู่ที่ประมาณ 40 โวลต์เนื่องจากการดึงพลังงานของมอเตอร์ ซึ่งตกลงต่ำสุดที่เวลาวินาทีที่ 5.14 เกิดกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ระดับแรงดัน 40.09 โวลต์ ณ วินาทีที่ 4.86 ช่วงเวลาวินาทีที่ 6.29 เป็นต้นไป วงจรบัคคอนเวอร์ชันไม่มีการจ่ายโหลดทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งแรงดันต่ำเท่ากับด้านแรงดันสูง แต่เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 41 โวลต์

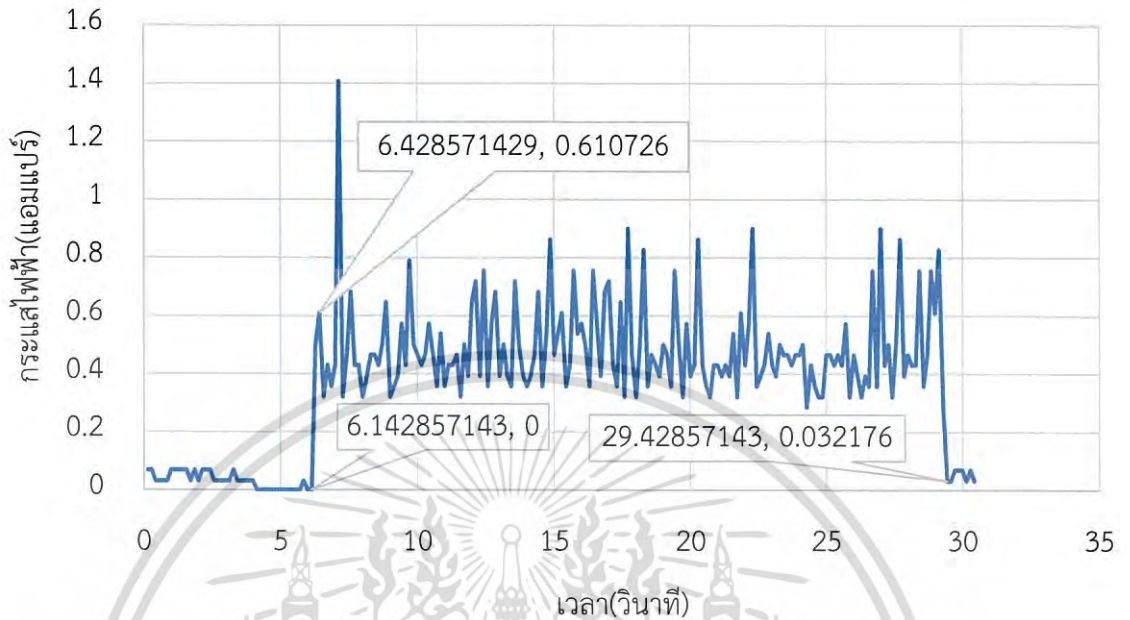
4.3.2 กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 3



รูปที่ 4.12 กระแสไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 3

จากรูปพบว่า ช่วงเวลาวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 4.71 กระแสไฟฟ้ามีการกระเพื่อมเล็กน้อย อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนในวงจร ช่วงเวลาวินาทีที่ 4.71 ถึงวินาทีที่ 6.29 มอเตอร์เริ่มหมุน ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ กระแสไฟฟ้าพุ่งขึ้นจาก 0 ไป 3.83 แอมแปร์และตกลงมาที่ 0.54 แอมแปร์ต่อมาเกิดการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากความเร็วไม่คงที่ ช่วงเวลาวินาทีที่ 6.29 เป็นต้นไป รีเลย์เปลี่ยนแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าตกลงเป็นศูนย์ วงจรเกิดสัญญาณรบกวน ทำให้กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเกิดการกระเพื่อมเล็กน้อย

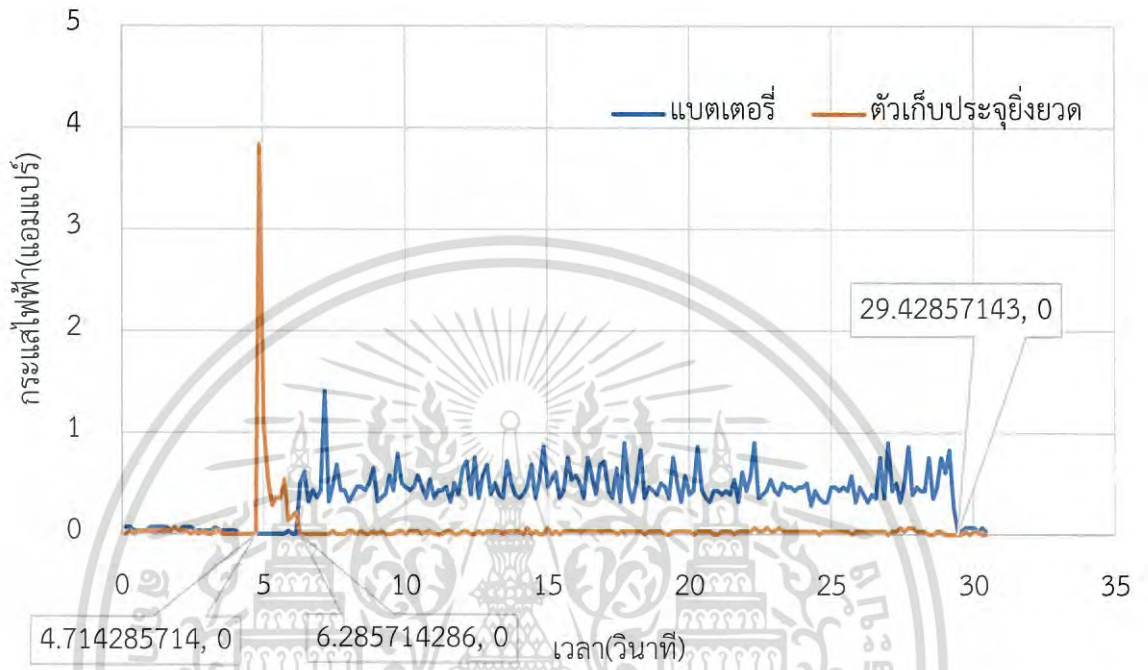
4.3.3 กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 3



รูปที่ 4.13 กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการทดลองครั้งที่ 3

จากรูปพบว่า ช่วงเวลาวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 6.14 กระแสไฟฟ้ามีการกระเพื่อมเล็กน้อย อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนในวงจร ช่วงเวลาวินาทีที่ 6.14 ถึงวินาทีที่ 27.14 รีเลย์เลือกแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้มอเตอร์ กระแสไฟฟ้าพุ่งขึ้นจาก 0 ไป 0.61 แอมแปร์และตกลงมาที่ 0.4 แอมแปร์ ต่อมาเกิดการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากความเร็วไม่คงที่ ช่วงเวลาวินาทีที่ 29.43 เป็นต้นไป มอเตอร์หยุดหมุน

4.3.4 กราฟแสดงกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ตามโหมดการทำงานของมอเตอร์ในการทดลองครั้งที่ 3



รูปที่ 4.14 กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ตามโหมดการทำงานในการทดลองครั้งที่ 3

จากรูปพบว่าในช่วงแรกเป็นโหมดการเริ่มต้นเครื่องตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ โดยมอเตอร์เริ่มต้นเครื่องที่วินาทีที่ 4.71 ต่อจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 1.58 วินาที รีเลย์เปลี่ยนโหมดการทำงานให้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดตกลงเป็นศูนย์ ดังนั้นตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถทำงานในโหมดการเริ่มต้นเครื่องได้ และมอเตอร์หมุนด้วยแหล่งจ่ายแบตเตอรี่เป็นเวลา 23.14 วินาที เวลาทั้งหมดในการทำงานทั้ง 2 โหมดเท่ากับ 24.72 วินาที

4.3.5 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 3



รูปที่ 4.15 กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองครั้งที่ 3

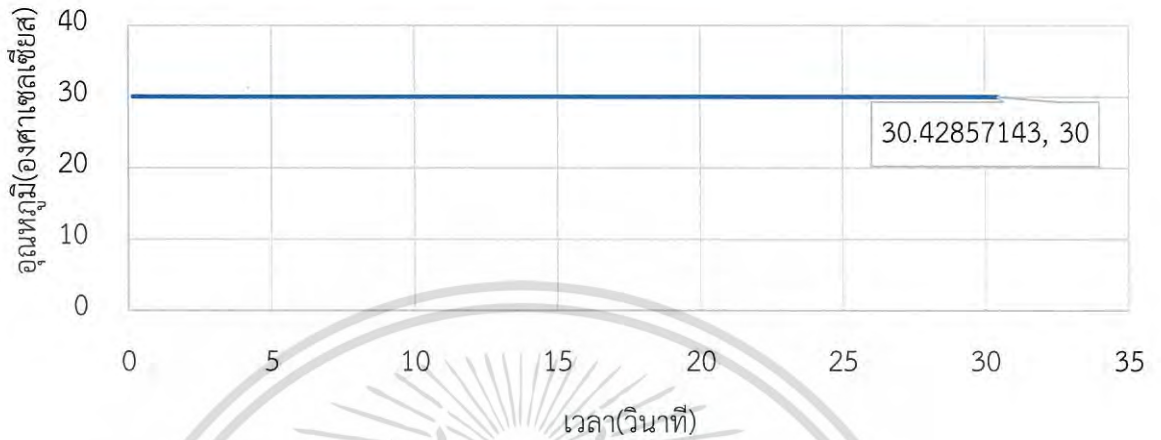
จากรูปพบว่า ช่วงเวลาวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 4.57 กระแสไฟฟ้ามีการกระเพื่อมเล็กน้อย อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนในวงจร ช่วงเวลาวินาทีที่ 4.57 ถึงวินาทีที่ 6.29 มอเตอร์เริ่มหมุน ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ กำลังไฟฟ้าพุ่งขึ้นจาก 0 ไป 153.5 วัตต์และตกลงมาที่ 14.5 วัตต์ ต่อมาเกิดการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้า เนื่องจากความเร็วไม่คงที่ ช่วงเวลาวินาทีที่ 6.29 เป็นต้นไป รีเลย์ เปลี่ยนแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ กำลังไฟฟ้าตกลงเป็นศูนย์ วงจรเกิดสัญญาณรบกวน ทำให้กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเกิดการกระเพื่อมเล็กน้อย

จากรูปที่ 4.15 พบว่า พื้นที่ใต้กราฟ ในช่วงเวลา 0 ถึงวินาทีที่ 30.43 มีพื้นที่เท่ากับ 487.55 หน่วย จากสมการที่ 4.3 พบว่า พลังงานที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดปล่อยออกมามีค่าเท่ากับ 0.1354 วัตต์-ชั่วโมง

$$\text{พลังงานตัวเก็บประจุยิ่งยวด} = \text{พื้นที่ใต้กราฟกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 0 ถึงวินาทีที่ 30.43/3600} \quad (4.3)$$

4.4 ข้อมูลการวัดอุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดระยะสั้น

4.4.1 การวัดอุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์ระยะสั้น



รูปที่ 4.16 อุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์ในการทดลองที่ 2

จากรูปที่ 4.16 พบว่าตลอดการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้ง 2 โหมดในระยะเวลา 30 วินาที อุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง มีค่าคงที่ที่ 30 องศาเซลเซียส

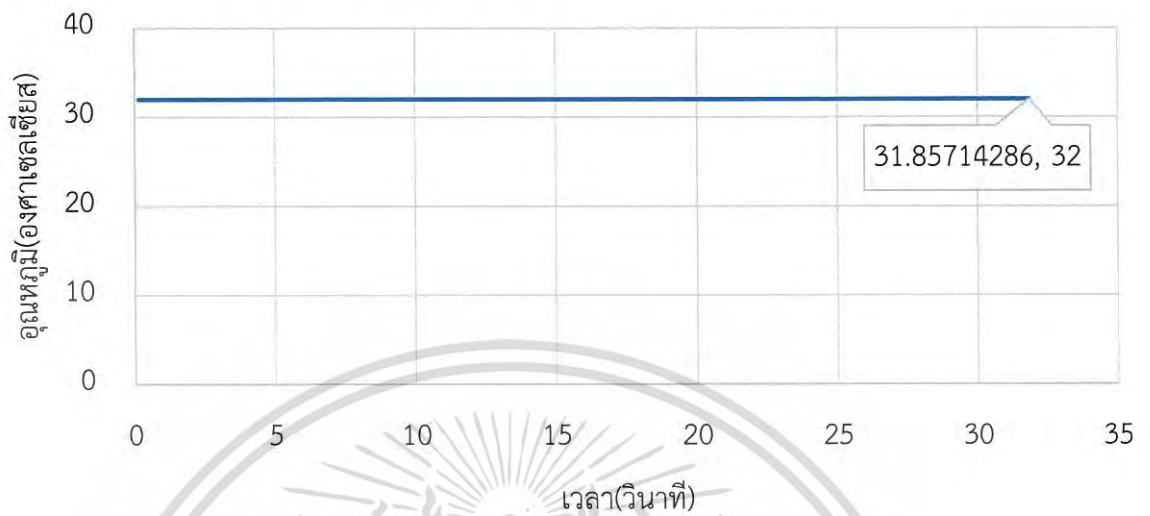
4.4.2 การวัดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ระยะสั้น



รูปที่ 4.17 อุณหภูมิของแบตเตอรี่ในการทดลองที่ 2

จากรูปที่ 4.17 พบว่าตลอดการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้ง 2 โหมดในระยะเวลา 30 วินาที อุณหภูมิของแบตเตอรี่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง มีค่าคงที่ที่ 29 องศาเซลเซียส

4.4.3 การวัดอุณหภูมิของตัวเก็บประจุยิ่งยวดระยะสั้น



รูปที่ 4.18 อุณหภูมิของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองที่ 2

จากรูปที่ 4.18 พบว่าตลอดการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้ง 2 โหมดในระยะเวลา 30 วินาที

อุณหภูมิของตัวเก็บประจุยิ่งยวดไม่มีการเปลี่ยนแปลง มีค่าคงที่ที่ 32 องศาเซลเซียส

4.5 ข้อมูลการวัดอุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดระยะยาว ทำการทดลองเวลา 16.00 น. ถึง 19.00 น. วันที่ 9 พฤษภาคม 2561

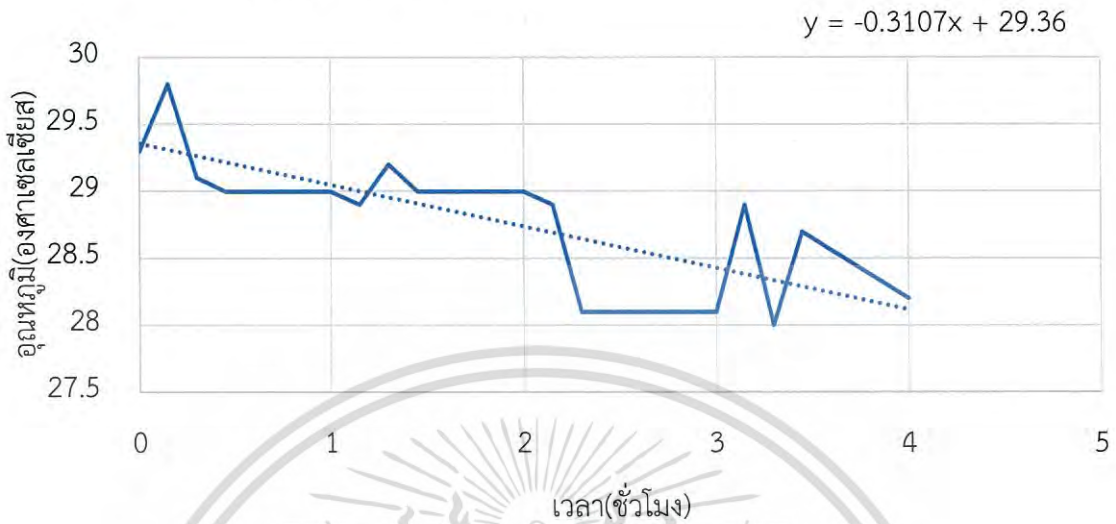
4.4.1 การวัดอุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์ระยะยาว



รูปที่ 4. 19 อุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์ในการทดลองที่ 3

จากรูปที่ 4.16 พบว่าตลอดการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้ง 2 โหมดในการทดสอบด้วยระยะเวลา 4 ชั่วโมงอุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 0.368 องศาต่อชั่วโมง เนื่องด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นจากการไหลของกระแสไฟฟ้าในอินเวอร์เตอร์ และความคลาดเคลื่อนในการวัดของผู้ทดสอบ

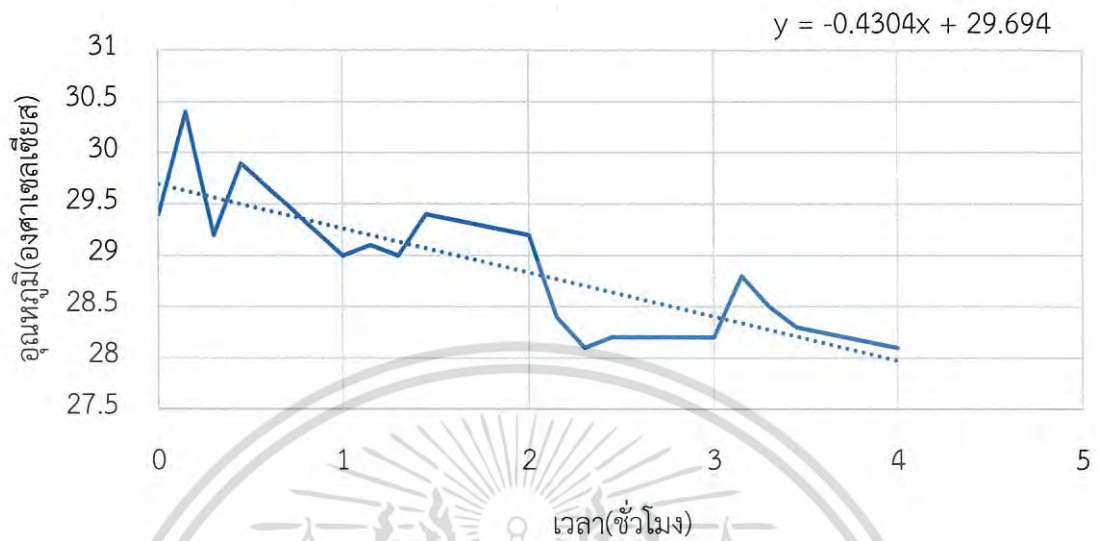
4.4.2 การวัดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ระยะยาว



รูปที่ 4.20 อุณหภูมิของแบตเตอรี่ในการทดลองที่ 3

จากรูปที่ 4.17 พบว่าตลอดการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้ง 2 โหมดในการทดสอบด้วยระยะเวลา 4 ชั่วโมงอุณหภูมิของแบตเตอรี่มีแนวโน้มลดลงด้วยอัตรา 0.3107 องศาต่อชั่วโมง เนื่องจากช่วงที่ทำการทดลองเป็นช่วงเย็นทำให้อุณหภูมิห้องลดลง ทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ลดลงด้วย เพราะไม่มีการสะสมความร้อนในแบตเตอรี่

4.4.3 การวัดอุณหภูมิของตัวเก็บประจุยิ่งยวดระยะยาว



รูปที่ 4.21 อุณหภูมิของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองที่ 3

จากรูปที่ 4.18 พบว่าตลอดการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้ง 2 โหมดในระยะเวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีแนวโน้มลดลงด้วยอัตรา 0.4304 องศาต่อชั่วโมง เนื่องจากช่วงที่ทำการทดลองเป็นช่วงเย็นทำให้อุณหภูมิห้องลดลง ทำให้อุณหภูมิของตัวเก็บประจุยิ่งยวดลดลงด้วย เพราะไม่มีการสะสมความร้อนในแบตเตอรี่

4.6 การประเมินความคุ้มค่าสำหรับการลงทุน

ในการทดลองใช้แบตเตอรี่ ลิเทียม-ไอออน มีความจุพลังงาน 360 วัตต์-ชั่วโมง ราคาต่อเซลล์เท่ากับ 180 บาท มีทั้งหมด 30 เซลล์คิดเป็นเงิน 5400 บาท เมื่อคำนวณค่าความจุพลังงานต่อราคาจากสมการที่ 4.2 เท่ากับ 0.067 วัตต์-ชั่วโมง/บาท

$$\text{ความจุพลังงานต่อราคา} = \text{ความจุพลังงานของแบตเตอรี่/ราคาแบตเตอรี่} \quad (4.2)$$

ในการทดลอง ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด 6.7 ฟารัด 48 โวลต์ มีความจุพลังงาน 2.13 วัตต์-ชั่วโมง ราคาต่อเซลล์ เท่ากับ 180 บาท มีทั้งหมด 18 เซลล์คิดเป็นเงิน 3240 บาท

เริ่มเดินเครื่องครั้งที่ 1 พลังงานที่ตัวเก็บประจุปล่อยออกมา เท่ากับ 0.1486 วัตต์-ชั่วโมง

เริ่มเดินเครื่องครั้งที่ 2 พลังงานที่ตัวเก็บประจุปล่อยออกมา เท่ากับ 0.2433 วัตต์-ชั่วโมง

เริ่มเดินเครื่องครั้งที่ 3 พลังงานที่ตัวเก็บประจุปล่อยออกมา เท่ากับ 0.1354 วัตต์-ชั่วโมง

เริ่มเดินเครื่อง 1 ครั้ง พลังงานที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดปล่อยออกมาเฉลี่ย เท่ากับ 0.1758 วัตต์-ชั่วโมง คิดเป็นเงิน $0.1758/0.067 = 2.6$ บาท ต้องเดินเครื่องทั้งหมด $3,240/2.6 = 1247$ ครั้งถึงจะคืนทุน

ในงานวิจัยข้างหน้า เรื่องระบบไฮบริดจ์แหล่งจ่ายกำลังและพลังงาน การเปลี่ยนแปลงความเร็ว 1 ครั้งสามารถใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาเป็นแหล่งจ่ายทำให้ การคืนทุนนั้นเปลี่ยนจากเริ่มเดินเครื่อง 1247 ครั้งเป็นเมื่อเปลี่ยนความเร็ว 1247 ครั้ง

พิจารณาอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงานในการเดินเครื่อง 1 ครั้ง 0.1758 วัตต์-ชั่วโมง มีความจุพลังงานทั้งหมด 2.13 วัตต์-ชั่วโมง ดึงพลังงานมาใช้ได้ 30 เปอร์เซ็นต์หรือ $2.13 \times 0.3 = 0.64$ วัตต์-ชั่วโมง เดินเครื่องได้ 75 ครั้งต่อการชาร์ต 1 ครั้ง กรณีเดินเครื่อง 1247 ครั้งต้องชาร์ต 17 ครั้ง โดยอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดประมาณ 500,000 ครั้ง สามารถใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการหมุนมอเตอร์ 3 ครั้งโดยไม่ชาร์ตประจุแก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถช่วยจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ในช่วงเริ่มเดินเครื่องได้จริง ซึ่งจากการทดลอง เมื่อมอเตอร์เริ่มขับเคลื่อน เกิดการดึงพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวด แรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะตกลงประมาณ 2 โวลต์และเพิ่มขึ้นเมื่อรีเลย์ทำงานให้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน การเริ่มเดินเครื่องหนึ่งครั้งทำให้แรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวดตกลงประมาณ 1 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่สถานะไม่มีโหลดของมอเตอร์ที่การเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งไปความเร็วสูงสุดอยู่มีค่าประมาณ 0.4 แอมแปร์มีการพุ่งของกระแสไฟฟ้าขึ้นไปมีค่าประมาณ 4 แอมแปร์หรือประมาณ 10 เท่าของสถานะคงตัว ซึ่งหากมอเตอร์ทำงานที่พิกัดโหลดแล้วเพิ่มความเร็วอย่างทันทีทันใดจากหยุดนิ่งไปสู่ความเร็วสูงสุดจะเกิดกำลังไฟฟ้าชั่วขณะสูงมาก โดยพลังงานที่สามารถปล่อยออกมาได้ในโหมดการเริ่มเดินเครื่องจากหยุดนิ่งไปยังความเร็วสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 0.1758 วัตต์-ชั่วโมง ผ่านวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ดังนั้นวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์สามารถใช้งานได้ โดยสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะพุ่งขึ้นสูงเนื่องจากสถานะหยุดนิ่งของมอเตอร์ จำเป็นต้องใช้กำลังสูงมากเพื่อเริ่มหมุนอย่างรวดเร็วและต่อมามีการกระเพื่อม ต่อมาเมื่อรีเลย์ทำงาน กระแสไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวดตกลงเป็นศูนย์ กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นและเกิดการกระเพื่อม และจากการวัดอุณหภูมิของ อินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด พบว่าในระยะสั้นอุณหภูมิคงที่ และในระยะยาว อุณหภูมิของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการวัดของผู้ทดสอบ แสดงว่าระบบที่ทำการออกแบบมีเสถียรภาพทางความร้อนไม่เกิดการสะสมความร้อนในแหล่งจ่ายพลังงานและชุดควบคุม

จากการทดลองนี้หากแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว แบตเตอรี่จะรับภาระทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในการเริ่มขับเคลื่อนมอเตอร์ ทำให้ต้องจ่ายกระแสสูง เป็นผลให้เกิดความเสียหายแก่แบตเตอรี่และอายุการใช้งานสั้นลง ระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน จะช่วยให้แบตเตอรี่ไม่ต้องรับภาระทางไฟฟ้าในการเริ่มเดินเครื่อง ช่วยเพิ่มอายุการใช้งาน และประหยัดพลังงานของแบตเตอรี่

5.2 ปัญหาที่พบระหว่างดำเนินโครงการ

1. จากการทดลองเกิดการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากความผิดปกติจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในการทำให้ความเร็วคงที่ซึ่งมาจาก Hall sensor เฟส a เสียหาย
2. ค่ากระแสไฟฟ้าไม่ตกลงสู่ศูนย์เนื่องจากการตั้งค่าศูนย์ในโปรแกรม LABVIEW ไม่ดีทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ
3. วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์มีผลที่ผิวทำให้พลังงานไม่สามารถผ่านมาได้เต็มที่
4. การวัดอุณหภูมิเกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องด้วยวิธีการวัดใช้ sensor ตัวเดียวพลัดกันวัดที่ละจุดทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ

5.3 แนวทางการแก้ไขปัญหาและพัฒนา

1. เปลี่ยน Hall sensor เฟส a
2. ตั้งค่าศูนย์ในโปรแกรมใหม่ทุกครั้งก่อนทำการทดลอง
3. ใช้สายฝอยแทนการลากเส้นแผ่น PCB
4. ใช้ sensor วัดอุณหภูมิ 3 ชุดติดกับอุปกรณ์และแสดงผลแบบ real time เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนจากการเปลี่ยนตำแหน่งในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Elaheh Kowsari, **Ionic Liquids**, London, IntechOpen, 2015
- [2] Bo Long, Shin Teak Lim, Ji Hyoung Ryu and Kil To Chong, “Energy-Regenerative Braking Control of Electric Vehicles Using Three-Phase Brushless Direct-Current Motors”, ISSN, vol. 7, 2013, pp. 99-114
- [3] G.Maruthaipandian, S.Ramkumar, Dr.M.Muruganandam. “Design and Implementation of BLDC Motor Using Regenerative Braking for Electric Vehicle”. *IJAREEIE*, Vol. 4, Issue 2, 2015
- [4] Junyi Shen, Alireza Khaligh. “Design and Real-Time Controller Implementation for a Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, Issue. 5, 2016, pp. 1910-1918
- [5] ฉลิมล เรื่องพัฒนาวิวัฒน์และยุทธนา กั้นทะพะเยา. “การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับจักรยาน สามล้อไฟฟ้า” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, 2559, หน้า 1-6
- [6] Hu, Rui, "Battery Management System for Electric Vehicle Applications" (2011). *Electronic Theses and Dissertations*. 5007.
- [7] ดร.วรวิศ กอปรสิริพัฒน์, “สารพันความรู้ด้านพลังงาน” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ฉบับที่ 77, 2558, หน้า 51-57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการจัดการการกักเก็บพลังงานโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่

Energy Storage Management System based on Supercapacitor and Battery

รวิภาส ปานโชติ¹ และ สิริกาญญา บรรหารไชย²

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: rawiphas2224@gmail.com

บทคัดย่อ

ปฏิญานาพินธน์จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการทำงานของระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน โดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ ซึ่งคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดพบว่ามีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าช่วงสูงสูงกว่าแบตเตอรี่และมีความจุพลังงานสูงกว่าตัวเก็บประจุทั่วไป ทำให้สามารถนำมาช่วยในการทำงานของมอเตอร์บางโหมดการทำงานได้ โดยการนำวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดบuckคอนเวอร์เตอร์และรีเลย์ในการทำให้แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน 38 โวลต์ใช้การต่อแบบอนุกรม 10 ชุด ชุด 3 เซลล์(10S3P)พลังงาน 360 วัตต์-ชั่วโมง และตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิด EDLC 48 โวลต์ที่ใช้การต่อแบบอนุกรม 18 ชุด ชุด 1 เซลล์(18S1P) ความจุ 6.7 ฟารัดพลังงาน 2.4 วัตต์-ชั่วโมง ทำงานร่วมกันได้ และทำการวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ โดยแสดงผลด้วยโปรแกรม LABVIEW เป็นแท่งแรงดันไฟฟ้า 3 แท่งของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแต่ละชุด แท่งกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด 1 ชุด แท่งกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ 1 ชุด ในการวิจัยนี้ศึกษาการทำงานของมอเตอร์ 2 โหมดการทำงาน คือ 1. โหมดการเริ่มเดินเครื่อง 2. โหมดการขับเคลื่อนทั่วไป โดยในโหมดแรกพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขนาด 250 วัตต์ 24 โวลต์คือตัวเก็บประจุยิ่งยวด และในเวลา 1.5 วินาทีก่อนรีเลย์จะเลือกแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายให้กับมอเตอร์และขับเคลื่อนเป็นเวลา 24 วินาที จากการศึกษพบว่าเมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนพลังงานที่ตัวเก็บประจุจ่ายให้กับมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 0.1758 วัตต์-ชั่วโมง เมื่อรีเลย์ทำงานเกิดการกระเพื่อมของกระแสในแบตเตอรี่ ระบบมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิ

คำสำคัญ: ระบบจัดการการกักเก็บพลังงาน, ตัวเก็บประจุยิ่งยวด, แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน, มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

Abstract

The purpose of thesis is an experimental research of energy storage management system based on supercapacitor and battery. The research of supercapacitor is high power density and have energy density more than general capacitor based on standard cell voltage. It is cause of supercapacitor is used for cooperating with battery to supplying bldc motor. In this topology, we use buck converter for cooperating between lithium-ion battery 38 Volt (10S3P, 360 Wh) and EDLC Supercapacitor 48 Volt (18S1P, 6.7 Farad, 2.4 Wh). Data are analyzed using LABVIEW by supercapacitor voltage (1 tank per pack, each of tank is 16 Volt), supercapacitor current, and battery current. Data is recorded and sent to excel program for graphing and calculation. In this study, we study about 2 mode of driving: 1. Starting driving mode 2. Normal mode. In first mode, supercapacitor have had source to supply bldc motor 250 W 24 V for 1.5 seconds. Then, relay select battery for supplying bldc motor and have driven for 24 seconds. The result of experiment, supercapacitor supplied energy about 0.1758 Wh in first mode. When relay selected battery, battery current is oscillation. This system have stability of temperature

Keywords: Energy Storage Management System, Supercapacitor, Lithium-ion battery, Brushless DC Motor

บทนำ

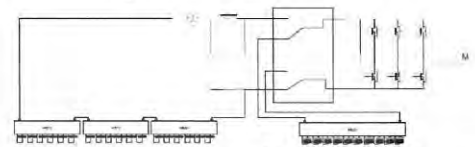
ปัจจุบันปัญหาภาวะมลพิษทางอากาศของไทยจากการจราจรที่แออัดในประเทศ ทำให้ประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณริมถนนหรือในเมืองที่แออัดเสี่ยงต่อการเป็นโรคในระบบทางเดินหายใจ จากการศึกษาปัญหาหมอกภาวะทางอากาศจากฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนในประเทศไทยพบว่า มีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นทุกปี โดยข้อมูลล่าสุดใน State of Global Air รายงานว่าปี 2561 ก่อเกิดการเสียชีวิตก่อนวัยอันควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

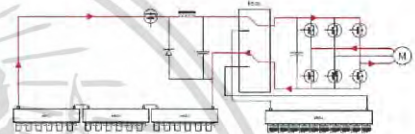
เนื่องจากมลพิษทางอากาศ 25,432 คน โดยฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนหลักๆที่เป็นผลทำให้เกิดมลพิษทางอากาศประกอบด้วย ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ไนโตรเจนไดออกไซด์(NO₂) คาร์บอนมอนอกไซด์(CO) ก๊าซโอโซน(O₃) โดยปริมาณปล่อยมลพิษทางอากาศจากการคมนาคมขนส่ง 50,240 คันต่อปี จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า หากเปลี่ยนรถเครื่องยนต์น้ำมันทั้งหมดเป็นรถไฟฟ้า จะช่วยลดปัญหาในการปล่อยมลพิษทางอากาศจากการคมนาคมได้ถึงปีละ 50,240 คัน ดังนั้นในอนาคตรถไฟฟ้าเป็นสิ่งที่เป็นสำหรับชีวิตที่ดีของประชาชนชาวไทย แต่เทคโนโลยีของรถไฟฟ้าในปัจจุบันยังไม่เป็นที่เพียงพอต่อการสร้างรถไฟฟ้าที่มีศักยภาพสูง หนึ่งในปัญหานั้นคือเรื่องของกำลังในการจ่ายโหลดช่วงขณะ เนื่องด้วยแบตเตอรี่ปัจจุบันมีความสามารถที่จะทำงานในโหมดที่ใช้กำลังในการจ่ายโหลดช่วงขณะที่สูงได้แต่เกิดการดึงกระแสหนักเป็นเหตุให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลงและจำเป็นต้องใช้ขนาดของแบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการกำลังในการจ่ายโหลดช่วงขณะ จากการศึกษาคิวเก็บประจุยิ่งยวดพบว่า มีความสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าช่วงขณะได้สูงและมีความจุพลังงานมากกว่าคิวเก็บประจุทั่วไป จึงได้ทำการศึกษาและพัฒนากระบวนการจัดการการกักเก็บพลังงานขึ้น ระบบการจัดการการเก็บพลังงานไฟฟ้า(energy storage management system) ในที่นี้คือระบบการจัดการพลังงานตามโหมดการทำงานของมอเตอร์ โดยมุ่งเน้นไปที่การลดพลังงานในแบตเตอรี่ โดยในปริิณยานิพนธ์นี้เร้าให้ความสนใจไปที่คิวเก็บประจุยิ่งยวด(supercapacitor)เป็นแหล่งเก็บพลังงานสำหรับกำลังไฟฟ้าช่วงขณะของรถไฟฟ้า และแหล่งพลังงานหลักเป็นแบตเตอรี่ เนื่องด้วย โหลดทางกลของรถไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติทนแรงจล ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน (Li-ion battery) สามารถทำงานตามโหมดการทำงานของมอเตอร์นั้นได้และมีข้อดีในเรื่อง แรงดันไฟฟ้าคงที่ตอนการปลดปล่อยพลังงานจนกว่าพลังงานจะหมด อายุการใช้งานยาวนาน และมีความจุพลังงานที่มากกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ จึงเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับงานวิจัยนี้ แต่ในบางโหมดของรถยนต์แบตเตอรี่ไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านกำลังการจ่ายโหลด(power density)เช่น โหมดในการเริ่มเดินเครื่อง หรือการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างรวดเร็ว หากทำงานในโหมดเหล่านี้ก็จะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง ด้วยเหตุนี้คิวเก็บประจุยิ่งยวด(supercapacitor)จึงถูกนำมาใช้ร่วมกับแบตเตอรี่ เพื่อทำงานในโหมดดังกล่าว คิวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดมีกำลังการจ่ายโหลด(power density)ที่สูง เมื่อนำมาใช้ร่วมกับแบตเตอรี่จะช่วยชดเชยกำลังการจ่ายโหลด(power density)ที่ต่ำ โดยเราจะเรียกระบบที่ใช้แบตเตอรี่ร่วมกับคิวเก็บประจุยิ่งยวดว่า ระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน(Energy Storage Management System)

ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

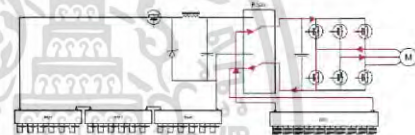
ในปริิณยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์ 2 โหมดการทำงาน คือ โหมดเริ่มเดินเครื่อง และ โหมดการขับเคลื่อนทั่วไป โดยรูปแบบของวงจรแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรกำลังระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน โดยคิวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่

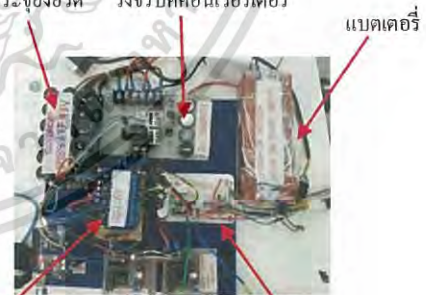


รูปที่ 2 โหมดเริ่มเดินเครื่องของวงจรกำลังการจัดการการกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 3 โหมดการขับเคลื่อนทั่วไปของวงจรกำลังการจัดการการกักเก็บพลังงาน

ในวงจรกำลังประกอบด้วยคิวเก็บประจุยิ่งยวด แบตเตอรี่ คิวเก็บประจุยิ่งยวด วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

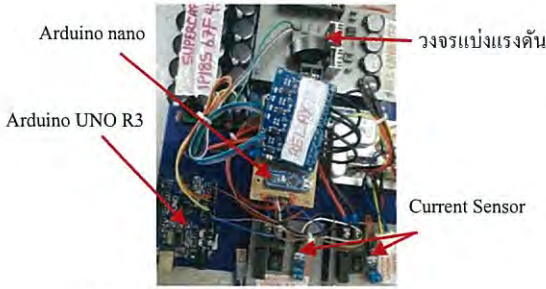


รีเลย์ อินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่

รูปที่ 2 วงจรการจัดการการกักเก็บพลังงาน

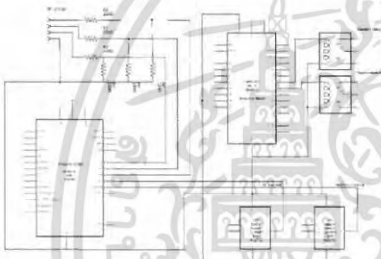
วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ รีเลย์ และอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 2 ในรูปที่ 2 นั้นมีวงจรควบคุมและวงจรวัดที่ประกอบด้วย วงจรระดับ Arduino UNO R3 Arduino nano current sensor แสดงในรูป 3 และมีแผนผังวงจรแสดงในรูปที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 วงจรควบคุมและวัดในวงจรระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน

แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน มีพิกัดดังตารางที่ 1 ซึ่งใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์ในโหมดการทำงาน การขับเคลื่อนทั่วไป การต่อแบตเตอรี่ จะต่อแบบอนุกรม 10 ชุดใน 1 ชุดจะมีการต่อขนาด 3 ชุดเพื่อเพิ่มความจุให้กับแบตเตอรี่ และในแต่ละชุดจะต่อเข้ากับชุด BMS เพื่อป้องกันกรณีการทำงานของแบตเตอรี่เกินขานความปลอดภัย



รูปที่ 4 แผนผังวงจรควบคุมและวัดในวงจรระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน

ตารางที่ 1 วงจรการต่อและลักษณะของแบตเตอรี่

ลักษณะของแบตเตอรี่	
ชนิด	ลิเทียม-ไอออน
แรงดันที่ขั้วต่อเซลล์	3.75 V
ความจุต่อเซลล์	3200 mAh
น้ำหนักต่อเซลล์	50 กรัม
จ่ายกระแสได้สูงสุด	6400 mAh
รูปแบบการต่อ	10S3P
ความจุ	9600 mAh
ความจุพลังงาน	360 Wh
ระบบป้องกัน	BMS
น้ำหนักโดยรวม	450 กรัม
ราคาต่อเซลล์	180 บาท
ราคาแบตเตอรี่ทั้งหมด	5400 บาท

วงจรและลักษณะของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการทดลองตัว

เก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิด EDLC ซึ่งมีพิกัดดังตารางที่ 2 ซึ่งใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานช่วงขณะให้แก่มอเตอร์ในโหมดการเริ่มเดินเครื่อง การต่อตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะต่อแบบอนุกรม 18 ชุดใน 1 ชุดจะมีการต่อขนาด 1 ชุดเพื่อเพิ่มระดับแรงดันให้กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด และ

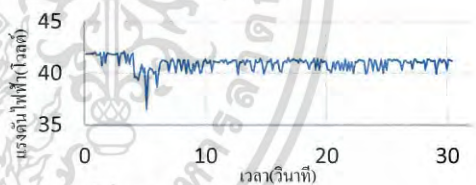
ในแต่ละชุดจะต่อเข้ากับชุด BMS เพื่อป้องกันกรณีการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเกินขานความปลอดภัย

ตารางที่ 2 วงจรและลักษณะของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ลักษณะของตัวเก็บประจุยิ่งยวด	
ชนิด	EDLC
แรงดันที่ขั้วต่อเซลล์	2.7 V
แรงดันที่ขั้ว	48 V
ค่าความเหนี่ยวนำต่อเซลล์	120 F
ค่าความเหนี่ยวนำ	6.7 F
ESR, 1kHz	10 mΩ
จ่ายกระแสต่อเนื่องได้สูงสุด	6.4 A
จ่ายกระแสค่ายอดสูงสุด	67.5 A
รูปแบบการต่อ	18S1P
ความจุพลังงาน	2.13 Wh
Life Cycle	500,000 cycle
อายุการใช้งาน	10 ปี
ระบบป้องกัน	BMS
น้ำหนักโดยรวม	378 กรัม
ราคาต่อเซลล์	180 บาท
ราคาตัวเก็บประจุยิ่งยวดทั้งหมด	3,240 บาท

ผลการทดลอง

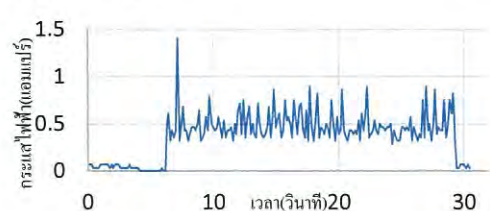
แรงดันไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวด



กระแสไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวด

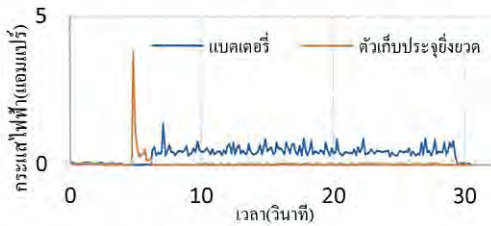


กระแสไฟฟ้าแบตเตอรี่

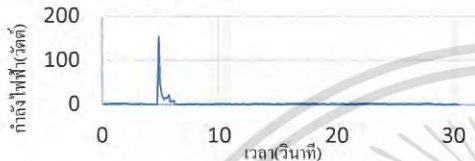


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

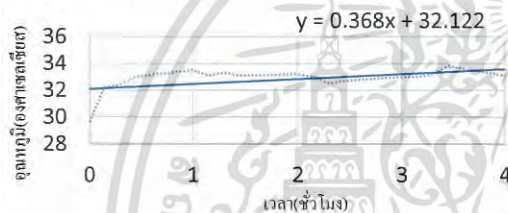
กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดตามโหมดการทำงานของมอเตอร์



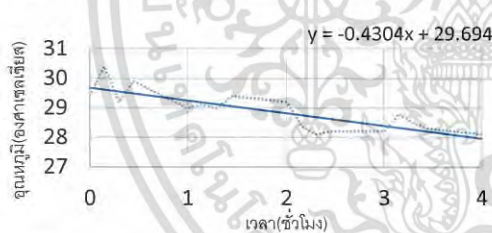
กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด



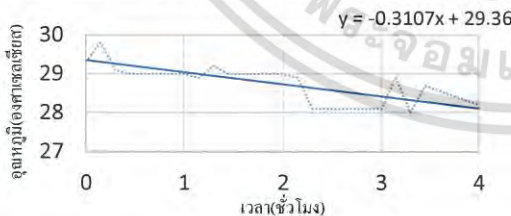
อุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์จากการขับมอเตอร์ต่อเนื่อง 4 ชั่วโมง



อุณหภูมิของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากการขับมอเตอร์ต่อเนื่อง 4 ชั่วโมง



อุณหภูมิของแบตเตอรี่จากการขับมอเตอร์ต่อเนื่อง 4 ชั่วโมง



สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการหมุนมอเตอร์ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถช่วยจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ในช่วงเริ่มเดินเครื่องได้จริง ซึ่งจากการทดลอง เมื่อมอเตอร์เริ่มขับเคลื่อน เกิดการดึงพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวด แรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะตกลงประมาณ 2 โวลต์และเพิ่มขึ้นเมื่อเริ่มทำงานให้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน การเริ่ม

เดินเครื่องหนึ่งครั้งทำให้แรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวดตกลงประมาณ 1 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่สภาวะไม่มีโหลดของมอเตอร์ที่การเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งไปความเร็วสูงสุดจะมีค่าประมาณ 0.4 แอมแปร์มีการพุ่งของกระแสไฟฟ้าขึ้นไปมีค่าประมาณ 4 แอมแปร์หรือประมาณ 10 เท่าของสภาวะคงตัว ซึ่งหากมอเตอร์ทำงานที่พิกัดโหลดแล้วเพิ่มความเร็วอย่างทันทีทันใดจากหยุดนิ่งไปสู่ความเร็วสูงสุดจะเกิดกำลังไฟฟ้าชั่วขณะสูงมาก โดยพลังงานที่สามารถปล่อยออกมาได้ในโหมดการเริ่มเดินเครื่องจากหยุดนิ่งไปยังความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.1758 วัตต์-ชั่วโมง ผ่านวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ดังนั้นวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์สามารถใช้งานได้ โดยสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะพุ่งขึ้นสูงเนื่องจากสภาวะหยุดนิ่งของมอเตอร์จำเป็นต้องใช้กำลังสูงมากเพื่อเริ่มหมุนอย่างรวดเร็วและต่อมามีการกระเพื่อม ต่อมาเมื่อเริ่มทำงานกระแสไฟฟ้าในตัวเก็บประจุยิ่งยวดตกลงเป็นศูนย์ กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นและเกิดการกระเพื่อม และจากการวัดอุณหภูมิของ อินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดพบว่าในระยะสั้นอุณหภูมิคงที่ และในระยะยาว อุณหภูมิของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการวัดของผู้ทดสอบ แสดงว่าระบบที่ทำการออกแบบมีเสถียรภาพทางความร้อนไม่เกิดการสะสมความร้อนในแหล่งจ่ายพลังงานและชุดควบคุม

จากการทดลองนี้หากแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว แบตเตอรี่จะรับภาระทาง ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในการเริ่มขับเคลื่อนมอเตอร์ ทำให้ต้องจ่ายกระแสสูง เป็นผลให้เกิดความเสียหายแก่แบตเตอรี่และอายุการใช้งานสั้นลง ระบบการจัดการการกักเก็บพลังงาน จะช่วยให้แบตเตอรี่ไม่ต้องรับภาระทางไฟฟ้าในการเริ่มเดินเครื่อง ช่วยเพิ่มอายุการใช้งาน และประหยัดพลังงานของแบตเตอรี่

เอกสารอ้างอิง

[1] Elaheh Kowsari, *Ionic Liquids*, London, IntechOpen, 2015
 [2] Bo Long, Shin Teak Lim, Ji Hyoung Ryu and Kil To Chong, "Energy-Regenerative Braking Control of Electric Vehicles Using Three-Phase Brushless Direct-Current Motors", ISSN, vol. 7, 2013, pp. 99-114
 [3] G.Maruthaipandian, S.Ramkumar, Dr.M.Muruganandam. "Design and Implementation of BLDC Motor Using Regenerative Braking for Electric Vehicle". *IJAREEIE*, Vol. 4, Issue 2, 2015
 [4] Junyi Shen, Alireza Khaligh. "Design and Real-Time Controller Implementation for a Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, Issue. 5, 2016, pp. 1910-1918

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



www.ti.com

NA555, NE555, SA555, SE555

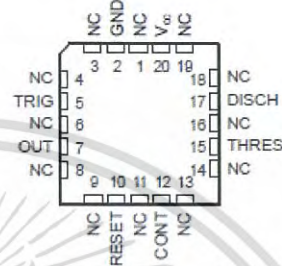
SLFG022I – SEPTEMBER 1973 – REVISED SEPTEMBER 2014

6 Pin Configuration and Functions

NA555...D OR P PACKAGE
NE555...D, P, PS, OR PW PACKAGE
SA555...D OR P PACKAGE
SE555...D, JG, OR P PACKAGE
(TOP VIEW)



SE555...FK PACKAGE
(TOP VIEW)



Pin Functions

NAME	PIN		I/O	DESCRIPTION
	D, P, PS, PW, JG	FK		
	NO.			
CONT	5	12	I/O	Controls comparator thresholds. Outputs 2/3 V _{CC} . allows bypass capacitor connection
DISCH	7	17	O	Open collector output to discharge timing capacitor
GND	1	2	-	Ground
NC		1, 3, 4, 6, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 18, 19	-	No internal connection
OUT	3	7	O	High current timer output signal
RESET	4	10	I	Active low reset input forces output and discharge low.
THRES	6	15	I	End of timing input. THRES > CONT sets output low and discharge low
TRIG	2	5	I	Start of timing input. TRIG < 1/2 CONT sets output high and discharge open
V _{CC}	8	20	-	Input supply voltage, 4.5 V to 18 V. (SE555 maximum is 18 V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



NA555, NE555, SA555, SE555

SLFS022I – SEPTEMBER 1973 – REVISED SEPTEMBER 2014

www.ti.com

7 Specifications

7.1 Absolute Maximum Ratings⁽¹⁾

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

		MIN	MAX	UNIT
V _{CC}	Supply voltage ⁽²⁾		18	V
V _i	Input voltage	CONT, RESET, THRES, TRIG		V _{CC} V
I _O	Output current		±225	mA
θ _{JA}	Package thermal impedance ⁽³⁾⁽⁴⁾	D package		97
		P package		85
		PS package		95
		PW package		149
θ _{JC}	Package thermal impedance ⁽⁵⁾⁽⁶⁾	FK package		5.81
		JG package		14.5
T _J	Operating virtual junction temperature		150	°C
	Case temperature for 60 s	FK package		200
	Lead temperature 1.6 mm (1/16 in) from case for 60 s	JG package		300

(1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions* is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

(2) All voltage values are with respect to GND.

(3) Maximum power dissipation is a function of T_{J(max)}, θ_{JA}, and T_A. The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is P_D = (T_{J(max)} - T_A) / θ_{JA}. Operating at the absolute maximum T_J of 150°C can affect reliability.

(4) The package thermal impedance is calculated in accordance with JEDEC 61-7.

(5) Maximum power dissipation is a function of T_{J(max)}, θ_{JC}, and T_C. The maximum allowable power dissipation at any allowable case temperature is P_D = (T_{J(max)} - T_C) / θ_{JC}. Operating at the absolute maximum T_J of 150°C can affect reliability.

(6) The package thermal impedance is calculated in accordance with MIL-STD-883.

7.2 Handling Ratings

PARAMETER	DEFINITION	MIN	MAX	UNIT
T _{stg}	Storage temperature range	-65	150	°C

7.3 Recommended Operating Conditions

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

			MIN	MAX	UNIT
V _{CC}	Supply voltage	NA555, NE555, SA555	4.5	18	V
		SE555	4.5	18	
V _i	Input voltage	CONT, RESET, THRES, and TRIG		V _{CC}	V
I _O	Output current			±200	mA
T _A	Operating free-air temperature	NA555		-40	105
		NE555		0	70
		SA555		-40	85
		SE555		-55	125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 Electrical Characteristics

$V_{CC} = 5\text{ V to }15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	SE555			NA555 NE555 SA555			UNIT	
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
THRES voltage level	$V_{CC} = 15\text{ V}$	9.4	10	10.6	8.8	10	11.2	V	
	$V_{CC} = 5\text{ V}$	2.7	3.3	4	2.4	3.3	4.2		
THRES current ⁽¹⁾		30	250		30	250	nA		
TRIG voltage level	$V_{CC} = 15\text{ V}$		4.8	5	5.2	4.5	5	5.6	V
		$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	3		6				
	$V_{CC} = 5\text{ V}$	1.45	1.67	1.9	1.1	1.67	2.2		
TRIG current	TRIG at 0 V		0.5	0.9		0.5	2	μA	
			0.3	0.7	1	0.3	0.7		1
RESET voltage level	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$			1.1				V	
RESET current	RESET at V_{CC}		0.1	0.4		0.1	0.4	mA	
	RESET at 0 V		-0.4	-1		-0.4	-1.5		
DISCH switch off-state current			20	100		20	100	nA	
DISCH switch on-state voltage	$V_{CC} = 5\text{ V}$, $I_O = 8\text{ mA}$				0.15	0.4		V	
CONT voltage (open circuit)	$V_{CC} = 15\text{ V}$	9.6	10	10.4	9	10	11	V	
	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	9.6		10.4					
	$V_{CC} = 5\text{ V}$	2.6	3.3	3.8	2.6	3.3	4	V	
	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	2.9		3.8					
Low-level output voltage	$V_{CC} = 15\text{ V}$, $I_{OL} = 10\text{ mA}$		0.1	0.15		0.1	0.25	V	
	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$			0.2					
	$V_{CC} = 15\text{ V}$, $I_{OL} = 50\text{ mA}$		0.4	0.6		0.4	0.75		
	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$			1					
	$V_{CC} = 15\text{ V}$, $I_{OL} = 100\text{ mA}$		2	2.2		2	2.5		
	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$			2.7					
	$V_{CC} = 15\text{ V}$, $I_{OL} = 200\text{ mA}$		2.5			2.5			
	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$			0.35					
High-level output voltage	$V_{CC} = 15\text{ V}$, $I_{OH} = -100\text{ mA}$	13	13.3		12.75	13.3		V	
	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	12							
	$V_{CC} = 15\text{ V}$, $I_{OH} = -200\text{ mA}$		12.5			12.5			
	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	3	3.3		2.75	3.3			
Supply current	Output low, No load	$V_{CC} = 15\text{ V}$	10	12		10	15	mA	
		$V_{CC} = 5\text{ V}$	3	5		3	6		
	Output high, No load	$V_{CC} = 15\text{ V}$	9	10		9	13		
		$V_{CC} = 5\text{ V}$	2	4		2	5		

(1) This parameter influences the maximum value of the timing resistors R_A and R_B in the circuit of Figure 12. For example, when $V_{CC} = 5\text{ V}$, the maximum value is $R = R_A + R_B \approx 3.4\text{ M}\Omega$, and for $V_{CC} = 15\text{ V}$, the maximum value is $10\text{ M}\Omega$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NA555, NE555, SA555, SE555

SLF9022I—SEPTEMBER 1973—REVISED SEPTEMBER 2014

www.ti.com

7.5 Operating Characteristics $V_{CC} = 5\text{ V to }15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

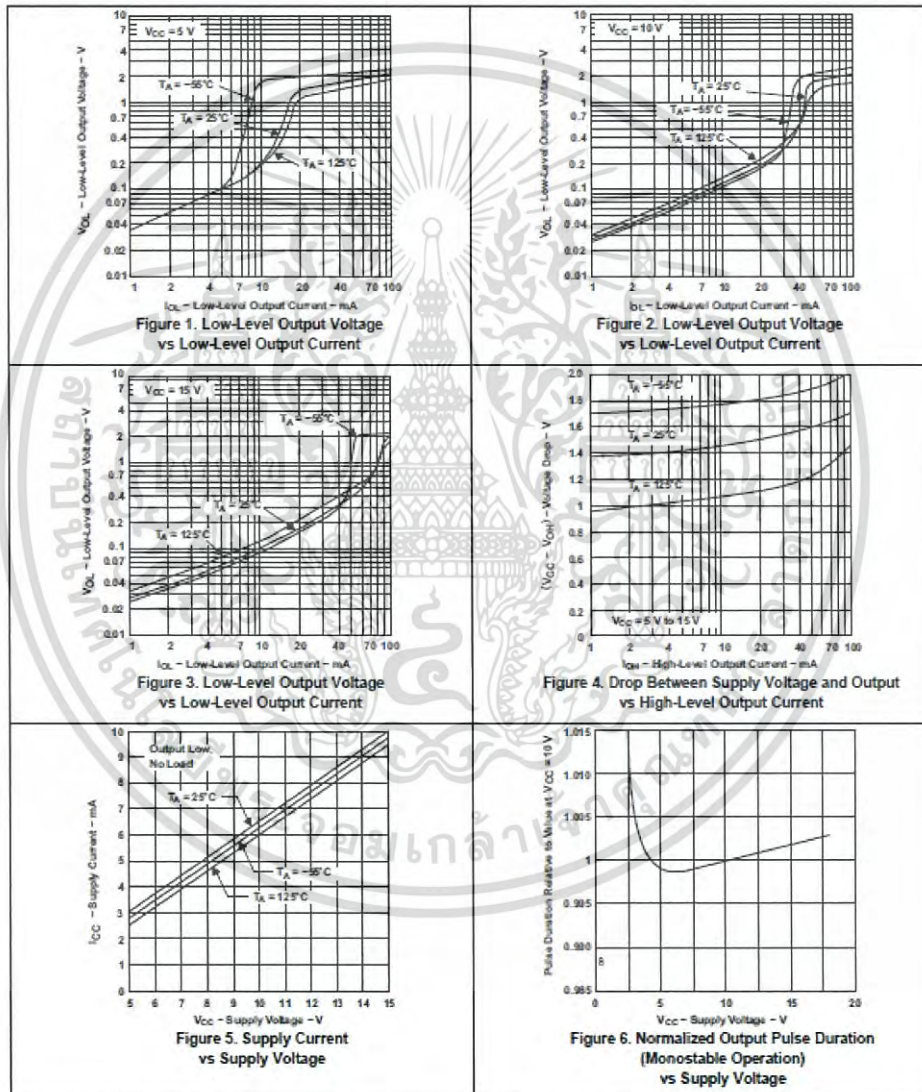
PARAMETER		TEST CONDITIONS ⁽¹⁾	SE555			NA555 NE555 SA555			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Initial error of timing interval ⁽²⁾	Each timer, monostable ⁽³⁾	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.5	1.5 ⁽⁴⁾		1	3	%	
	Each timer, astable ⁽⁵⁾		1.5		2.25				
Temperature coefficient of timing interval	Each timer, monostable ⁽³⁾	$T_A = \text{MIN to MAX}$	30	100 ⁽⁴⁾		50		ppm/ °C	
	Each timer, astable ⁽⁵⁾		90		150				
Supply-voltage sensitivity of timing interval	Each timer, monostable ⁽³⁾	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.05	0.2 ⁽⁴⁾		0.1	0.5	%/V	
	Each timer, astable ⁽⁵⁾		0.15		0.3				
Output-pulse rise time		$C_L = 15\text{ pF}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	100	200 ⁽⁴⁾		100	300	ns	
Output-pulse fall time		$C_L = 15\text{ pF}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	100	200 ⁽⁴⁾		100	300	ns	

- (1) For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.
(2) Timing interval error is defined as the difference between the measured value and the average value of a random sample from each process run.
(3) Values specified are for a device in a monostable circuit similar to Figure 9, with the following component values: $R_A = 2\text{ k}\Omega$ to $100\text{ k}\Omega$, $C = 0.1\text{ }\mu\text{F}$.
(4) On products compliant to MIL-PRF-38535, this parameter is not production tested.
(5) Values specified are for a device in an astable circuit similar to Figure 12, with the following component values: $R_A = 1\text{ k}\Omega$ to $100\text{ k}\Omega$, $C = 0.1\text{ }\mu\text{F}$.

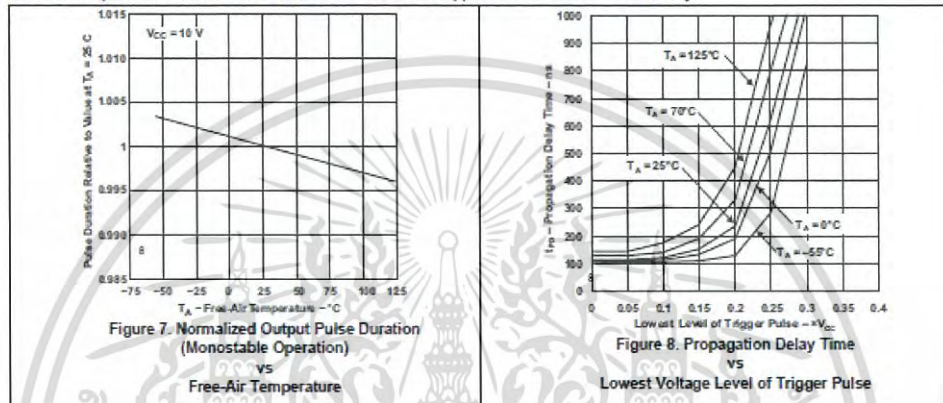
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.6 Typical Characteristics

Data for temperatures below -40°C and above 105°C are applicable for SE555 circuits only.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Characteristics (continued)Data for temperatures below -40°C and above 105°C are applicable for SE555 circuits only.

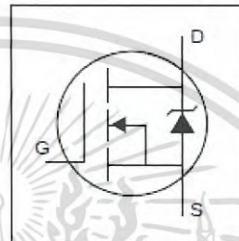
International IR Rectifier

PD - 9.1383A

IRFP064N

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated

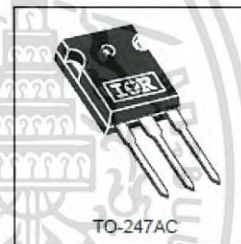


$V_{DSS} = 55V$
 $R_{DS(on)} = 0.008\Omega$
 $I_D = 110A\text{@}$

Description

Fifth Generation HEXFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole.



TO-247AC

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	110 @	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	80 @	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①②	390	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	200	W
	Linear Derating Factor	1.3	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ③④	480	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ⑤	59	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ⑥	20	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ⑦⑧	5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lb*in (1.1N*m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.75	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	40	

8/25/97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP064N

International
IR RectifierElectrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.057	—	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1mA$ Ⓞ
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.008	Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 59A$ Ⓞ
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	42	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 59A$ Ⓞ
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$ $V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{DS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	170	nC	$I_D = 59A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	32	nC	$V_{DS} = 44V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	74	nC	$V_{GS} = 10V$, See Fig. 6 and 13 ⓄⓄ
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	14	—	ns	$V_{DD} = 28V$
t_r	Rise Time	—	100	—	ns	$I_D = 59A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	43	—	ns	$R_G = 2.5\Omega$
t_f	Fall Time	—	70	—	ns	$R_D = 0.39\Omega$, See Fig. 10 ⓄⓄ
L_D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	13	—	nH	
C_{iss}	Input Capacitance	—	4000	—	pF	$V_{DS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	1300	—	pF	$V_{DS} = 25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	480	—	pF	$f = 1.0MHz$, See Fig. 5Ⓞ

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	110	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) Ⓞ	—	—	390	A	
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 59A, V_{GS} = 0V$ Ⓞ
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	110	170	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 59A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	450	680	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ⓄⓄ

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② $V_{DD} = 25V$, starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 190\mu H$
 $R_G = 25\Omega$, $I_{AS} = 59A$. (See Figure 12)
- ③ $I_{SD} \leq 59A$, $di/dt \leq 290A/\mu s$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$,
 $T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- Ⓞ Pulse width $\leq 300\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.
- ⓄⓄ Uses IRF3205 data and test conditions
- ⓄⓄ Calculated continuous current based on maximum allowable junction temperature; for recommended current-handling of the package refer to Design Tip # 93-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR

November 2013

ISL9R3060G2, ISL9R3060P2

30 A, 600 V, STEALTH™ Diode

Features

- Stealth Recovery $t_r = 38\text{ns}$ (@ $I_F = 30\text{ A}$)
- Max Forward Voltage, $V_F = 2.4\text{ V}$ (@ $T_C = 25^\circ\text{C}$)
- 600 V Reverse Voltage and High Reliability
- Avalanche Energy Rated
- RoHS Compliant

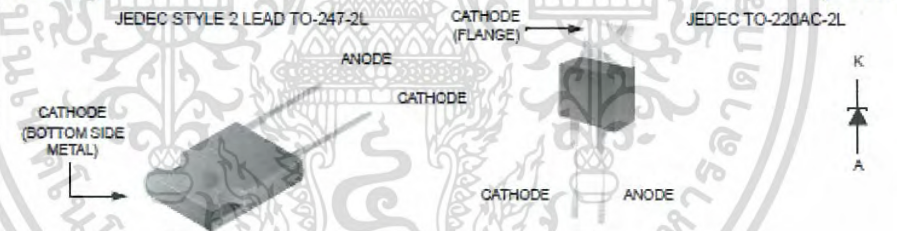
Applications

- SMPS
- Hard Switched PFC Boost Diode
- UPS Free Wheeling Diode
- Motor Drive FWD
- SMPS FWD
- Snubber Diode

Description

The ISL9R3060G2, ISL9R3060P2 is a STEALTH™ diode optimized for low loss performance in high frequency hard switched applications. The STEALTH™ family exhibits low reverse recovery current (I_{rr}) and exceptionally soft recovery under typical operating conditions. This device is intended for use as a free wheeling or boost diode in power supplies and other power switching applications. The low I_{rr} and short t_a phase reduce loss in switching transistors. The soft recovery minimizes ringing, expanding the range of conditions under which the diode may be operated without the use of additional snubber circuitry. Consider using the STEALTH™ diode with an SMPS IGBT to provide the most efficient and highest power density design at lower cost.

Package



Device Maximum Ratings $T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Ratings	Unit
V_{RRM}	Peak Repetitive Reverse Voltage	600	V
V_{RWM}	Working Peak Reverse Voltage	600	V
V_R	DC Blocking Voltage	600	V
$I_{F(AV)}$	Average Rectified Forward Current	30	A
I_{FRM}	Repetitive Peak Surge Current (20kHz Square Wave)	70	A
I_{FSM}	Nonrepetitive Peak Surge Current (Halfwave 1 Phase 60Hz)	325	A
P_D	Power Dissipation	200	W
E_{AVL}	Avalanche Energy (1A, 40mH)	20	mJ
T_J, T_{STG}	Operating and Storage Temperature Range	-55 to 175	$^\circ\text{C}$
T_L	Maximum Temperature for Soldering	300	$^\circ\text{C}$
T_{PKG}	Leads at 0.063in (1.6mm) from Case for 10s Package Body for 10s, See Techbrief TB334	260	$^\circ\text{C}$

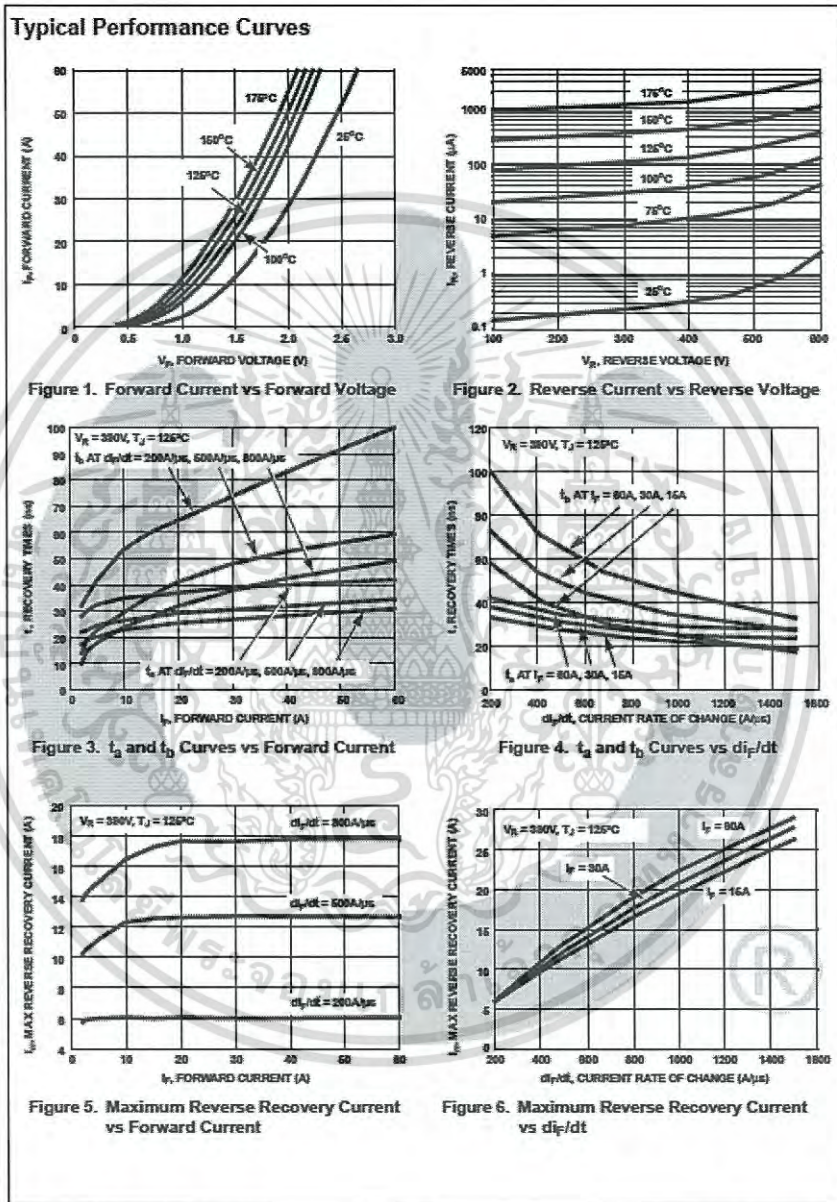
CAUTION: Stresses above those listed in "Device Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Package Marking and Ordering Information						
Part Number	Top Mark	Package	Packing Method	Reel Size	Tape Width	Quantity
ISL9R3060G2	ISL9R3060G2	TO-247-2L	Tube	N/A	N/A	30
ISL9R3060P2	ISL9R3060P2	TO-220AC-2L	Tube	N/A	N/A	50

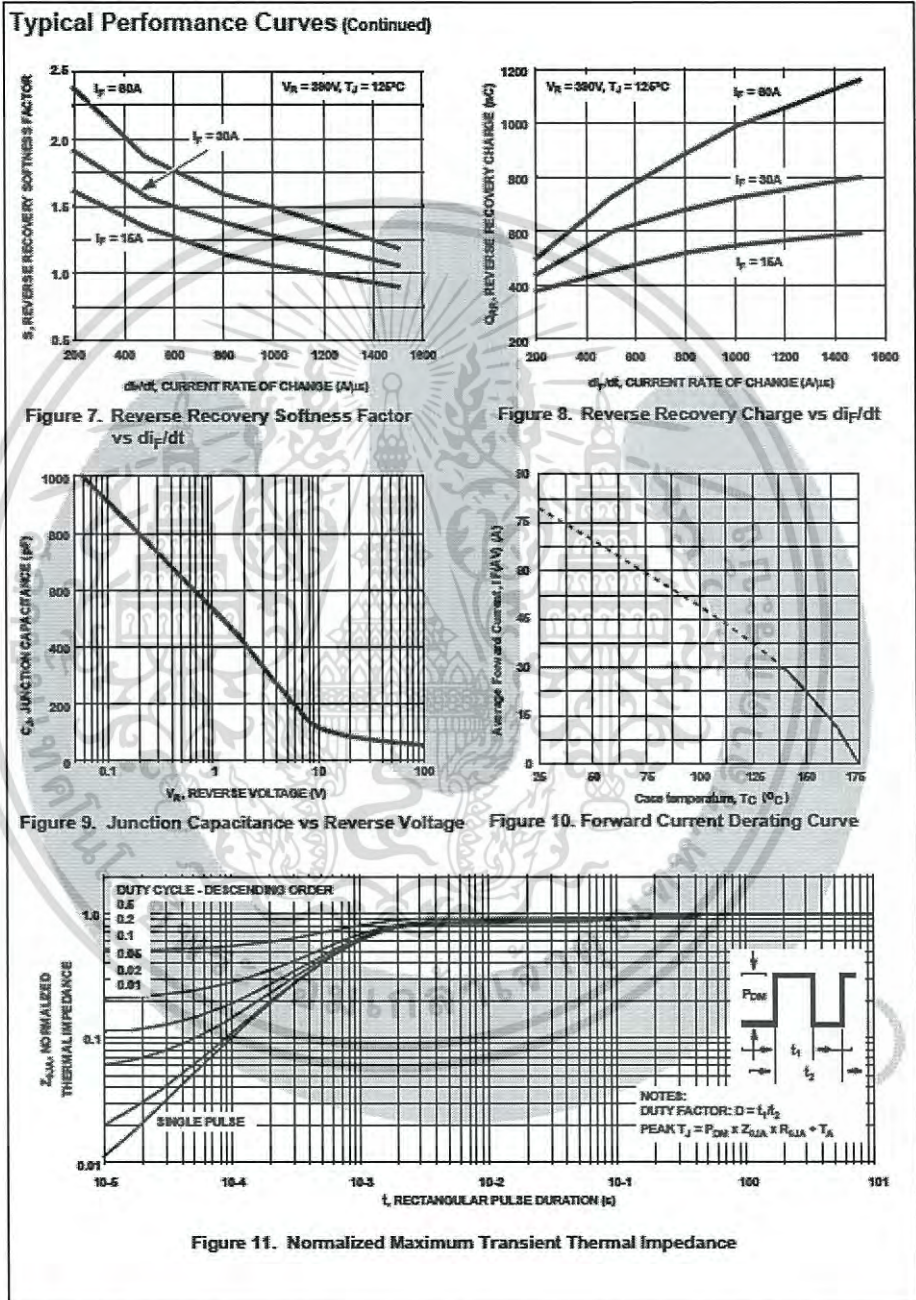
Electrical Characteristics $T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted						
Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Off State Characteristics						
I_R	Instantaneous Reverse Current	$V_R = 600\text{ V}$	$T_C = 25^\circ\text{C}$	-	-	100 μA
			$T_C = 125^\circ\text{C}$	-	-	1.0 mA
On State Characteristics						
V_F	Instantaneous Forward Voltage	$I_F = 30\text{ A}$	$T_C = 25^\circ\text{C}$	-	2.1	2.4 V
			$T_C = 125^\circ\text{C}$	-	1.7	2.1 V
Dynamic Characteristics						
C_J	Junction Capacitance	$V_R = 10\text{ V}, I_F = 0\text{ A}$	-	120	-	pF
Switching Characteristics						
t_{rr}	Reverse Recovery Time	$I_F = 1\text{ A}, di_F/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}, V_R = 30\text{ V}$ $I_F = 30\text{ A}, di_F/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}, V_R = 30\text{ V}$	-	27	35	ns
			-	36	45	ns
t_{rr}	Reverse Recovery Time	$I_F = 30\text{ A}, di_F/dt = 200\text{ A}/\mu\text{s}, V_R = 300\text{ V}, T_C = 25^\circ\text{C}$	-	36	-	ns
I_{rr}	Reverse Recovery Current	$I_F = 30\text{ A}, di_F/dt = 200\text{ A}/\mu\text{s}, V_R = 300\text{ V}, T_C = 25^\circ\text{C}$	-	2.9	-	A
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	$I_F = 30\text{ A}, di_F/dt = 200\text{ A}/\mu\text{s}, V_R = 300\text{ V}, T_C = 25^\circ\text{C}$	-	55	-	nC
t_{rr}	Reverse Recovery Time	$I_F = 30\text{ A}, di_F/dt = 200\text{ A}/\mu\text{s}, V_R = 300\text{ V}, T_C = 125^\circ\text{C}$	-	110	-	ns
S	Softness Factor (t_{tr}/t_{rr})	$I_F = 30\text{ A}, di_F/dt = 200\text{ A}/\mu\text{s}, V_R = 300\text{ V}, T_C = 125^\circ\text{C}$	-	1.9	-	-
I_{rr}	Reverse Recovery Current	$I_F = 30\text{ A}, di_F/dt = 200\text{ A}/\mu\text{s}, V_R = 300\text{ V}, T_C = 125^\circ\text{C}$	-	6	-	A
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	$I_F = 30\text{ A}, di_F/dt = 200\text{ A}/\mu\text{s}, V_R = 300\text{ V}, T_C = 125^\circ\text{C}$	-	450	-	nC
t_{rr}	Reverse Recovery Time	$I_F = 30\text{ A}, di_F/dt = 1000\text{ A}/\mu\text{s}, V_R = 300\text{ V}, T_C = 125^\circ\text{C}$	-	60	-	ns
S	Softness Factor (t_{tr}/t_{rr})	$I_F = 30\text{ A}, di_F/dt = 1000\text{ A}/\mu\text{s}, V_R = 300\text{ V}, T_C = 125^\circ\text{C}$	-	1.25	-	-
I_{rr}	Reverse Recovery Current	$I_F = 30\text{ A}, di_F/dt = 1000\text{ A}/\mu\text{s}, V_R = 300\text{ V}, T_C = 125^\circ\text{C}$	-	21	-	A
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	$I_F = 30\text{ A}, di_F/dt = 1000\text{ A}/\mu\text{s}, V_R = 300\text{ V}, T_C = 125^\circ\text{C}$	-	730	-	nC
di_{rr}/dt	Maximum di/dt during t_{tr}	$I_F = 30\text{ A}, di_F/dt = 1000\text{ A}/\mu\text{s}, V_R = 300\text{ V}, T_C = 125^\circ\text{C}$	-	800	-	A/ μs
Thermal Characteristics						
$R_{\theta JC}$	Thermal Resistance Junction to Case		-	-	0.75	$^\circ\text{C}/\text{W}$
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance Junction to Ambient	TO-247	-	-	30	$^\circ\text{C}/\text{W}$
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance Junction to Ambient	TO-220	-	-	62	$^\circ\text{C}/\text{W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



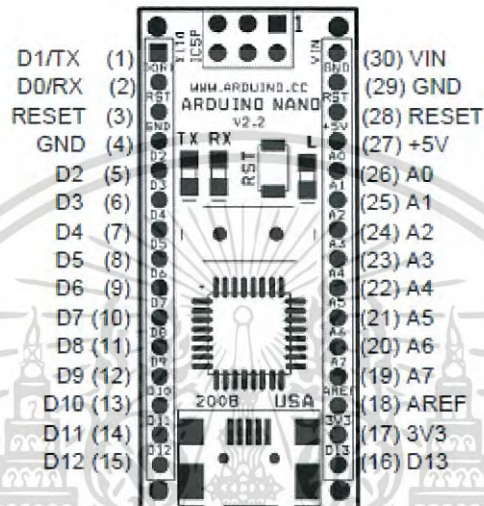
ISL9R3060G2, ISL9R3060P2 — STEALTH™ Diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Arduino Nano Pin Layout



Pin No.	Name	Type	Description
1-2, 5-16	D0-D13	I/O	Digital input/output port 0 to 13
3, 28	RESET	Input	Reset (active low)
4, 29	GND	PWR	Supply ground
17	3V3	Output	+3.3V output (from FTDI)
18	AREF	Input	ADC reference
19-26	A7-A0	Input	Analog input channel 0 to 7
27	+5V	Output or Input	+5V output (from on-board regulator) or +5V (input from external power supply)
30	VIN	PWR	Supply voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Technical Specification

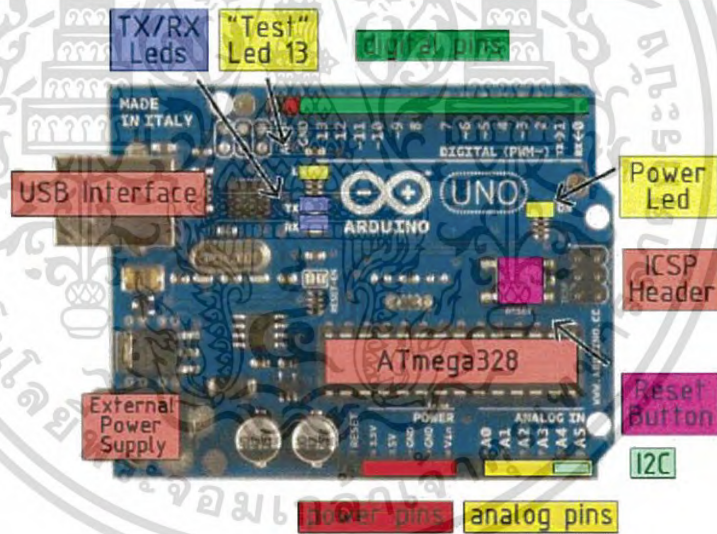


EAGLE files: [arduino-dumilanyar-uno-design.zip](#) Schematic: [arduino-uno-schematic.pdf](#)

Summary

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz

the board



radiospares

RADIONICS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Green-Cap (ELECTRIC DOUBLE LAYER CAPACITORS)



DM Green-Cap Module

- Low internal resistance
- Balancing and overvoltage protection of individual cell
- Efficient heat Transfer to outside
- Compliant with RoHS requirement

Application

- Next Generation Vehicle(FCEV,HEV) & Heavy Duty Transportation
- Short term UPS and telecommunications
- Portable Power Tool
- Wind Turbine Pitch System
- Electric Scooter
- Heavy Duty Transportation
- Golf Car



Green-Cap(EDLC)

Product & Spec.

Item	Characteristics	
Capacitance tolerance	0% ~ +20% at 20°C	
Operating temperature range	-40 ~ 60°C	
Storage Temperature Range	-40 ~ 70°C	
Low temperature characteristics	Capacitance change	Within +5% of initial value at +20°C
	Internal resistance	Within 150% of initial value at +20°C
Endurance(60°C)	Test time	1000 hours
	Capacitance change	Within ±30% of initial specified value
	Internal resistance	Within 100% of initial specified value
Shelf life (60°C)	After 1000 hours no load test same as endurance	
Life Time at RT ⁽¹⁾	10 years	(1) I.D.CI < 90% and ΔESR < 200% of initially specified value, respectively and LC < specified value (2) Cycle : between rated voltage and half rated voltage under constant current at 25°C
Cycle Life (25°C) ⁽²⁾	500,000 cycles	

Part Number	Rated Voltage	Max. Operating Voltage	Capacitance (F)	ESR, 1KHz (mΩ)	ESR, DC (mΩ)	Max. Continuous Current (A)	Max. Peak Current (A)	Stored Energy (Wh)	Specific Energy (Wh/kg)	Cell Composition		Dimension(mm)			Weight (kg)
										ITEM	EA	L	W	T	
DM00500015W01002	5	5.4	1.5	110	143	0.2	3.1	0.005	1.47	2.7V 3F	2	23	10	18	0.0034
DM00500025W01002	5	5.4	2.5	53	69	0.3	5.3	0.009	1.80	2.7V 5F	2	23	12	22	0.005
DM01500666W01006	15	16.2	66.6	18	30	20	167	2.43	4.05	2.7V 400F	6	117	81	80	0.6
DM01502883W01006	15	16.2	288.3	9	10	85	571	10.33	3.03	2.7V 1700F	6	205	113	176	5
DM02501700W01010	25	27	170	15	16	85	571	17.21	2.06	2.7V 1700F	10	263	108	198	8.2
DM04501666W01018	45	48.6	166.6	14.5	18	150	938	54.68	3.90	2.7V 3000F	18	446	195	198	14
DM10000025W01040	100	108	2.5	400	520	5	54	4.05	4.70	2.7V 100F	40	200	140	52	0.86
DM35000214W01140	350	378	21.4	112	140	150	938	425.20	2.83	2.7V 3000F	140	1000	684	230	150

Note: Other Green-Cap modules are supplied on custom-made basis. Dimension and Weight could be changed without notice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	ICR18650-32A	Version No.	1.0
-----------	--------------	-------------	-----

1. Scope

This product specification has been prepared to specify the rechargeable lithium-ion cell ('cell') to be supplied to the customer by Samsung SDI Co., Ltd.

2. Description and Model

- 2.1 Description Cell (lithium-ion rechargeable cell)
 2.2 Model ICR18650-32A

3. Nominal Specifications

Item	Specification
3.1 Nominal Capacity	3200 mAh (0.2 C, 2.75 V discharge)
3.2 Minimum Capacity	3100 mAh (0.2 C, 2.75 V discharge)
3.3 Charging Voltage	4.35 ±0.03 V
3.4 Nominal Voltage	3.75
3.5 Charging Method	CC-CV (constant voltage with limited current)
3.6 Charging Current	Standard charge: 1600 mA Rapid charge : 3200 mA
3.7 Charging Time	Standard charge : 3 hours Rapid charge : 2.5 hours
3.8 Max. Charge Current	3200mA(ambient temperature 25 ℃)
3.9 Max. Discharge Current	6400mA(ambient temperature 25 ℃)
3.10 Discharge Cut-off Voltage	2.75 V
3.11 Cell Weight	50.0 g max
3.12 Cell Dimension	Height : 65.00 mm max Diameter : 18.40 mm max
3.13 Operating Temperature	Charge : 0 to 45 ℃ Discharge: -20 to 60 ℃
3.14 Storage Temperature	1 year : -20~25 ℃(1*) 3 months : -20~45 ℃(1*) 1 month : -20~50 ℃(1*)

Note (1): If the cell is kept as ex-factory status (50 % of charge),
 the capacity recovery rate is more than 80 %.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นาย รวิภาส ปานโชติ จบการศึกษาระดับ ประถมที่โรงเรียน อนุบาลเพชรบูรณ์
จังหวัดเพชรบูรณ์ จบการศึกษาระดับมัธยมต้นที่โรงเรียน เพชรพิทยาคม
จังหวัดเพชรบูรณ์จบการศึกษาระดับมัธยมปลายที่โรงเรียน เพชรพิทยาคม
จังหวัดเพชรบูรณ์ กำลังจะสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตร
วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า



นางสาวสิริกัญญา บรรหารไชย จบการศึกษาระดับ ประถมที่โรงเรียน
เทศบาล3(ชาญวิทยา) จังหวัดเพชรบูรณ์ จบการศึกษาระดับมัธยมต้นที่โรงเรียน
วิทยานุกูลนารี จังหวัดเพชรบูรณ์จบการศึกษาระดับมัธยมปลายที่โรงเรียน
เพชรพิทยาคม จังหวัดเพชรบูรณ์ กำลังจะสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้