

การออกแบบระบบจัดเก็บพลังงานไฮบริดด้วยซูเปอร์คาปาซิเตอร์
สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

DESIGN OF A HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM
WITH SUPERCAPACITORS FOR ELECTRIC VEHICLES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF A HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM
WITH SUPERCAPACITORS FOR ELECTRIC VEHICLES



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

2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2565

การออกแบบระบบจัดเก็บพลังงานไฮบริดด้วยซูเปอร์คาปาซิเตอร์สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

DESIGN OF A HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM
WITH SUPERCAPACITORS FOR ELECTRIC VEHICLES



นางสาวสุดารัตน์ ผิวขาว
นายอภิวัฒน์ ดิษฐคำเรียง
นายอินอาม สติตานนท์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2565

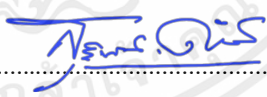
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบระบบจัดเก็บพลังงานไฮบริดด้วยซูเปอร์คาปาซิเตอร์สำหรับ
รถยนต์ไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นางสาวสุตารัตน์ ผิวขาว
2. นายอภิวัฒน์ ดิษฐคำเรือง
3. นายอิณอาม สถิตานนท์


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบระบบจัดเก็บพลังงานแบบผสมผสาน
ด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

นางสาวสุศรัทธน์ ผิวขาว
นายอภิวัฒน์ ดิษฐคำเรือง
นายอินทาม สถิตานนท์
ศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรตีซีตีซีคอนเวอร์เตอร์เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด คือ มีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการอัดและคายประจุได้รวดเร็ว ในทางกลับกันแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนนั้นมีข้อดีคือมีความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูง เป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ดี โดยในการผสมผสานทั้งสองแหล่งกักเก็บพลังงานจะประยุกต์ใช้วงจรตีซีตีซีคอนเวอร์เตอร์ ชนิดบู้ก-บูสต์ในการเชื่อมต่อ พิกัดคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอมีขนาดแรงดันที่ 96 โวลต์สามารถจ่ายกำลังได้สูงสุดที่ 10 กิโลวัตต์

DESIGN OF A HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM WITH SUPERCAPACITORS FOR ELECTRIC VEHICLES

Sudarat	Piwkhao	
Aphiwat	Ditthakhamroeng	
Inarm	sathitanon	
Prof. Dr. Surin	Khomfoi	Advisor
Asst. Prof. Chaitat	Maneeinn	Advisor
Year 2022		

ABSTRACT

This thesis presents an integrated energy storage system that combines a supercapacitor and a lithium-ion battery using a DC-DC converter circuit. The integration is based on the complementary properties of these two energy storage technologies. Supercapacitors are known for their high power density, which means they can charge and discharge quickly. On the other hand, lithium-ion batteries have a high energy density, allowing them to store electrical energy efficiently. By combining these two sources, we can achieve a system that benefits from both high power and energy densities. To facilitate the integration, a DC-DC converter circuit is employed. The proposed converter operates in a buck-boost configuration, allowing it to handle a voltage of 96 volts and supply a maximum power output of 10 kW. The buck-boost converter can adjust the voltage levels as required, ensuring efficient energy transfer between the supercapacitor and the lithium-ion battery. Overall, this integrated energy storage system offers the advantages of fast charging and discharging capabilities from the supercapacitor, along with the ability to store a significant amount of energy in the lithium-ion battery. The DC-DC converter plays a crucial role in managing the power flow between these two sources, enabling efficient and effective energy utilization.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาของ ศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยทัต มณีอินทร์ ที่กรุณาเป็นที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางการศึกษาวิจัย รวมถึงตรวจสอบความเรียบร้อยของปริญญานิพนธ์ จึงขอกราบ ขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

ขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้มอบวิชาความรู้ให้แก่กลุ่มของข้าพเจ้าตั้งแต่เริ่มเข้า ศึกษาปริญญาตรี

ขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยประยุกต์ใช้พลังงานทดแทน (REAL LAB) ที่เอื้อเพื่อสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในระหว่างการจัดทำงานวิจัย และขอขอบคุณนายพงษ์ศิริ มุ่งพร นักศึกษา ปริญญาเอก และนายณัฐพล สมบูรณ์ปัญญา นักศึกษาปริญญาโท ที่ช่วยให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือดูแลเอาใจใส่ในทุกด้านอย่างเต็มที่มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้กลุ่มของข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดคือ บิดา มารดา รวมถึงทุกคนในครอบครัว ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ทุกเวลา ทำให้กลุ่มของข้าพเจ้าสามารถ ทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำระลึกในพระคุณและกราบขอบ พระคุณ มา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 วิธีการใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 ระบบจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM: BESS)	5
2.3 แบตเตอรี่ (BATTERY)	5
2.4 ตัวเก็บประจุ (CAPACITOR)	13
2.5 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (SUPERCAPACITOR)	18
2.6 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC CONVERTER)	19
2.7 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า (VOLTAGE SENSORS)	27
2.8 วงจรตรวจจับกระแส (CURRENT SENSORS)	28
2.9 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (MICROCONTROLLERS)	29
2.10 SWITCHING POWER SUPPLY	30
2.11 ทรานซิสเตอร์เกตไบโพลาร์หุ้มฉนวน (ISOLATE GATE BIPOLAR TRANSISTOR: IGBT)	31
2.12 วงจรกำเนิดสัญญาณขับสวิตช์ (GATE DRIVE SIGNAL GENERATOR)	32
บทที่ 3 การออกแบบและการทดลอง	33
3.1 บทนำ	33
3.2 การออกแบบวงจรไฟฟ้าของแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน	33
3.3 การออกแบบวงจรกำลัง	34
3.4 การออกแบบวงจรอินเทอร์เฟซผ่านโปรแกรม MATLAB SIMULINK	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและตีพิมพ์อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5	การออกแบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของวงจรควบคุม	35
3.6	การออกแบบวงจรไฟฟ้ากำลังผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	35
3.7	การจำลองการทำงานของวงจรไฟฟ้ากำลังผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	36
3.8	FLOWCHART การทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง	40
3.9	สรุป	41
บทที่ 4	การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ	42
4.1	บทนำ	42
4.2	การออกแบบและสร้างชิ้นงานจริง	42
4.3	ชุดวงจรกำลัง	43
4.4	การออกแบบวงจรควบคุม	45
4.5	การออกแบบการเขียนโปรแกรมควบคุม	48
4.6	ค่า CHARACTERISTICS ของรถ UNICON1	49
4.7	สรุป	50
บทที่ 5	ผลการทดลอง	51
5.1	บทนำ	51
5.2	ผลการทดสอบ	51
5.3	สรุป	56
บทที่ 6	สรุปผลการทดลอง	57
6.1	บทสรุป	57
6.2	ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง	58
6.3	แนวทางการพัฒนา	58
อ้างอิง		59
ภาคผนวก		61
	ภาคผนวก ก เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์	62
	ภาคผนวก ข โปรแกรมที่ใช้ควบคุม	68
	ภาคผนวก ค ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์	72
	ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการ	81
ประวัติผู้เขียน		85

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แบตเตอรี่น้ำ (CONVENTIONAL BATTERY)	6
2.2 แบตเตอรี่แห้ง (SEALED MAINTENANCE FREE CAR BATTERY)	7
2.3 แบตเตอรี่กึ่งแห้ง (MAINTENANCE FREE CAR BATTERY)	8
2.4 แบตเตอรี่ไฮบริด (HYBRID BATTERY)	9
2.5 แบตเตอรี่เจล (GEL BATTERY)	10
2.6 แบตเตอรี่ AGM (ABSORBENT GLASS MATERIAL)	11
2.7 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (LITHIUM-ION BATTERY)	12
2.8 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ	14
2.9 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า	14
2.10 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก	15
2.11 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์	15
2.12 ตัวเก็บประจุแบบโพลีสไตรีน	16
2.13 ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม	16
2.14 ตัวเก็บประจุแบบไมลา	16
2.15 ตัวเก็บประจุแบบไบโพลาร์	17
2.16 ตัวเก็บประจุแบบโพลีโพรพิลีน	17
2.17 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้	18
2.18 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด	18
2.19 วงจรสมมูลของวงจรทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	19
2.20 วงจรการทำงานของวงจรทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	19
2.21 สัญญาณต่าง ๆ ของวงจรทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	20
2.22 วงจรสมมูลของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	23
2.23 วงจรการทำงานของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	23
2.24 สัญญาณต่าง ๆ ของวงจรทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	24
2.25 วงจร BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER ชนิด HALF-BRIDGE	26
2.26 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า	27
2.27 LEM LV25-P	27
2.28 วงจรตรวจจับกระแส	28
2.29 LEM LA 55-P	28
2.30 หน่วยประมวลผลรุ่น TMS320F28069	29
2.31 บล็อกการสร้างสัญญาณ PWM ผ่านโปรแกรม MATLAB	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและตัวอักษรอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.32 SWITCHING POWER SUPPLY	30
2.33 วงจรเบื้องต้นของ SWITCHING POWER SUPPLY	30
2.34 สวิตช์ IGBT รุ่น SKM100GB124D	31
2.35 วงจรกำเนิดสัญญาณซบสวิตช์	32
2.36 เครื่องกำเนิดสัญญาณซบสวิตช์	32
3.1 วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน	33
3.2 วงจร BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER ชนิด HALF-BRIDGE	34
3.3 การจำลองวงจรภายในของดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด และกริดของระบบ ผ่านโปรแกรม MATLAB SIMULINK	34
3.4 การจำลองการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของวงจรควบคุม	35
3.5 วงจร BUCK-BOOST CONVERTER สำหรับการเชื่อมต่อกันของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า แบบผสมผสาน ผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	36
3.6 การจำลองวงจรไฟฟ้ากำลัง ช่วงการอัดประจุจากเครื่องอัดประจุไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ ลิเทียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	36
3.7 การจำลองวงจรไฟฟ้ากำลัง ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด ไปยัง แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	37
3.8 การจำลองวงจรไฟฟ้ากำลัง ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด ไปยัง แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและภาระทางไฟฟ้า ผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	37
3.9 การจำลองวงจรไฟฟ้ากำลัง ช่วงการถ่ายโอนประจุจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ไปยัง ภาระทางไฟฟ้า ผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	38
3.10 การจำลองวงจรภายในของดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด และวงจรควบคุมแรงดันคงที่ ผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	38
3.11 การจำลองวงจรภายในของดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ระหว่างแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และวงจรควบคุมแรงดันคงที่ ผ่านโปรแกรม PSIM SIMULATION	39
3.12 กราฟผลการทดลองค่าแรงดันทางไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน	39
3.13 FLOWCHART การทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง	40
4.1 เครื่องต้นแบบทั้งหมด	42
4.2 ตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำ	45
4.3 บล็อกการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ในโปรแกรม MATLAB SIMULINK	48
4.4 ไดอะแกรมของวงจรควบคุม	49
4.5 กราฟแสดงอัตราการใช้แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า UNICON1 ขณะใช้งานจริง	49
4.6 กราฟแสดงอัตราการใช้กระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้า UNICON1 ขณะใช้งานจริง	50
5.1 กราฟการอัดประจุและการคายประจุของระบบกักเก็บพลังงาน	51

5.2 กราฟการอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากดีซีบัส	52
5.3 กราฟการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัส	53
5.4 กราฟสัญญาณ DUTY CYCLE ทำงานที่ 90 เปอร์เซ็นต์ เพื่อไปขับสวิตช์	53
5.5 กราฟสัญญาณ DUTY CYCLE ทำงานที่ 20 เปอร์เซ็นต์ เพื่อไปขับสวิตช์	54
5.6 กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดและดีซีบัสไปยังโหลด	54
5.7 กราฟแสดงกระแสไฟฟ้าที่จ่ายจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดและดีซีบัสไปยังโหลด	55



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1.1 แผนการดำเนินงาน

3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกได้ตระหนักถึงความสำคัญของการลดการใช้พลังงาน และการปลดปล่อยมลพิษในภาคขนส่งเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการหันมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนแทนการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นต้องมีการจัดเก็บอย่างเป็นระบบ ทำให้ต้องนำเทคโนโลยีระบบจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System หรือ BESS) เข้ามาใช้ในการกักเก็บพลังงาน โดยเทคโนโลยีนี้ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีแนวโน้มด้านราคาที่ลดลง ส่งผลให้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ร่วมกับ BESS เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมาก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการพัฒนารูปแบบการคมนาคมเข้าสู่สังคมการใช้ยานยนต์ไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น ในอนาคตยานยนต์ไฟฟ้ากำลังได้รับความนิยมสูงขึ้น อย่างมีนัยยะสำคัญ เนื่องจากเป็นพลังงานบริสุทธิ์ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม [1]

แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักที่มีการศึกษาและวิจัยเป็นจำนวนมาก เพื่อพัฒนาให้ยานยนต์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพการทำงานสูงที่สุด [2] ซึ่งประเด็นที่มีความสำคัญมากสำหรับเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า ก็คือการพัฒนากระบวนการประจุแบตเตอรี่อย่างรวดเร็วหรือที่เรียกกันว่า Fast Charge เพื่อที่จะตอบสนองความต้องการและลักษณะในการใช้งานที่ทำให้ระบบกักเก็บพลังงานมีคุณภาพมากขึ้น [3]

โครงการนี้จึงได้นำเสนอถึงการศึกษาการทำงานร่วมกันของแหล่งกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน (Hybrid Energy Storage System) เพื่อที่จะนำแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดมาเชื่อมต่อกันในรูปแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง สำหรับการนำไปใช้งานในรถไฟฟ้าต่อไป อีกทั้งยังได้ศึกษาคุณสมบัติในการทำงานของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อวิเคราะห์ผลการทำงานร่วมกัน ในการลดเวลาในการอัดประจุ และตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานรถไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการนำแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้งานร่วมกันในระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน
2. เพื่อศึกษาวงจรไฟฟ้าในการเชื่อมต่อกันของแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน
3. เพื่อศึกษาผลในการลดเวลาอัดประจุไฟฟ้า จากการใช้แหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสานแทนการใช้งานแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่แหล่งเดียว

1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

1. ศึกษาและออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC-DC converter) เพื่อใช้ในการทำงานร่วมกันของแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด
2. ศึกษาผลของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยโปรแกรม MATLAB

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

1. ศึกษาคุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion Battery) และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด (Ultracapacitor)
2. ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการใช้งานร่วมกันระหว่างแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด
3. ศึกษาถึงกระบวนการอัดประจุและการคายประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดที่นำมาใช้งานร่วมกัน
4. ศึกษาและออกแบบระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสานสำหรับการใช้งานร่วมกันของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด
5. ศึกษาและออกแบบวงจรอินเตอร์เฟสระหว่างแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้าประสิทธิภาพ
6. จำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม MATLAB
7. จัดเตรียมและจัดหาอุปกรณ์ในการทดลองและทำการออกแบบวงจรต้นแบบ
8. ทำการทดลองและสรุปผล
9. รวบรวมข้อมูลการทดลองและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

1.5 แผนการดำเนินโครงการงาน

ทางผู้จัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทำความเข้าใจในทฤษฎี ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ พร้อมทั้งดำเนินงานในส่วนของการทดสอบและออกแบบ โดยมีระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่ สิงหาคม 2565 ถึง พฤษภาคม 2566 รวมเป็นเวลา 10 เดือน โดยมีแผนการดำเนินโครงการงานดังนี้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้รู้คุณลักษณะของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด
2. ได้รู้คุณลักษณะของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง
3. สามารถนำข้อมูลคุณลักษณะที่ศึกษาได้มาออกแบบวงจรที่เชื่อมต่อกันระหว่างแหล่งกักเก็บไฟฟ้าแบบผสมผสาน ทำให้ได้แหล่งกักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง
4. ได้รู้ข้อมูลในการนำตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปใช้งานในแหล่งกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานเพื่อสามารถช่วยในการถ่ายโอนพลังงานสำรองในส่วนที่โหลดต้องการได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

โครงการนี้ได้ทำการออกแบบวงจรต้นแบบเพื่อให้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานนี้สามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่างแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้ โดยได้มีการศึกษาในเรื่องของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด และเนื้อหาองค์ความรู้เกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานที่จำเป็นต่อการศึกษานำตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาใช้ร่วมกับแบตเตอรี่ ดังนั้นโครงการนี้จึงมีทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.2 ระบบจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System: BESS)

ระบบจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ หรือ BESS นั้น ทำงานโดยการเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในรูปของพลังงานเคมี [4] แบตเตอรี่สำรองโดยทั่วไปจะประกอบด้วยชุดแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำ แบตเตอรี่ไฟฟ้าแต่ละเซลล์จะถูกเชื่อมต่อกันแบบขนานและแบบอนุกรมเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการ โดยในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์จะประกอบด้วยของเหลวที่เรียกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนของลิเทียมและอิเล็กตรอนของขั้วบวกและขั้วลบ [5] แบตเตอรี่จะถูกประจุไฟฟ้าเข้าไปโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีภายใน ซึ่งปฏิกิริยานี้สามารถย้อนกลับได้ ทำให้แบตเตอรี่สามารถคายประจุเพื่อส่งพลังงานที่ดูดซับไว้ออกมาใช้งานได้

จนถึงปัจจุบัน แบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ ได้รับการพัฒนาเพื่อใช้งานในเชิงพาณิชย์มากยิ่งขึ้น ได้แก่ แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (LA), นิกเกิลแคดเมียมแบตเตอรี่ (NiCd), แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮบริด (NiMH), ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ (Li-ion) และแบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) แต่ในโครงการนี้จะทำการศึกษาระบบจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

2.3 แบตเตอรี่ (Battery)

แบตเตอรี่ถือเป็นชิ้นส่วนสำคัญของรถยนต์ ที่ทำหน้าที่เก็บสำรองพลังงานไฟฟ้าและคอยจ่ายไฟไปยังอุปกรณ์ต่าง ๆ ของตัวรถ เพื่อให้เครื่องยนต์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถทำงานได้ตามปกติ โดยแบตเตอรี่รถยนต์ที่ถูกใช้งานในปัจจุบันนั้นมียุหลายประเภท ซึ่งแบตเตอรี่แต่ละประเภทต่างก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป โดยแบตเตอรี่มีด้วยกัน 7 ประเภทดังนี้ [6]

2.3.1 แบตเตอรี่น้ำ (Conventional Battery, CB) คือ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ที่ถูกใช้งานในรถยนต์ทั่วไป มีส่วนประกอบภายในคือโลหะผสมระหว่างตะกั่วกับพลวง แบตเตอรี่น้ำ เป็นแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับคนที่ใช้งานรถเป็นประจำ มีเวลาในการดูแลรักษา เพราะต้องคอย ตรวจสอบและเติมน้ำกลั่นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเสมอ หากละเลยขาดการดูแล แบตเตอรี่ก็จะมี ปัญหาและมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าปกติ [7]



รูปที่ 2.1 แบตเตอรี่น้ำ (Conventional Battery)

ข้อดีของแบตเตอรี่น้ำ

1. ราคาถูกเนื่องจากเป็นแบตเตอรี่มาตรฐานที่ถูกใช้งานในรถยนต์ทั่วไป
2. มีอายุการใช้งานที่ยาวนานหากมีการดูแลรักษาแบตเตอรี่ที่ถูกต้อง
3. มีความทนทานต่อการประจุไฟเกินและคายประจุ

ข้อเสียของแบตเตอรี่น้ำ

1. ต้องคอยตรวจเช็คและเติมน้ำกลั่นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเสมอ
2. มีค่าแอมป์และค่า CCA ที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่แห้งและแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ (ในบางรุ่น)
3. อาจมีการรั่วไหลของสารละลายภายใน หากเคลื่อนย้ายตัวแบตเตอรี่อย่างไม่ถูกต้อง

2.3.2 แบตเตอรี่แห้ง (Sealed Maintenance Free Car Battery, SMF) แบตเตอรี่แห้งถือเป็นประเภทแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เพราะมันเป็นแบตเตอรี่ที่ใช้งานง่าย ดูแลง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ไม่ต้องเติมน้ำกลั่นตลอดอายุการใช้งาน ทำให้เหมาะกับเจ้าของรถที่ไม่มีเวลาในการดูแลรักษา ตอบโจทย์ชีวิตผู้คนในยุคปัจจุบันมากที่สุด แต่ตัวแบตเตอรี่มีราคาค่อนข้างสูง แพงกว่าแบตเตอรี่น้ำและแบตเตอรี่กึ่งแห้งในระดับหนึ่ง [8]



รูปที่ 2.2 แบตเตอรี่แห้ง (Sealed Maintenance Free Car Battery)

ข้อดีของแบตเตอรี่แห้ง

1. ไม่ต้องเติมน้ำกลั่น ใช้งานง่าย ดูแลรักษาง่าย
2. มีค่าแอมป์และค่า CCA ที่สูงกว่าแบตเตอรี่น้ำ
3. มีคุณภาพดี ได้รับมาตรฐานเท่ากันทุกลูก เพราะชาร์จไฟและเติมน้ำกรดมา

เรียบร้อยจากโรงงานผลิต

ข้อเสียของแบตเตอรี่แห้ง

1. มีราคาที่ยกแพงกว่าแบตเตอรี่น้ำและแบตเตอรี่กึ่งแห้ง
2. อาจเกิดปัญหาเรื่องความชื้นเข้าไปในตัวแบตเตอรี่ หากซิลที่ปิดผนึกกระบาย

อากาศหลุดออก

3. หากกระบายอากาศของตัวแบตเตอรี่เกิดการอุดตัน ก็อาจส่งผลให้เกิดปัญหาแรงดันในตัวแบตเตอรี่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 แบตเตอรี่กึ่งแห้ง (Maintenance Free Car Battery, MF) เป็นแบตเตอรี่ที่มีความคล้ายคลึงกับแบตเตอรี่แห้ง แต่มีรูให้สามารถเติมน้ำกลั่นได้เหมือนกับแบตเตอรี่น้ำ มีอายุการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 3 ปี ไม่จำเป็นต้องดูแลรักษาบ่อยเหมือนแบตเตอรี่น้ำ แค่มั่นเติมน้ำกลั่นปีละ 1-2 ครั้งก็เพียงพอแล้ว ถือเป็นอีกหนึ่งประเภทแบตเตอรี่ที่ใช้งานง่าย ราคาไม่สูงมาก และมีขั้นตอนการดูแลรักษาที่ไม่ยุ่งยากจนเกินไป [9]



รูปที่ 2.3 แบตเตอรี่กึ่งแห้ง (Maintenance Free Car Battery)

ข้อดีของแบตเตอรี่กึ่งแห้ง

1. ตัวแบตเตอรี่มีการป้องกันการระเหยของน้ำกลั่นภายในเป็นอย่างดี ทำให้ผู้ใช้รถไม่ต้องเสียเวลาเติมน้ำกลั่นบ่อย ๆ

2. ความทนทานสูง มีอายุการใช้งานที่ค่อนข้างนานแม้จะน้อยกว่าแบตเตอรี่น้ำ

3. ราคาถูกกว่าแบตเตอรี่แห้ง

ข้อเสียของแบตเตอรี่กึ่งแห้ง

1. แม้จะมีการป้องกันการระเหยของน้ำกลั่นเป็นอย่างดี แต่ผู้ใช้รถก็ยังคงต้องคอยเติมน้ำกลั่นอยู่บ้างตามระยะเวลาที่กำหนดไว้

2. อายุการใช้งานอาจไม่ยาวนานเท่าแบตเตอรี่น้ำ

3. มีราคาที่สูงกว่าแบตเตอรี่น้ำในบางรุ่น

2.3.4 แบตเตอรี่ไฮบริด (Hybrid Battery, HB) เป็นประเภทแบตเตอรี่ที่ถูกพัฒนาขึ้นจากแบตเตอรี่น้ำ มีโครงสร้างภายในประกอบไปด้วยโลหะผสมระหว่างตะกั่วกับแคลเซียมเฉพาะแผ่นธาตุลบ ทำให้อัตราการระเหยของน้ำกลั่นในแบตเตอรี่ชนิดนี้น้อยกว่าแบตเตอรี่น้ำหลายเท่า เจ้าของรถจึงไม่ต้องเสียเวลาเติมน้ำกลั่นบ่อย เหมาะกับรถที่ใช้งานหนัก ๆ เช่น รถบรรทุก รถโดยสาร หรือรถรับจ้างทั่วไป เป็นต้น [10]



รูปที่ 2.4 แบตเตอรี่ไฮบริด (Hybrid Battery)

ข้อดีของแบตเตอรี่ไฮบริด

1. มีความทนทานสูง ใช้งานได้ยาวนานโดยไม่ต้องเติมน้ำกลั่นบ่อย ๆ
2. มีค่า CCA ที่สูงกว่าแบตเตอรี่น้ำ
3. ราคาถูกกว่าแบตเตอรี่แห้ง

ข้อเสียของแบตเตอรี่ไฮบริด

1. แม้จะใช้งานได้ยาวนาน แต่เจ้าของรถก็ยังคงคอยเติมน้ำกลั่นตามระยะเวลาที่กำหนดไว้

2. มีราคาแพงกว่าแบตเตอรี่น้ำในบางรุ่น
3. มักใช้กับรถขนาดใหญ่มากกว่ารถยนต์ธรรมดาทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 แบตเตอรี่เจล (Gel Battery) เป็นประเภทแบตเตอรี่ที่ถูกพัฒนาขึ้นจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด สามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่าแบตเตอรี่ทั่วไปถึง 20% มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพโดยรวมเหนือกว่าแบตเตอรี่น้ำ ทำให้ตัวแบตเตอรี่มีราคาที่สูงและแพงกว่าพอสมควร แบตเตอรี่ชนิดนี้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน มีความทนทานสูง ไม่ต้องเติมน้ำกลั่นหรือพึ่งพาการดูแลรักษาอะไรที่ยุ่งยาก [11]



รูปที่ 2.5 แบตเตอรี่เจล (Gel Battery)

ข้อดีของแบตเตอรี่เจล

1. ใช้งานง่าย ไม่ต้องเติมน้ำกลั่น มีขั้นตอนการดูแลรักษาที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน
2. กักเก็บพลังงานได้ดีกว่าแบตเตอรี่น้ำและแบตเตอรี่ชนิดอื่น (ในบางรุ่น)
3. มีความสามารถในการกระจายความร้อนที่ค่อนข้างสูง
4. ทนทานและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าแบตเตอรี่ทั่วไปหลายเท่า

ข้อเสียของแบตเตอรี่เจล

1. แม้จะมีขั้นตอนการดูแลรักษาที่ไม่ยุ่งยาก แต่เจ้าของรถก็ยังคงจำเป็นต้องหมั่นตรวจเช็คสภาพและทำความสะอาดตัวแบตเตอรี่อย่างสม่ำเสมอ
2. มีราคาแพงกว่าแบตเตอรี่น้ำพอสมควร

2.3.6 แบตเตอรี่ AGM (Absorbent Glass Material) เป็นแบตเตอรี่ชนิดใยแก้วที่ถูกผลิตขึ้นเพื่อรองรับระบบรถยนต์ที่มีเทคโนโลยีล้ำสมัยและมีประสิทธิภาพสูงในปัจจุบัน ถือเป็นแบตเตอรี่พร้อมใช้งานที่มีการเติมน้ำกรดและอัดไฟมาให้เรียบร้อยแล้วจากโรงงานผลิต ไม่ต้องคอยเติมน้ำกลั่น สามารถจ่ายไฟได้อย่างเสถียรและทำงานได้อย่างต่อเนื่องยาวนาน มีอายุเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3-6 ปี เรามักจะพบแบตเตอรี่ชนิดนี้ในรถยนต์รุ่นใหม่ ๆ เป็นส่วนใหญ่ ราคาของตัวแบตเตอรี่จึงค่อนข้างแพงและสูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นพอสมควร [12]



รูปที่ 2.6 แบตเตอรี่ AGM (Absorbent Glass Material)

ข้อดีของแบตเตอรี่ AGM

1. ไม่ต้องเติมน้ำกลั่นตลอดอายุการใช้งาน
2. มีค่าแอมป์และค่า CCA อยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูง
3. สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างเสถียรและคงที่
4. มีความทนทานต่อการคายประจุไฟฟ้าที่สูง ทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน
5. ชาร์จกระแสไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว ลดเวลาในการชาร์จได้หลายเท่าตัวหากเทียบกับ

กับแบตเตอรี่ชนิดอื่น

ข้อเสียของแบตเตอรี่ AGM

1. ราคาสูงเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่กรดตะกั่วทั่ว ๆ ไป
2. ต้องหมั่นตรวจเช็คสภาพแบตเตอรี่อย่างสม่ำเสมอ เพราะหากตัวแบตเตอรี่มีปัญหา บางอย่างก็ไม่สามารถซ่อมแซมหรือแก้ไขได้ จำเป็นต้องซื้อและเปลี่ยนแบตเตอรี่เป็นลูกใหม่เพียงอย่างเดียว

2.3.7 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-Ion Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่ถูกพัฒนาขึ้นให้มีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้นานกว่า มีอัตราการชาร์จที่รวดเร็ว พร้อมจ่ายไฟได้อย่างเสถียรและคงที่ อีกทั้งยังไม่มีส่วนประกอบที่เป็นอันตรายต่อธรรมชาติและมนุษย์ เช่น ของเหลว กรด หรือตะกั่ว เราจึงมักพบแบตเตอรี่ประเภทนี้ในรถยนต์พลังงานไฟฟ้าเสียเป็นส่วนใหญ่ [13]



รูปที่ 2.7 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-Ion Battery)

ข้อดีของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

1. น้ำหนักเบาเพราะโครงสร้างภายในของตัวแบตเตอรี่เป็นโลหะอัลคาไลน์ที่มีน้ำหนักเบาที่สุดในโลก

2. อายุการใช้งานยาวนาน

3. ให้พลังงานสูง จ่ายไฟได้อย่างคงที่ อีกทั้งยังชาร์จได้รวดเร็ว

4. เป็นเซลล์แห้ง ไม่มีส่วนประกอบที่เป็นอันตรายต่อธรรมชาติและมนุษย์

ข้อเสียของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

1. เป็นแบตเตอรี่ที่ถูกใช้งานในรถยนต์พลังงานไฟฟ้าเสียเป็นส่วนใหญ่

2. ราคาสูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นหลายเท่าตัว

2.4 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

คาปาซิเตอร์ (Capacitor) หรือ ตัวเก็บประจุ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่ง ทำหน้าที่เก็บพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นระหว่างคู่ฉนวน โดยมีค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน แต่มีชนิดของประจุตรงข้ามกัน มีชื่อเรียกสั้น ๆ ว่า แคป (Cap) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำคัญในงานอิเล็กทรอนิกส์ และพบได้แทบทุกวงจร มีคุณสมบัติตรงข้ามกับตัวเหนี่ยวนำ จึงมักใช้หักล้างกัน หรือทำงานร่วมกันในวงจรต่าง ๆ นิยมนำมาใช้ประกอบในวงจรกรองกระแส (Filter) วงจรบายพาส (Bypass) วงจรสตาร์ทเตอร์ (Starter) วงจรถ่ายทอดสัญญาณ (Coupling) เป็นต้น [14]

2.4.1 การทำงานของตัวเก็บประจุ มีอยู่ 2 ลักษณะ ได้แก่

1. การเก็บประจุ เกิดขึ้นเมื่อมีการเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่เพลตของตัวเก็บประจุ เมื่อนำแบตเตอรี่ต่อกับตัวเก็บประจุ อิเล็กตรอนจากขั้วลบของแบตเตอรี่ จะเข้าไปรวมกันที่แผ่นเพลต ทำให้เกิดประจุลบขึ้นและยังส่งสนามไฟฟ้าไป ผลักอิเล็กตรอนของแผ่นเพลตตรงข้าม ซึ่งโดยปกติในแผ่นเพลตจะมี ประจุเป็นบวก และลบ ปะปนกันอยู่ เมื่ออิเล็กตรอนจากแผ่นเพลตนี้ถูก ผลักให้หลุดออกไป แล้วจึงเหลือประจุบวกมากกว่าประจุลบ ยิ่งอิเล็กตรอนถูกผลักออกไปมากเท่าไร แผ่นเพลตนั้นก็จะเป็นบวกมากขึ้นเท่านั้น

2. การคายประจุ เกิดขึ้นเมื่อตัวเก็บประจุที่ถูกเก็บประจุแล้ว ถ้าเรายังไม่นำขั้วตัวเก็บประจุมาต่อกัน อิเล็กตรอนก็ยังคงอยู่ที่แผ่นเพลต แต่ถ้ามีการครบวงจร ระหว่างแผ่นเพลตทั้งสองเมื่อไร อิเล็กตรอนก็จะวิ่งจากแผ่นเพลตทางด้านลบ ไปครบวงจรที่แผ่นเพลตบวกทันที

2.4.2 ชนิดของตัวเก็บประจุ แบ่งตามวัสดุการใช้งานได้ 2 ชนิด คือ ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ (Fixed Capacitor) และตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor)

1. ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ (Fixed Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ มีขั้วบวกและขั้วลบบอกไว้ ซึ่งต้องคำนึงถึงการต่อขั้วเมื่อนำไปใช้งาน โดยขั้วลบจะมีลูกศรชี้ไปที่ขั้ว และในลูกศรจะมีเครื่องหมายลบระบุไว้

- ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ (Paper capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้กระดาษอบน้ำยาทำเป็นแผ่นไดอิเล็กตริก นำไปใช้งานซึ่งต้องการค่าความต้านทานของฉนวนที่มีค่าสูง และมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิสูงได้ดี มีค่าความจุที่ดีในย่านอุณหภูมิที่กว้าง มีค่าความจุตั้งแต่ 1 ไมโครฟารัด (μF) ถึง 1,000 μF สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ 200 ถึง 1,600 โวลต์ (Volt)



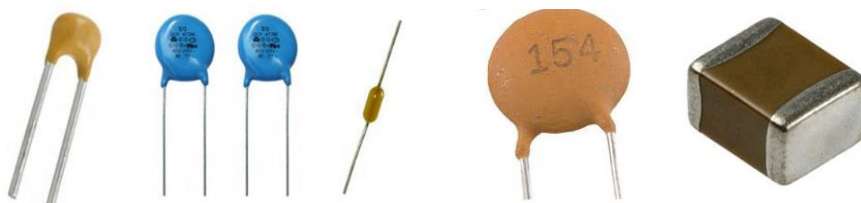
รูปที่ 2.8 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

- ตัวเก็บประจุแบบไมก้า (Mica capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้แผ่นไมก้าเป็นฉนวนไดอิเล็กตริก ไม่มีขั้วไฟฟ้า จะมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิ และ ความถี่ดี มีค่าตัวประกอบการสูญเสียต่ำ และสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูง ส่วนมากตัวเก็บประจุชนิดนี้จะถูกทำเป็นรูปสี่เหลี่ยม เพราะแผ่นไมก้าจะมีคุณสมบัติที่แข็งแกร่ง โครงสร้างของมันจะประกอบด้วยแผ่นเพลตโลหะบางๆ อาจใช้หลายๆ แผ่นวางสลับซ้อนกัน



รูปที่ 2.9 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

- ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก (Ceramic capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้เซรามิกมาทำเป็นแผ่นไดอิเล็กตริก ไม่มีขั้วไฟฟ้า โดยทั่วไปมีลักษณะกลมแบน บางครั้งอาจพบแบบสี่เหลี่ยมแบน ส่วนใหญ่ตัวเก็บประจุชนิดนี้ มีค่าน้อยกว่า $1 \mu\text{F}$ เป็นชนิดที่ไม่มีขั้วและสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 50 ถึง 100 โวลต์ ค่าความจุของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกที่มีใช้กันในปัจจุบัน อยู่ในช่วงระหว่าง 1 พิโก (pF) ถึง $0.1 \mu\text{F}$ ค่าผิดพลาด ± 5 ถึง $\pm 10 \%$



รูปที่ 2.10 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

- ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่นิยมใช้กันมากเพราะให้ค่าความจุสูง มีขั้วบวกลบ เวลาใช้งานต้องติดตั้งให้ถูกขั้ว โครงสร้างภายในคล้ายกับ แบตเตอรี่ นิยมใช้กับงานความถี่ต่ำหรือใช้สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนข้อดีคือกระแสรั่วไหลและ ความผิดพลาดสูงมาก



รูปที่ 2.11 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์

- ตัวเก็บประจุแบบโพลีเอสเตอร์ (Polyethylene capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่แบ่งได้หลายแบบเช่น โพลีเอสเตอร์ โพลีคาร์บอนเนต โพลีโพรไฟริน ค่าความจุจะอยู่ในช่วง นาโน - ไมโคร เช่นเดียวกับ ตัวเก็บประจุไม่ลาการใช้งานแรงดัน อยู่ในช่วง 50V - 100 V หรือมากกว่า ซึ่งจะเขียนติดไว้ที่ตัวเก็บ ประจุอยู่แล้วและค่าตัวเก็บประจุ จะพิมพ์อยู่บนตัวเก็บประจุ เลย โดยอาจจะเป็นค่า pF หรือ uF ขึ้นอยู่กับค่าความจุในการ ใช้งานส่วนมากจะใช้งานในระบบเสียง เสียงเครื่องเสียง ระบบ ความคม เป็นต้น



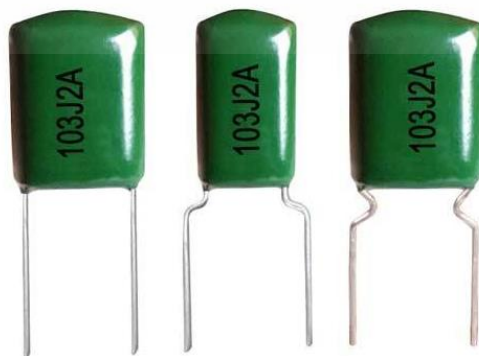
รูปที่ 2.12 ตัวเก็บประจุแบบโพลีสไตรีน

- ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม (Tantalum capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความผิดพลาดน้อยใช้กับไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ มักจะใช้ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม แทนชนิดอิเล็กโทรไลต์ธรรมดา เพราะให้ค่าความจุสูงเช่นกัน



รูปที่ 2.13 ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม

- ตัวเก็บประจุแบบไมลา (Mylar capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่นิยมใช้มาก เพราะมีเสถียรภาพสูง กระแสรั่วต่ำ มีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิสูง แต่ไม่มีขั้ววอกกลับ เพราะฉะนั้นในงานบางอย่างจะใช้ไมลาแทนเซรามิก เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและการรั่วไหลของกระแสต่ำกว่าชนิดเซรามิก เหมาะสำหรับวงจรกรองความถี่สูง



รูปที่ 2.14 ตัวเก็บประจุแบบไมลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวเก็บประจุแบบไบโพลลา (Bipolar capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่นิยมใช้กันมากในวงจรภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องขยายเสียง เป็นตัวเก็บประจุจำพวกเดียวกับชนิดอิเล็กโตรไลต์ แต่ไม่มีขั้วบวกลบ บางครั้งเรียก สั้น ๆ ว่า ไบแคป



รูปที่ 2.15 ตัวเก็บประจุแบบไบโพลลา

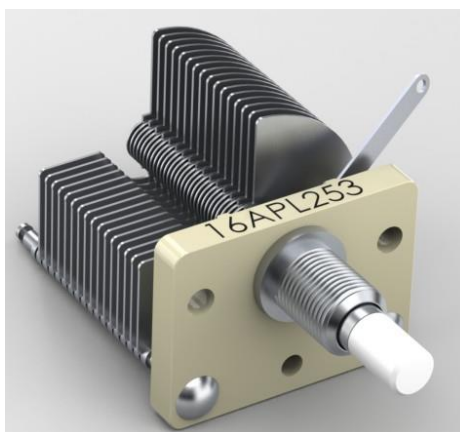
- ตัวเก็บประจุแบบโพลีโพรไพลีน (Polypropylene capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่มีประสิทธิภาพสูง หรือรู้จักกันในชื่อ MKP และถ้านำไปใช้กับไฟกระแสไฟฟ้าสลับ มีคุณสมบัติคล้ายกับชนิดโพลีสไตลีน



รูปที่ 2.16 ตัวเก็บประจุแบบโพลีโพรไพลีน

2. ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่ค่าการเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน โครงสร้างภายในประกอบด้วย แผ่นโลหะ 2 แผ่นหรือมากกว่าวางใกล้กัน แผ่นหนึ่งจะอยู่กับที่ส่วนอีกแผ่นหนึ่งจะเคลื่อนที่ได้ ไดอิเล็กทริกที่ใช้มีหลายชนิดด้วยกันคือ อากาศ ไมก้า เซรามิค และพลาสติก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้

2.5 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor)

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) หรือ อัลตราคาปาซิเตอร์ (Ultracapacitor) แสดงดังรูปที่ 2.18 เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำมาใช้งานร่วมกับแบตเตอรี่ในการประจุพลังงานไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่สามารถอัดประจุ (Charge) และคายประจุ (Discharge) ได้อย่างรวดเร็วนี้ จึงนำมาใช้งานร่วมกับระบบจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อลดระยะเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอัดประจุของแบตเตอรี่ด้วย เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดใช้ระยะเวลาในการเก็บประจุเร็วกว่าแบตเตอรี่ทำให้การเกิดความร้อนสะสมต่ำ การสูญเสียพลังงานลดลง และเมื่อนำมาต่อเข้ากับแบตเตอรี่จะทำให้สามารถอัดประจุได้เร็วและยังช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้นานขึ้น [15]

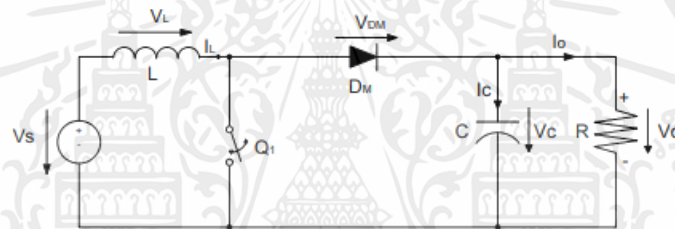


รูปที่ 2.18 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

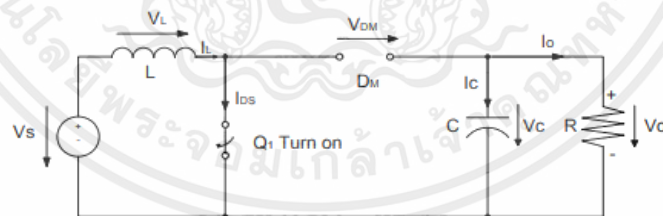
2.6 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC Converter)

2.6.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบแรงดัน (Boost Converter)

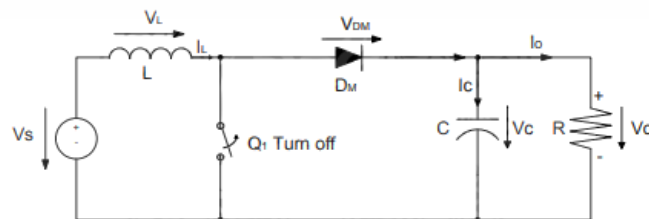
คอนเวอร์เตอร์แบบทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เป็นสวิตชิงชนิดหนึ่งที่สามารถทำงานได้โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ความถี่สูงทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุต ให้สูงกว่าระดับแรงดันอินพุต โดยอาศัยคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ ความถี่สูงในการเก็บและคายพลังงาน การทำให้ระดับแรงดันเอาต์พุตสูงกว่าระดับแรงดันอินพุตจึงเรียกว่า “สเต็ปอัพคอนเวอร์เตอร์ (Step – up Converter)” จะประกอบไปด้วยส่วนหลัก คือ ส่วนของวงจรกำลัง ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ ความถี่สูง ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต ไดโอดกำลังทำหน้าที่สวิตช์ อีกส่วนคือวงจรกรองแรงดันเป็นวงจรทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ วงจรสมมูลของวงจรทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังรูปที่ 2.19 วงจรการทำงานของวงจรทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังรูปที่ 2.20 และการวิเคราะห์หาค่าจะได้สัญญาณต่าง ๆ ดังปรากฏในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลของวงจรทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



ก) โหมดที่ 1 สวิตช์ปิด



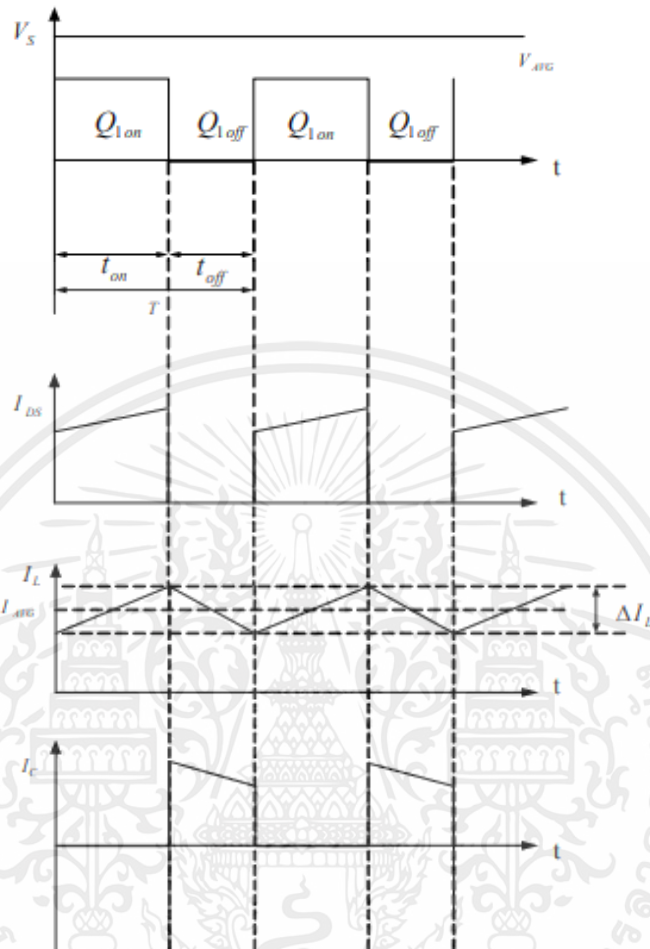
ข) โหมดที่ 2 สวิตช์เปิด

รูปที่ 2.20 วงจรการทำงานของวงจรทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง:

ก) โหมดที่ 1 สวิตช์ปิด, ข) โหมดที่ 2 สวิตช์เปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ D คือ วัฏจักรงาน (Duty Cycle)
T คือ คาบเวลาการทำงานของวัฏจักรงาน



รูปที่ 2.21 สัญญาณต่าง ๆ ของวงจรทบทแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

โหมด 1 ($0 < t \leq t_{on}$) มอสเฟต Q_1 ทำงานสวิตช์ปิด ($t = 0$) กระแสอินพุตไหลผ่านมอสเฟต Q_1 และตัวเหนี่ยวนำทำให้กระแสของตัวเหนี่ยวนำ เพิ่มขึ้นจาก I_1 ที่ $t = t_0$ เป็น I_2 ที่ $t = t_1$ โดยไดโอด D_M จะถูกไบอัสกลับ ตัวเก็บประจุจะดิสชาร์จประจุให้แก่โหลดในช่วงเวลา $0 < t \leq t_{on}$ ค่าแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ (2.1)

$$V_s = V_L = L \frac{I_2 - I_1}{t_{on}} = \frac{L\Delta I}{t_{on}} \quad (2.1)$$

สมการที่จะหาค่าเวลาในช่วงที่เพาเวอร์มอสเฟต Turn ON ได้จากสมการที่ (2.2)

$$t_{on} = \frac{L\Delta I}{V_s} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$E = \frac{1}{2}L(\Delta I)^2 = \frac{1}{2L}V_s^2 t_{on}^2 \quad (2.3)$$

วิเคราะห์เมื่อสวิตช์เปิด

โหมด 2 ($0 < t \leq t_{on}$) มอสเฟต Q_1 ทำงานสวิตช์เปิด ($t = t_1$) แรงดันเหนี่ยวนำย้อนกลับของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับแรงดันอินพุต ทำให้เอาต์พุตมีค่ามากขึ้นจนทำให้ D_M ทำงาน กระแสอินพุตไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ประกอบด้วยกระแสอินพุต (I_s) และกระแสของตัวเหนี่ยวนำ (I_L) ซึ่งกระแสของตัวเหนี่ยวนำเกิดจากพลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำ ขณะที่มอสเฟต Q_1 ทำงาน ผ่านไดโอด D_M จ่ายให้กับโหลดและชาร์จประจุให้แก่ตัวเก็บประจุเป็นผลให้ I_L ตกลงในช่วงเวลา t_2

$$V_o - V_s = L \frac{I_2 - I_1}{t_{off}} \quad (2.4)$$

หรือ

$$V_o - V_s = L \frac{\Delta I}{t_{off}} \quad (2.5)$$

สามารถที่จะหาค่าเวลาในช่วงที่เพาเวอร์มอสเฟต Turn OFF ได้จากสมการที่ (2.6)

$$t_{off} = L \frac{\Delta I}{V_o - V_s} \quad (2.6)$$

การเปลี่ยนแปลงของกระแสของตัวเหนี่ยวนำระหว่างค่ากระแส พีค-ทูป-พีค (Peak-to-Peak) คือ กระแสกระเพื่อมเมื่อพิจารณาที่สภาวะคงที่โดยให้ช่วงเวลา t_{on} และ t_{off} จากสมการที่ (2.11) มีค่าเท่ากัน คำนวณหาค่ากระแสกระเพื่อมได้ดังนี้

$$\Delta I = \frac{V_s t_{on}}{L} = \frac{(V_o - V_s) t_{off}}{L} \quad (2.7)$$

แทนค่า $t_{on} = DT$ และ $t_{off} = (1-D)T$ ลงในสมการที่ (2.7)

$$V_s DT = (V_o - V_s)(1-D)T = V_o(1-D)T - V_s(1-D)T \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) เมื่อทำให้อยู่ในรูปอย่างง่ายจะได้

$$V_s DT = V_o(1-D)T - V_s T + V_s DT \quad (2.9)$$

หรือ

$$V_s = V_o(1-D) \quad (2.10)$$

ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยจากวงจรทบแรงดันจะได้ดังสมการที่ (2.11)

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \quad (2.11)$$

สมการที่ (2.11) แสดงถึงแรงดันเอาต์พุต ถ้าสวิตช์เปิดตลอดเวลาและ D มีค่าเป็น ศูนย์แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเหมือนกับแรงดันอินพุต ขณะที่วัฏจักรงาน (Duty Cycle) มีค่าเพิ่มขึ้น ตัว ส่วนในสมการที่ (2.10) จะมีขนาดเล็กลงและเอาต์พุตจะมีค่าแรงดันมากกว่าอินพุต แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันอินพุตและค่าวัฏจักรงาน ขณะงานมีค่าเข้าใกล้ 1 แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเข้าใกล้อนันต์ (Infinity) หากพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าด้านอินพุตเท่ากับด้านเอาต์พุตจะได้ว่า

$$V_s I_s = \eta V_o I_o P_{in} = \eta P_{out} \quad (2.12)$$

แทนค่าแรงดันเอาต์พุตในสมการที่ (2.11)

$$V_s I_s = \frac{V_s I_o}{1-D} \quad (2.13)$$

ฉะนั้นกระแสอินพุตเฉลี่ยจะได้

$$I_s = \frac{I_o}{1-D} \quad (2.14)$$

สวิตช์เพาเวอร์ซัพพลายจะทำงานในรูปของคาบเวลาในหนึ่งคาบเวลาจะประกอบไปด้วยช่วงเวลา t_{on} และ t_{off} ดังนั้นค่าของคาบเวลาจะได้

$$T = \frac{1}{f} = t_{on} + t_{off} = \frac{L\Delta I}{V_s} + \frac{L\Delta I}{V_o - V_s} + \frac{L(\Delta I)V_o}{V_s(V_o - V_s)} \quad (2.15)$$

จัดรูปสมการที่ (2.16) ใหม่จะได้ค่ากระแสระเพื่อมของตัวเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ (2.12)

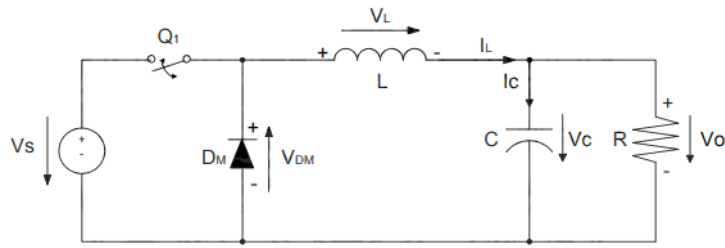
$$\Delta I = \frac{V_s(V_o - V_s)T}{LV_s} = \frac{V_s \left[\frac{V_s}{1-D} - V_o \right]}{fL V_o} \quad (2.16)$$

และจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังสมการที่ (2.17)

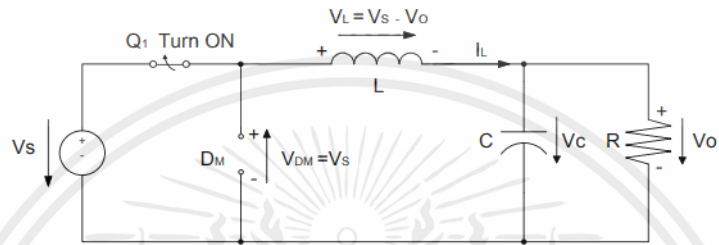
$$L = \frac{V_s D}{f\Delta I} \quad (2.17)$$

2.6.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทอนแรงดัน (Buck Converter)

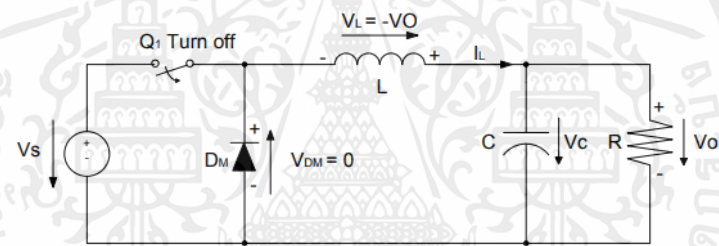
วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทอนแรงดัน หรือ วงจรบักคอนเวอร์เตอร์ หลักการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ เป็นการออกแบบเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตมีปริมาณต่ำกว่าด้านอินพุต และมีปริมาณแรงดันตามที่ต้องการ โดยเริ่มต้นจากเงื่อนไขที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์จากนั้นสามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ การวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด จะต้องวิเคราะห์ในสภาวะอยู่ตัววงจรสมมูลของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังรูปที่ 2.22 และวงจรการทำงานของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



ก) โหมดที่ 1 สวิตช์ปิด

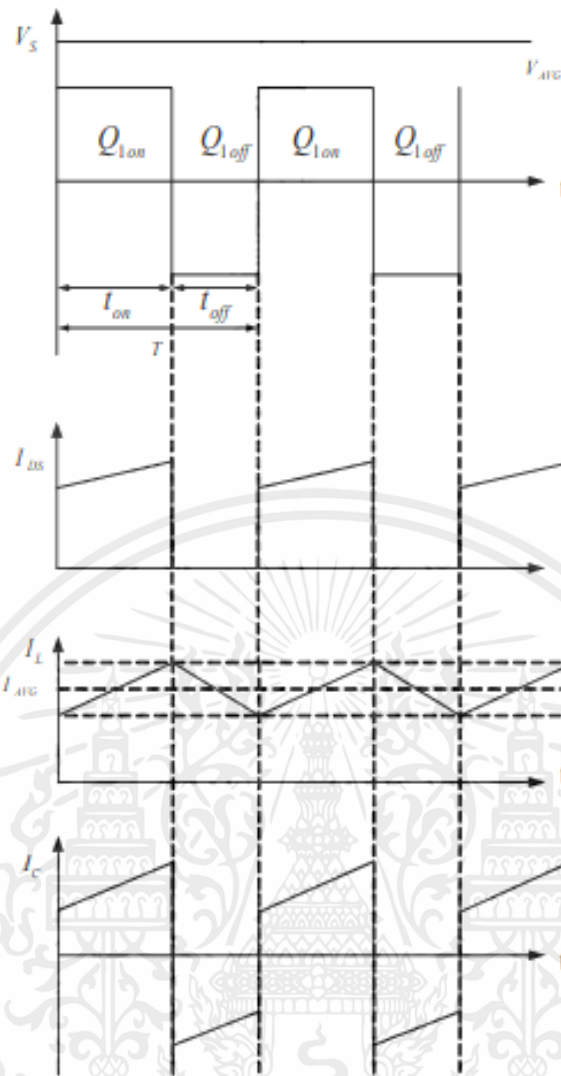


ข) โหมดที่ 2 สวิตช์เปิด

รูปที่ 2.23 วงจรการทำงานของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง:

ก) โหมดที่ 1 สวิตช์ปิด, ข) โหมดที่ 2 สวิตช์เปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 สัญญาณต่าง ๆ ของวงจรทบทแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

วิเคราะห์เมื่อสวิตช์ปิด จากรูปที่ 2.23 ก. เป็นการทำงานโหมดที่ 1 จะได้สัญญาณต่าง ๆ ดังปรากฏในรูปที่ 2.24 ($0 < t \leq t_{on}$) มอสเฟต Q_1 ทำงานสวิตช์ปิด ($t = 0$) กระแสอินพุตไหลผ่าน Q_1 และตัวเหนี่ยวนำ ทำให้กระแสของตัวเหนี่ยวนำ เพิ่มขึ้นจาก I_1 ที่ $t = 0$ เป็นเวลา t_2 ที่ $t = t_1$ โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะเท่ากับกระแสที่ไหลผ่าน R และแรงดันที่แหล่งจ่ายจะเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ บวกกับแรงดันที่ตกคร่อม R ดังสมการที่ (2.18)

$$V_s = V_L + V_o \quad (2.18)$$

จะได้

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_s - V_o, \quad \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dt ในกรณีอยู่ในช่วงเวลานำกระแส คือ $dt=DT$

$$\Delta_{iL,on} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (2.20)$$

วิเคราะห์เมื่อสวิตช์เปิด จากรูปที่ 2.5 ข. เป็นการทำงานโหมด 2 จะได้สัญญาณต่างๆ ดังปรากฏในรูปที่ 2.6 ($t_1 < t \leq t_{off}$) มอสเฟต Q_1 ทำงานสวิตช์เปิด ($t = t_1$) แรงดันเหนี่ยวนำย้อนกลับของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน R ทำให้เอาต์พุตมีค่ามากขึ้นจนทำให้ D_M ทำงานจึงทำให้ตัวเหนี่ยวนำ คายพลังงานออกมาเปรียบเสมือนเป็นแหล่งจ่ายตัวหนึ่ง ทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวต้านทาน ดังสมการที่ 2.21

$$V_D = V_L + V_o \quad (2.21)$$

แต่ $V_D = 0 \text{ V}$ จะได้ $V_L + V_o = 0, V_L = -V_o = L \frac{d_{iL}}{dt}$

$$L \frac{d_{iL}}{dt} = \frac{\Delta_{iL,off}}{\Delta t} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.22)$$

dt ในกรณีอยู่ในช่วงเวลาหยุดนำกระแส คือ $dt = (1-D)T$ สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (2.22)

$$\Delta_{iL,off} = - \left(\frac{V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (2.23)$$

แทนค่า $t_{on} = DT$ และ $t_{off} = (1-D)T$ ลงในสมการที่ (2.23)

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT + \left[\left(\frac{-V_o}{L} \right) (1-D)T \right] = 0 \quad (2.24)$$

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) + \left(\frac{-V_o}{L} \right) (1-D) = 0 \quad (2.25)$$

$$V_s D - V_o D - V_o = 0 \quad (2.26)$$

$$V_s D - V_o = 0 \quad (2.27)$$

$$V_s D = V_o \quad (2.28)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = D \quad (2.29)$$

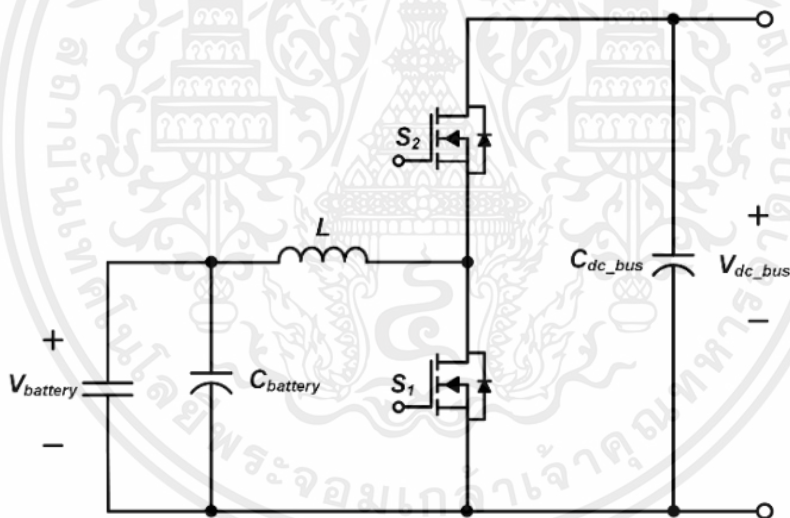
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC-DC converter)

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง ทำงานโดยใช้หลักการของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์และวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ โดยจะมีลักษณะการทำงาน 2 ทิศทาง ดังนี้ (กำหนดให้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทางนี้ เชื่อมต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าด้านแรงดันสูง คือ แบตเตอรี่ขนาด 96 V และแหล่งจ่ายไฟฟ้าด้านแรงดันต่ำ คือ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ขนาด 48 V)

- ทิศทางที่ 1 (Buck Mode) วงจรแปลงผันไฟฟ้าทำงานเป็นวงจรทอนแรงดัน เพื่อถ่ายเทพลังงานจากแบตเตอรี่ขนาด 96 V เข้าไปเก็บในตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาด 48 V เพื่อทำการสำรองพลังงาน

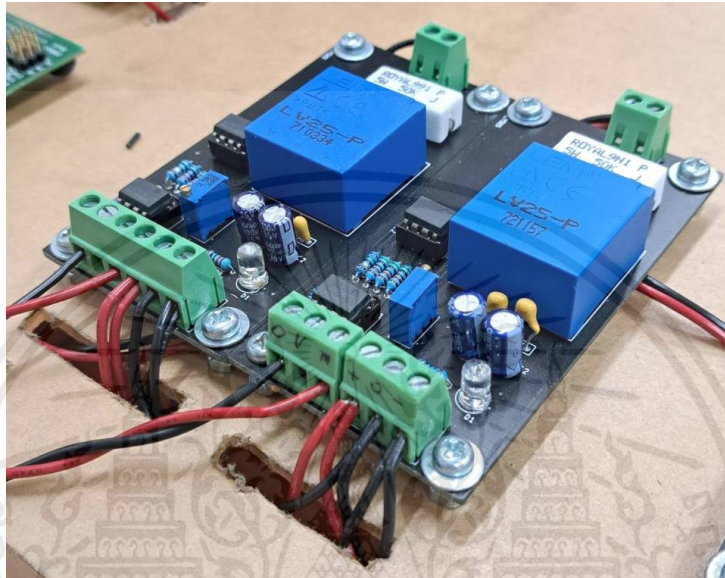
- ทิศทางที่ 2 (Boost Mode) วงจรแปลงผันไฟฟ้าทำงานเป็นวงจรทบแรงดัน เพื่อถ่ายเทพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาด 48 V ปล่อยให้กับโหลดขนาด 96 V เพื่อทำการเสริมกำลังให้ระบบอย่างต่อเนื่อง ทดแทนการจ่ายไฟฟ้าในส่วนที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลดในกรณีที่แบตเตอรี่มีระดับของการอัดประจุที่ลดต่ำลง [16]



รูปที่ 2.25 วงจร bidirectional DC-DC converter ชนิด half-bridge

2.7 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า (Voltage sensors)

วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า เป็นวงจรที่ใช้ในการคำนวณและตรวจสอบปริมาณแรงดันไฟฟ้าในวงจร วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าสามารถกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้า AC หรือ DC ได้ อินพุตของวงจรตรวจจับนี้คือแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่เอาต์พุตคือสวิทช์สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอนาล็อก ลักษณะของวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าจะแสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

โดยในโมดูลเซ็นเซอร์แรงดันไฟฟ้าที่นำมาใช้จะมีการนำ LEM LV25-P [18] เข้ามาใช้งานสำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้า ลักษณะของ LEM LV25-P จะแสดงดังรูปที่ 2.27

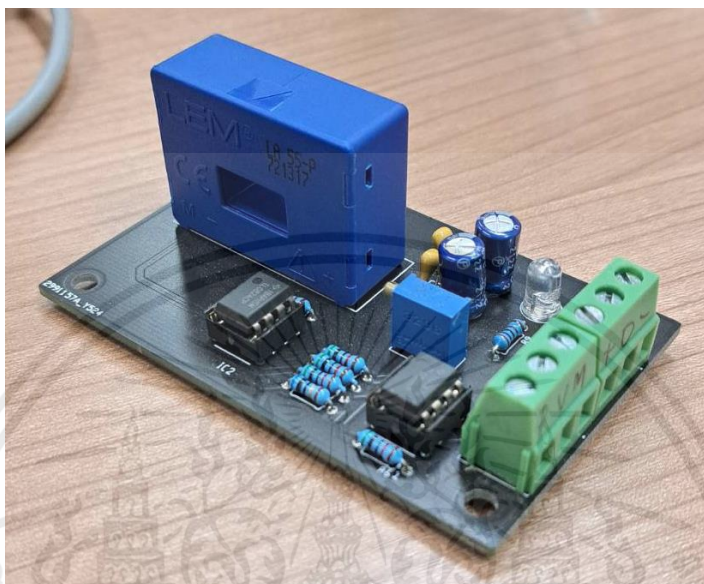


รูปที่ 2.27 LEM LV25-P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 วงจรตรวจจับกระแส (Current sensors)

วงจรตรวจจับกระแส คือวงจรที่ตรวจจับและแปลงกระแสเป็นแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ง่าย ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลผ่านทิศทางการวัด ลักษณะของวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าจะแสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 วงจรตรวจจับกระแส

โดยในวงจรตรวจจับกระแสที่นำมาใช้จะมีการนำ LEM LA 55-P [19] เข้ามาใช้งาน สำหรับการวัดกระแสในวงจร ลักษณะของ LEM LA 55-P จะแสดงดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 LEM LA 55-P

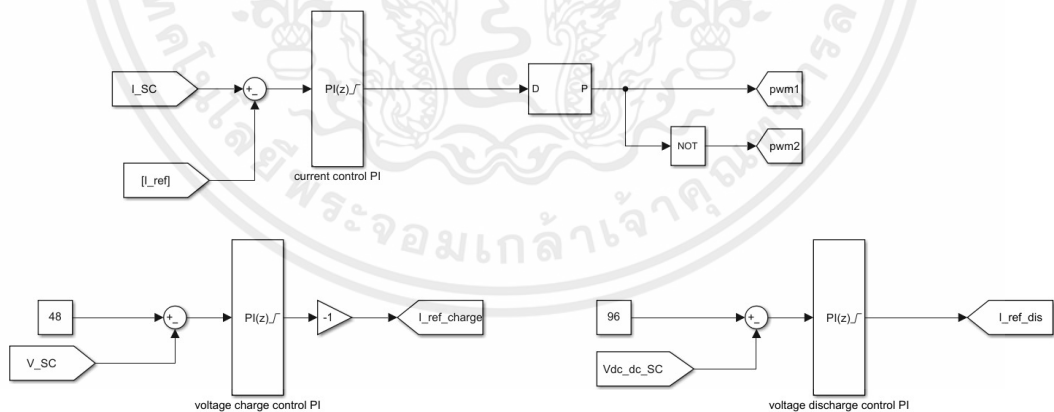
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Microcontrollers)

ในโครงการนี้จะใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Microcontrollers, MCUs) ในการคำนวณสัญญาณควบคุมต่าง ๆ โดยใช้ TMS320F28069 [20] ดังแสดงในรูป 2.30 ซึ่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย สัญญาณกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่าย และสัญญาณกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทางจะถูกส่งมาจากวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.30 หน่วยประมวลผลรุ่น TMS320F28069



รูปที่ 2.31 บล็อกการสร้างสัญญาณ PWM ผ่านโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

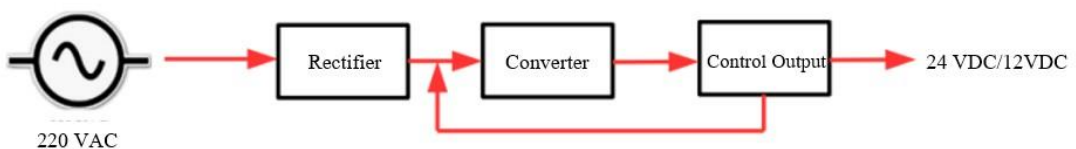
2.10 Switching Power Supply

ลักษณะของ Switching Power Supply [22] แสดงดังรูปที่ 2.32 เป็นอุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงดันสูง เช่น 220 VAC ไปเป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีแรงดันต่ำ โดย Switching Power Supply จะทำงานในลักษณะเดียวกันกับหม้อแปลงแรงดันทั่วไป แต่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าและมีขนาดเล็กกว่า โดยหลักการทั่วไปของ Switching Power Supply จะประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

1. เรคตีไฟเออร์ (Rectifier) ทำหน้าที่ แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
2. คอนเวอร์เตอร์ (Converter) ทำหน้าที่ แปลงความถี่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูง และแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีความต้านทานทางด้านเอาต์พุตของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้ได้ตามความต้องการอีกครั้ง
3. วงจรควบคุม (Control Output) ทำหน้าที่ ควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ [21] วงจรควบคุมแสดงดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.32 Switching Power Supply



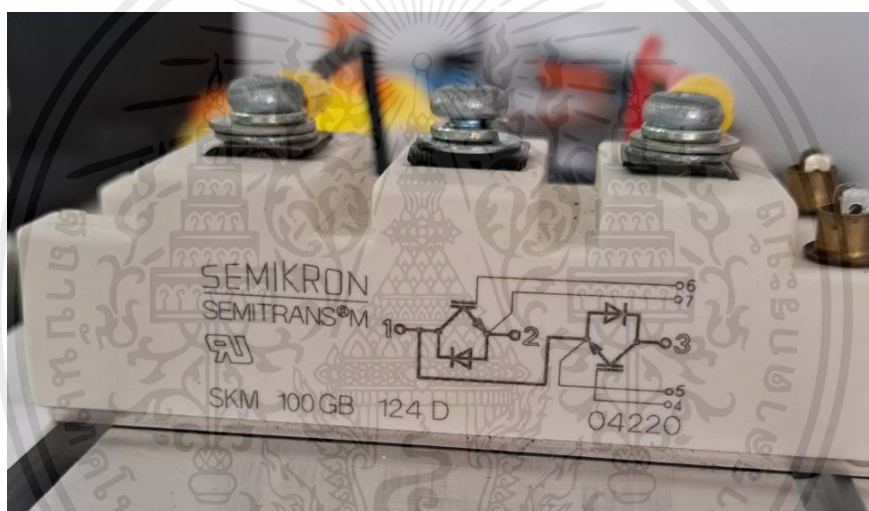
รูปที่ 2.33 วงจรเบื้องต้นของ Switching Power Supply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 ทรานซิสเตอร์เกตไบโพลาร์หุ้มฉนวน (Isolate Gate Bipolar Transistor: IGBT)

ทรานซิสเตอร์เกตไบโพลาร์หุ้มฉนวน เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ควบคุมการเปิด-ปิดของกระแสไฟฟ้าได้ด้วยแรงดัน (Voltage control current source) เช่นเดียวกับ มอสเฟตกำลัง IGBT เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำงานได้ในย่านความถี่สูงกว่าทรานซิสเตอร์แต่ต่ำกว่ามอสเฟต คือที่ความถี่ระหว่าง 1kHz-100kHz แต่พิกัดของกระแสและแรงดันไฟฟ้าสูงกว่ามอสเฟตกำลัง คือ 500A/2000V

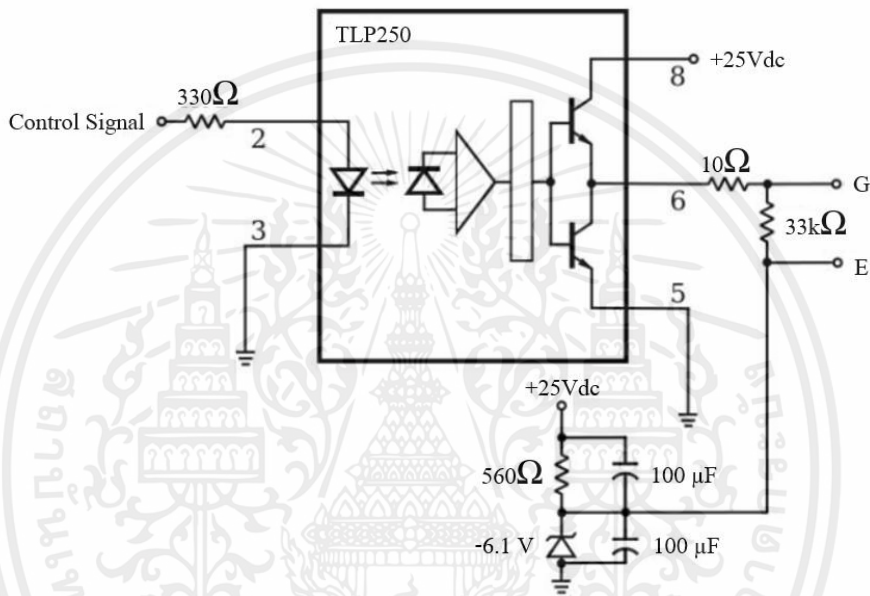
ในการทดลองนี้ เราได้ทำการเลือกใช้สวิตช์ IGBT ของ SEMIKRON SKM100GB124D [23] ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 1200 โวลต์ และพิกัดกระแสไฟฟ้า 150 แอมป์ ลักษณะของสวิตช์ IGBT รุ่น SKM100GB124D จะแสดงดังรูปที่ 2.34



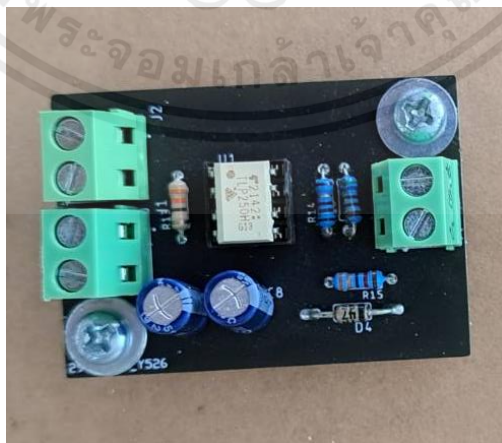
รูปที่ 2.34 สวิตช์ IGBT รุ่น SKM100GB124D

2.12 วงจรกำเนิดสัญญาณขับสวิตช์ (Gate Drive Signal Generator)

เนื่องจากสัญญาณที่มาจากวงจรลอจิกเกต เป็นสัญญาณแรงดัน ระดับ 0-3.3 V ดังนั้นก่อนที่จะนำสัญญาณดังกล่าวไปขับ IGBT จะต้องผ่านวงจรขับเกต เพื่อเพิ่มระดับแรงดันให้กับสัญญาณ และเป็นการแยกกราวด์ทางไฟฟ้าระหว่างวงจรถูกกำลัง และวงจรควบคุม ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเอาไอซีสำเร็จรูปเบอร์ TLP250 โดยออกแบบวงจรให้มีระดับแรงดันในการขับเกตที่ -6 ถึง 19 โวลต์ โดยวงจรถูกกำเนิดสัญญาณขับสวิตช์แสดงดังรูปที่ 2.35 และเครื่องกำเนิดสัญญาณขับสวิตช์แสดงดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.35 วงจรถูกกำเนิดสัญญาณขับสวิตช์



รูปที่ 2.36 เครื่องกำเนิดสัญญาณขับสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

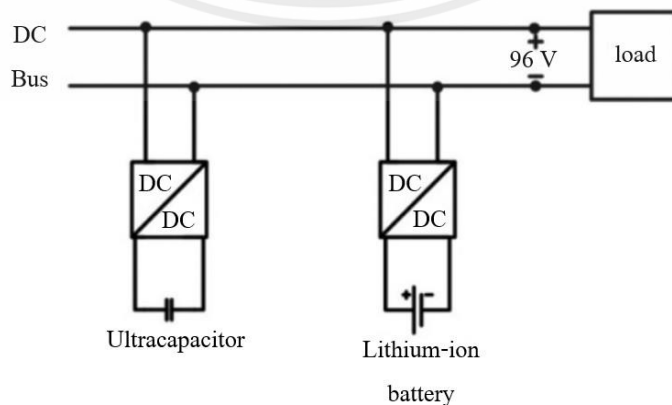
การออกแบบและการทดลอง

3.1 บทนำ

ในปัจจุบันรถไฟฟ้าได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย และหลายๆองค์กรก็เริ่มผลิตและพัฒนารถยนต์ไฟฟ้าขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการใช้แบตเตอรี่เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับรถไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบตเตอรี่ลิเธียมที่ได้รับความนิยมที่สุดในการนำมาใช้กับรถไฟฟ้าในปัจจุบัน แต่เนื่องจากแบตเตอรี่ลิเธียมยังมีระยะเวลาในการอัดประจุที่นาน รวมไปถึงน้ำหนักที่ยังค่อนข้างสูงอยู่สำหรับการนำมาติดตั้งบนรถยนต์ไฟฟ้า ส่งผลให้ระยะเวลาในการอัดประจุแต่ละครั้งนั้นยังนานอยู่ เมื่อเทียบกับการเติมเชื้อเพลิงของรถยนต์ชนิดอื่น และน้ำหนักที่ยังสูงอยู่นั้น ส่งผลให้พลังงานในแต่ละครั้งที่อัดประจุต้องสูญเสียไปกับน้ำหนักของรถที่มากโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นการลดระยะเวลาในการอัดประจุและน้ำหนักโดยรวมของแหล่งกักเก็บพลังงานของรถยนต์ไฟฟ้าโดยการนำแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายาวมาใช้ร่วมกัน จะสามารถลดระยะเวลาในการอัดประจุและน้ำหนักโดยรวมได้ จึงนำไปสู่การออกแบบแหล่งกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน โดยจำเป็นต้องทราบวงจรไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกันของแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน ซึ่งในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบวงจรกำลัง วงจร Buck-boost converter รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และการทดลอง โดยผ่านโปรแกรม MATLAB เพื่อนำผลการทดลองนี้มาสรุปเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ต่อไป

3.2 การออกแบบวงจรไฟฟ้าของแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน

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

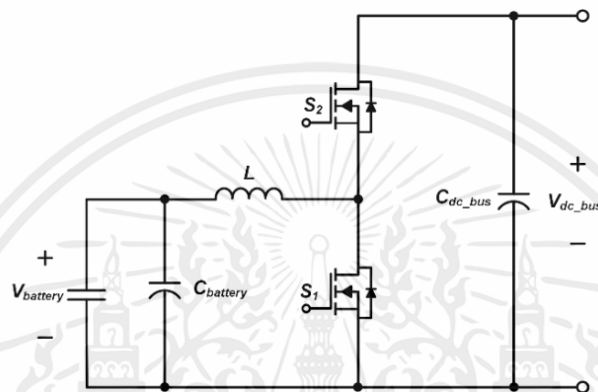


รูปที่ 3.1 วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบวงจรกำลัง

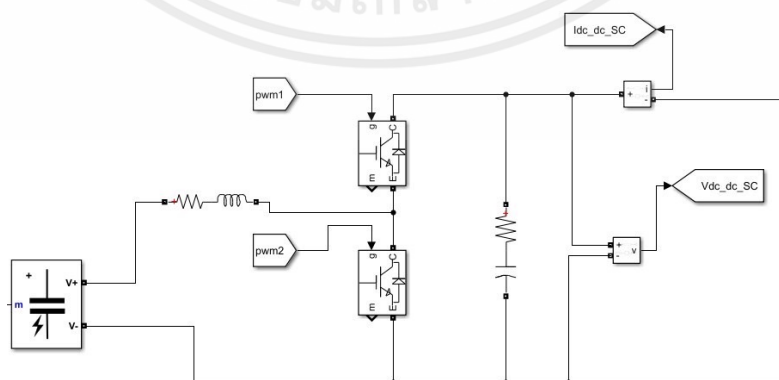
ออกแบบวงจรสำหรับการเชื่อมต่อกันของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน โดยประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC-DC converter) มีการออกแบบวงจรกำลังเพื่อเชื่อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน รวมถึงภาระของระบบซึ่งในที่นี้คือมอเตอร์รถยนต์ไฟฟ้า ที่มีแรงดันตกคร่อมเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 96 โวลต์ โดยระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนต้องเชื่อมต่อผ่านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทางก่อนเข้าสู่กริดของระบบ



รูปที่ 3.2 วงจร bidirectional DC-DC converter ชนิด half-bridge

3.4 การออกแบบวงจรอินเทอร์เฟสผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink

การเชื่อมต่อกันระหว่างแหล่งกักเก็บพลังงานและกริดของระบบไฟฟ้า จะเชื่อมต่อกันผ่านวงจรอินเทอร์เฟส ซึ่งในการทดลองนี้เราได้เลือกใช้งานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC-DC converter) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เข้ามาใช้งาน



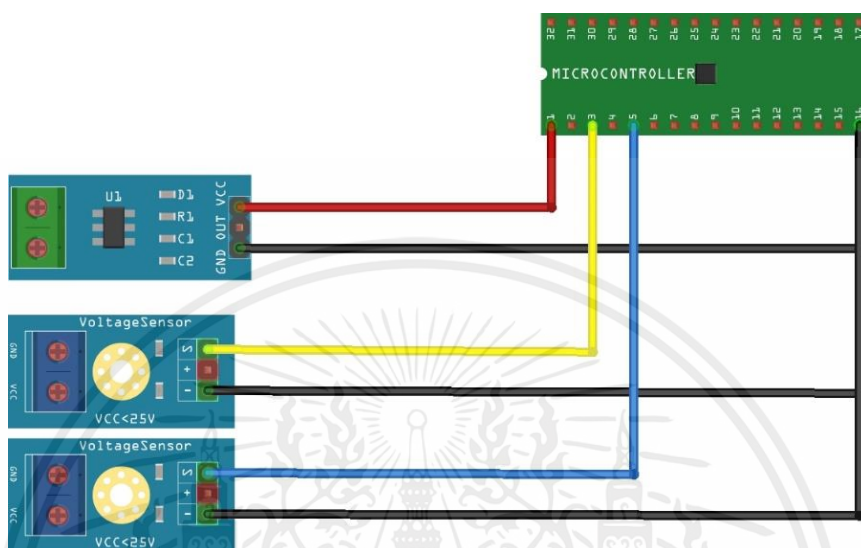
รูปที่ 3.3 การจำลองวงจรภายในของดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด

และกริด ของระบบ ผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การออกแบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของวงจรควบคุม

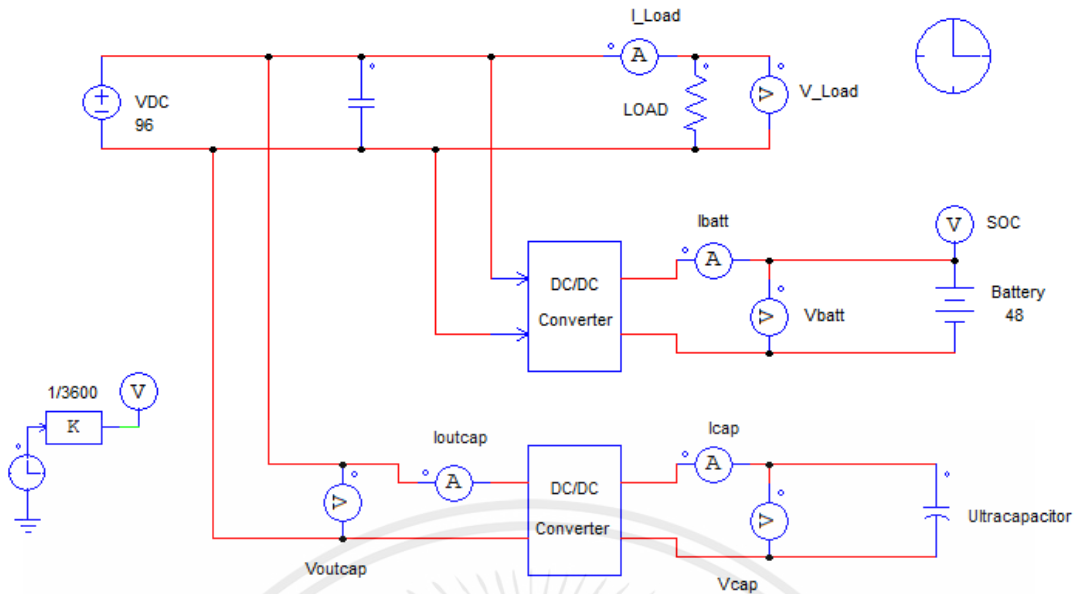
การเชื่อมต่ออุปกรณ์ของวงจรควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.4 ใช้ Microcontroller ของบริษัท Texas Instruments model TMS320F28069 คอยรับค่าจาก Sensor แล้วนำมาประมวลผลเพื่อส่งคำสั่งไปยัง IGBT ให้ทำงานตามที่ได้ตั้งค่าเอาไว้



รูปที่ 3.4 การจำลองการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของวงจรควบคุม

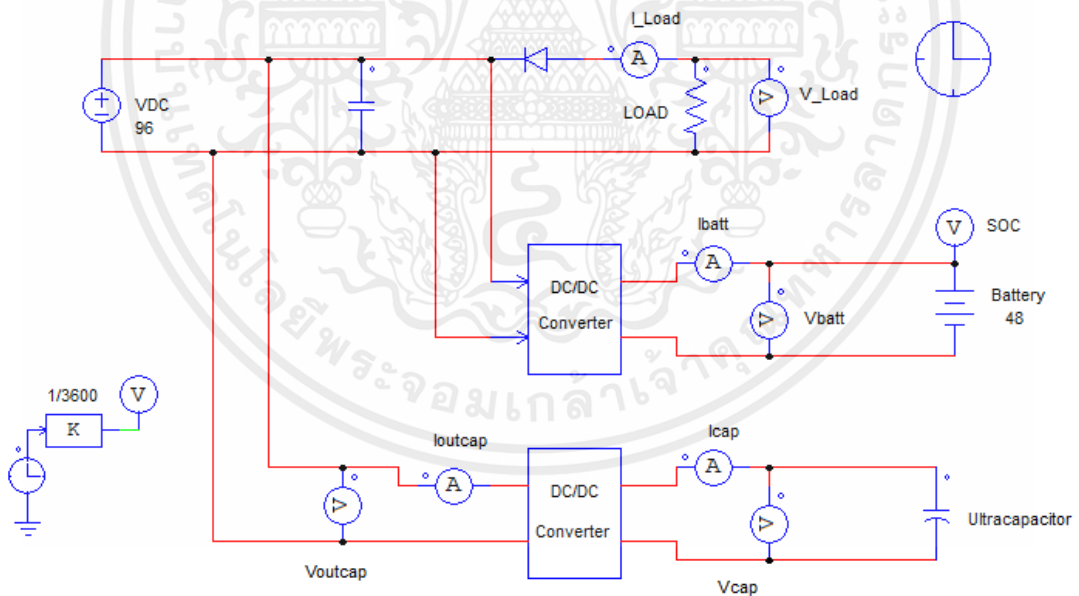
3.6 การออกแบบวงจรไฟฟ้ากำลังผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน จะใช้งานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทางสำหรับการเชื่อมต่อกันของแต่ละแหล่งกักเก็บพลังงาน มีการออกแบบวงจรกำลังโดยการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน รวมถึงภาระของระบบซึ่งในที่นี้คือมอเตอร์รถยนต์ไฟฟ้าเข้ากับ กริดที่มีแรงดันตกคร่อมเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 96 โวลต์



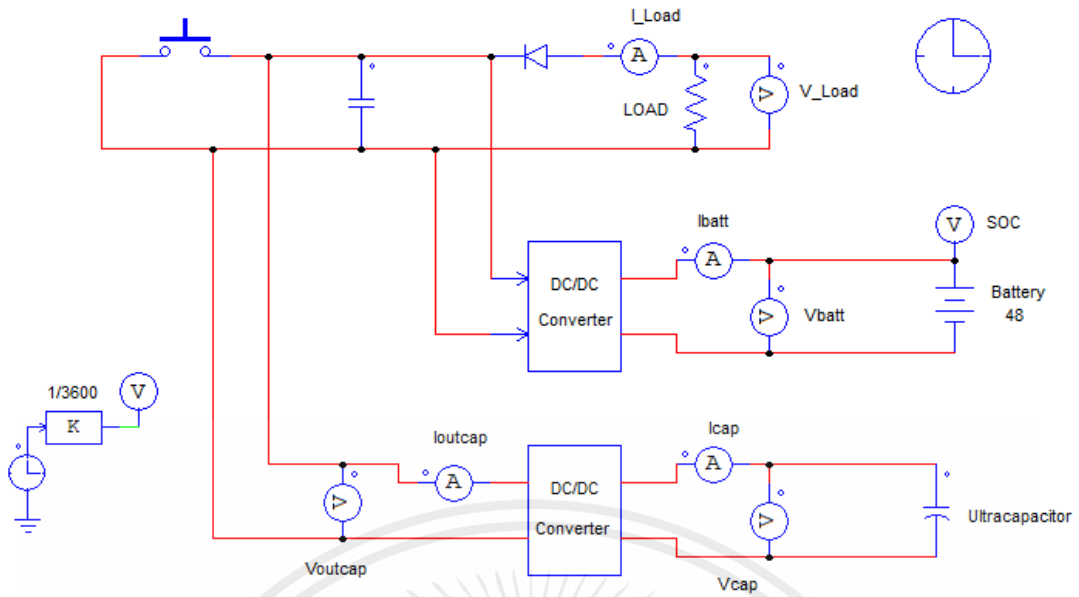
รูปที่ 3.5 วงจร Buck-Boost converter สำหรับการเชื่อมต่อกันของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน ผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

3.7 การจำลองการทำงานของวงจรไฟฟ้ากำลังผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

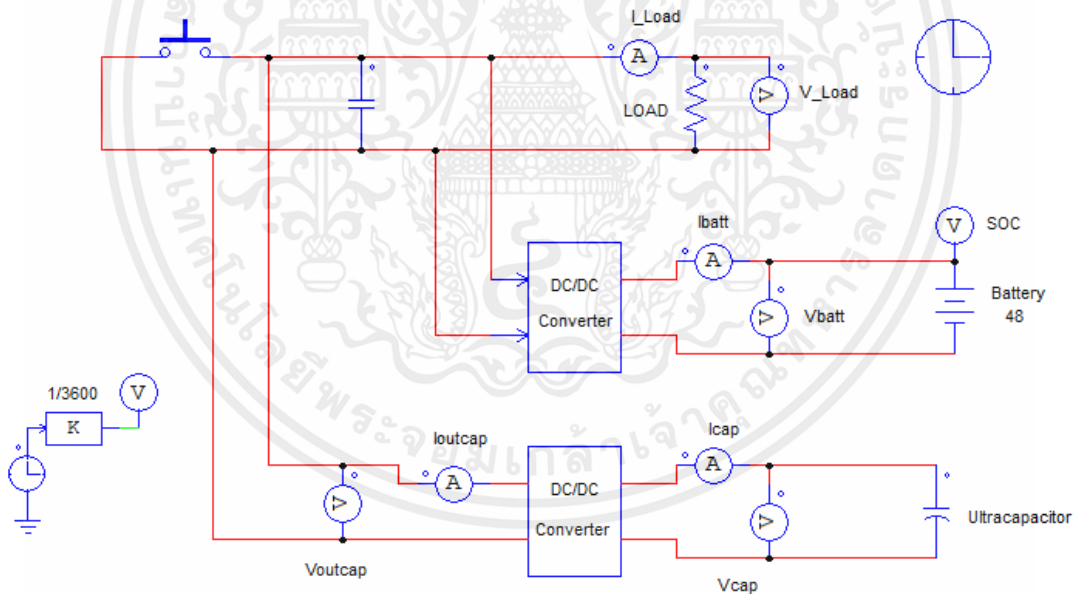


รูปที่ 3.6 การจำลองวงจรไฟฟ้ากำลัง ช่วงการอัดประจุจากเครื่องอัดประจุไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

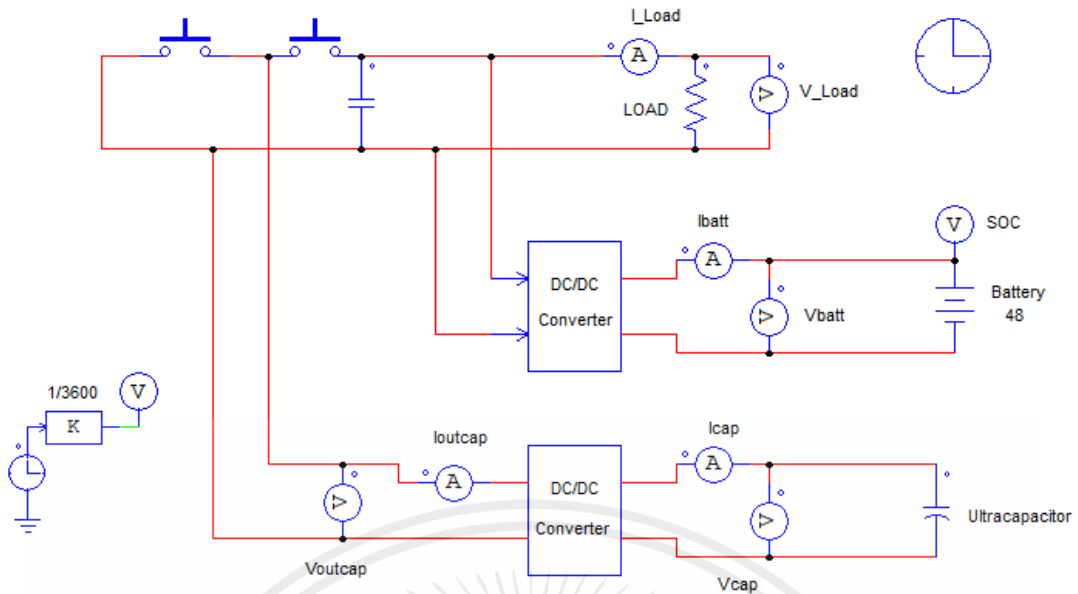


รูปที่ 3.7 การจำลองวงจรไฟฟ้ากำลัง ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

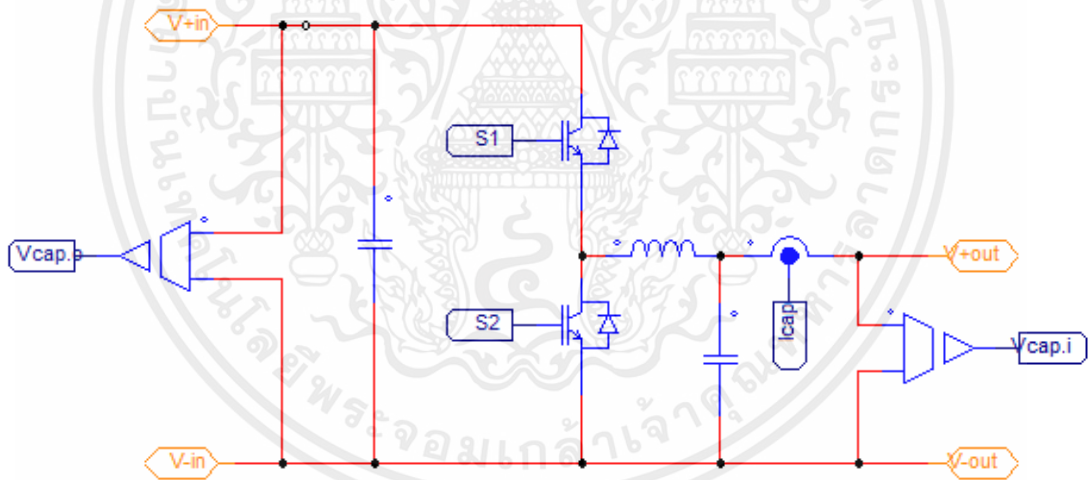


รูปที่ 3.8 การจำลองวงจรไฟฟ้ากำลัง ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและภาระทางไฟฟ้า ผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

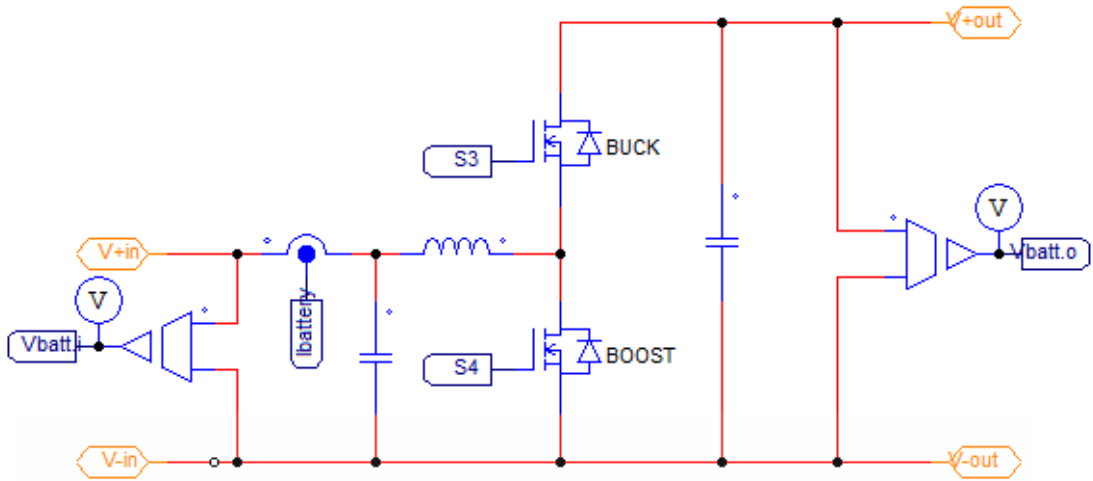


รูปที่ 3.9 การจำลองวงจรไฟฟ้ากำลัง ช่วงการถ่ายโอนประจุจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ไปยังภาระทางไฟฟ้า ผ่านโปรแกรม PSIM Simulation



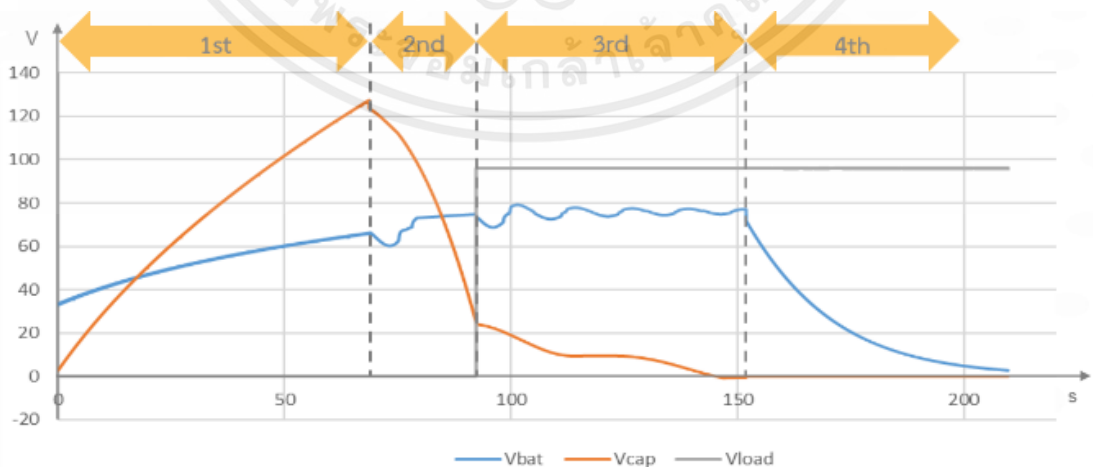
รูปที่ 3.10 การจำลองวงจรภายในของดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและ วงจรควบคุมแรงดันคงที่ ผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 การจำลองวงจรภายในของดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ระหว่างแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน และวงจรควบคุมแรงดันคงที่ ผ่านโปรแกรม PSIM Simulation

ในการทดลองจำลองระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ผ่านโปรแกรม PSIM Simulation แบ่งช่วงการทดลองออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงการอัดประจุจากเครื่องอัดประจุไฟฟ้าไปยังตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและภาระทางไฟฟ้า และช่วงการถ่ายโอนประจุจากแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนไปยังภาระทางไฟฟ้า โดยผลการจำลองของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสานผ่าน PSIM simulation แสดงในรูปที่ 3.11

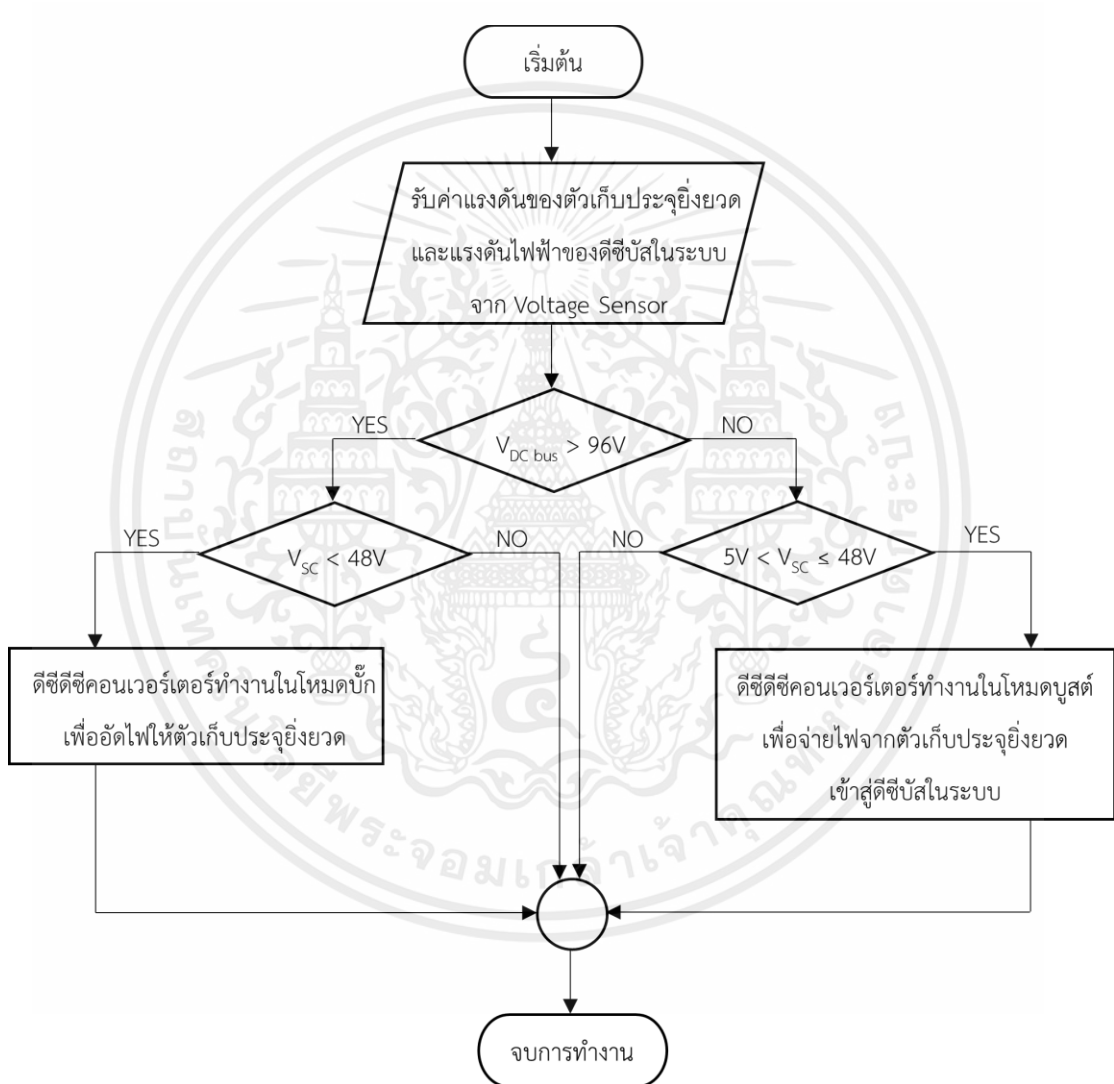


รูปที่ 3.12 กราฟผลการทดลองค่าแรงดันทางไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 Flowchart การทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง

Flowchart การทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC-DC converter) แสดงดังรูปที่ 3.13 มีการรับค่าแรงดันไฟฟ้าของดีซีบัสและตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้ามาใช้ในการประมวลผลผ่าน Microcontroller และทำการส่งคำสั่งไปยัง IGBT เพื่อกำหนดโหมดในการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง ได้แก่ โหมดบักและโหมดบูสต์



รูปที่ 3.13 Flowchart การทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง

3.9 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงอุปกรณ์ และการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน ระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและภาระทางไฟฟ้าผ่านวงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ประเภทวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ จำเป็นในวงจร รวมถึงการจำลองช่วงการทำงานในลักษณะต่างๆทั้งช่วงช่วงการอัดประจุจากเครื่องอัด ประจุไฟฟ้าไปยังตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด ช่วงการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดไปยัง ภาระทางไฟฟ้า ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อทดลองประสิทธิภาพของวงจรไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบ รวมถึงเพื่อสังเกตพฤติกรรมการทำงานของทั้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในวงจร และเป็นแนวทาง ในการทำการทดลองต้นแบบในขั้นต่อไป



บทที่ 4

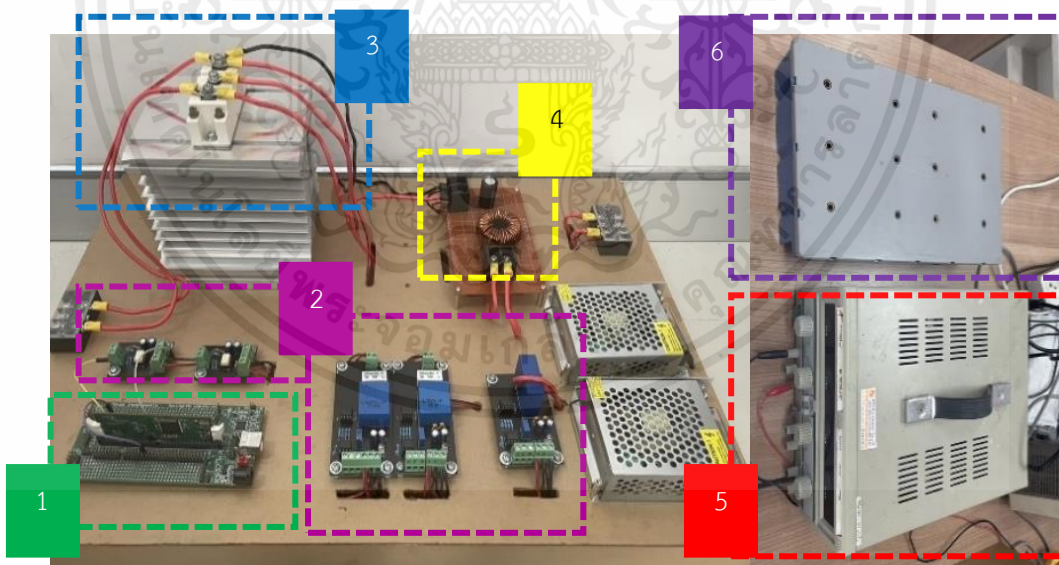
การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

4.1 บทนำ

วงจรไฟฟ้าของเครื่องต้นแบบในส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน มีองค์ประกอบดังนี้ วงจรกำลัง และวงจรควบคุม โดยการออกแบบจำเป็นต้องเข้าใจถึงการทำงานและโครงสร้างโดยละเอียดของอุปกรณ์ในแต่ละส่วนที่นำมาต่อร่วมกัน รวมถึงการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อที่อุปกรณ์จะสามารถทำงานร่วมกัน และสามารถแก้ไขเมื่อเกิดปัญหาในการทำงานได้

4.2 การออกแบบและสร้างชิ้นงานจริง

เนื่องด้วยจุดประสงค์หลักของโครงการนั้น ต้องการที่จะนำการออกแบบนี้ไปประยุกต์ใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบและการสร้างชิ้นงานต้นแบบต้องอยู่บนพื้นฐานของแนวคิดของการสร้างชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ประหยัดพื้นที่ น้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพที่สูง โดยเครื่องต้นแบบจะถูกจัดวางอยู่บนแผ่นอะคริลิก ขนาด 40.5 x 61.0 ตารางเซนติเมตร หนา 4 มิลลิเมตร จำนวน 1 แผ่น แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่องต้นแบบทั้งหมด: (1) Microcontrollers, (2) ชุดควบคุม, (3) IGBT, (4) ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ, (5) DC Power Supply, (6) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

4.3 ชุดวงจรกำลัง

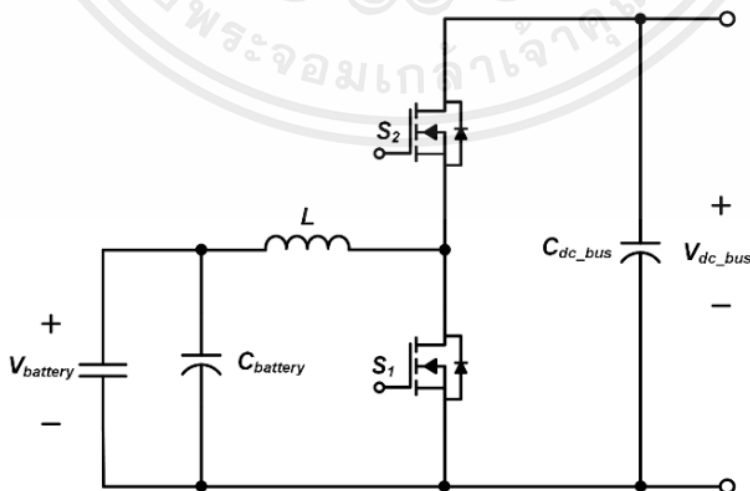
4.3.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ในการทดลองนี้ได้มีการนำตัวเก็บประจุยิ่งยวดของบริษัท Maxwell Technologies Part Number: BMOD0006 E160 B02 มาใช้งานร่วมกับระบบจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อลดระยะเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอัดประจุของแบตเตอรี่ด้วย ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 2.18 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

4.3.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC-DC converter) ทำงานโดยใช้หลักการของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์และวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.25 วงจร bidirectional DC-DC converter ชนิด half-bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทางจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 โหมด ดังนี้

1. โหมดบัก (Buck Mode)

ทำงานอยู่ในช่วงไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า 96-48 V ซึ่งมีการคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุดังต่อไปนี้

$$\text{จากสูตร} \quad D = \frac{V_{SC,max}}{V_{Dlink}} \quad (4.1)$$

$$D = \frac{48 \text{ V}}{96 \text{ V}} = 0.50$$

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

$$L_{min} = \frac{(1-0.5) \cdot 96}{2(25,000)} \times \frac{1}{100} = 9.60 \mu\text{H}$$

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

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

$$C = \frac{(1-0.5)}{8(9.60 \times 10^{-6})(25,000)^2 \times 0.2} = 52.0833 \mu\text{F}$$

2. โหมดบูสต์ (Boost Mode) ทำงานอยู่ในช่วงไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า 48-5 V ซึ่งมีการคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ ดังต่อไปนี้

$$\text{จากสูตร} \quad \frac{V_{Dlink}}{V_{SC,min}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (4.4)$$

$$\frac{96}{5} = \frac{1}{(1-D)}$$

$$D = 0.948$$

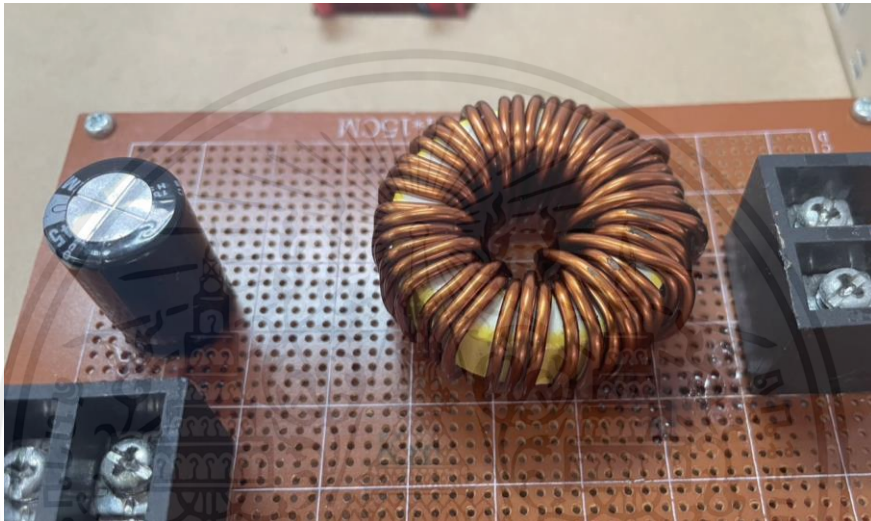
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร

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

$$L_{min} = \frac{0.948(1-0.948)^2}{2(25,000)} \times \frac{96}{100}$$

$$L_{min} = 4.922 \text{ nH}$$

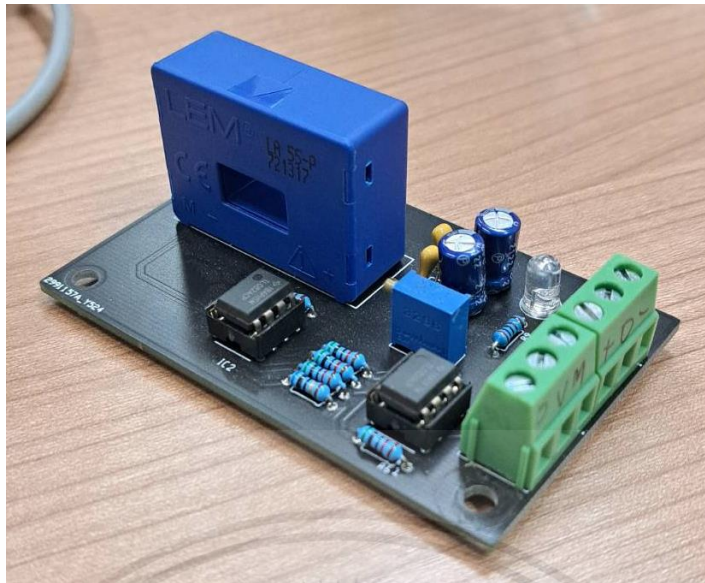


รูปที่ 4.2 ตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำ

4.4 การออกแบบวงจรควบคุม

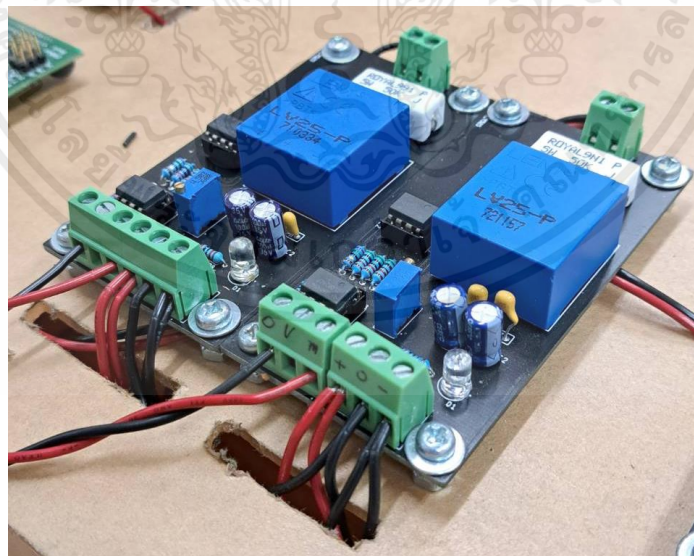
4.4.1 ชุดวงจรควบคุมสำหรับควบคุมกระแสป้อนกลับและแรงดันป้อนกลับ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนดังนี้

1. ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า (Current sensors) ทำหน้าที่ตรวจจับกระแสไฟฟ้าแล้วทำการป้อนกลับสัญญาณเข้าไปสู่ตัวควบคุม โดยตัวรับค่ากระแสป้อนกลับใช้ LEM LA 55-P ซึ่งรับค่าสัญญาณกระแสมาจากเอาต์พุตของวงจร โดยมีอัตราส่วนจะได้สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดลดลงและเข้าสู่ อนุาล็อกอินพุทของ Microcontrollers



รูปที่ 2.28 วงจรตรวจจับกระแส

2. ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า (Voltage sensors) ทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันไฟฟ้าในการอัดประจุแล้วทำการป้องกันกลับสัญญาณไปเข้าสู่ตัวควบคุมโดยใช้หลักการของการแบ่งแรงดันบนตัวต้านทาน เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าจริงที่ Microcontrollers ได้รับมีค่าอยู่ที่ 5 โวลต์ จากนั้นจะนำค่าที่ได้เข้าสู่อนาล็อกอินพุทของ Microcontrollers โดยตัวรับค่ากระแสป้องกันกลับใช้ LEM LV25-P



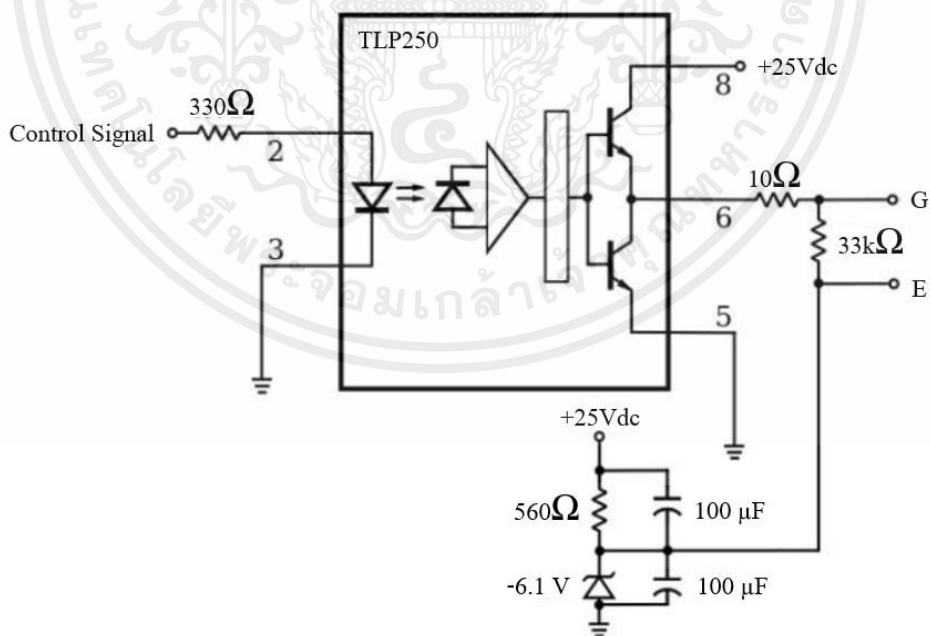
รูปที่ 2.26 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วงจรกำเนิดสัญญาณขับสวิตช์ (Gate Drive Signal Generator) มีหน้าที่ในการขับสวิตช์ให้ทำงานตามที่ต้องการซึ่งวงจรจะรับคำสั่งมาจาก Microcontrollers เพื่อทำการแยกวงจรควบคุมและวงจรถูกขับออกจากกัน จากนั้นสัญญาณที่ได้มาจาก Microcontrollers มาทำการสั่ง ON/OFF สวิตช์ IGBT ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 2.36 เครื่องกำเนิดสัญญาณขับสวิตช์



รูปที่ 2.35 วงจรกำเนิดสัญญาณขับสวิตช์

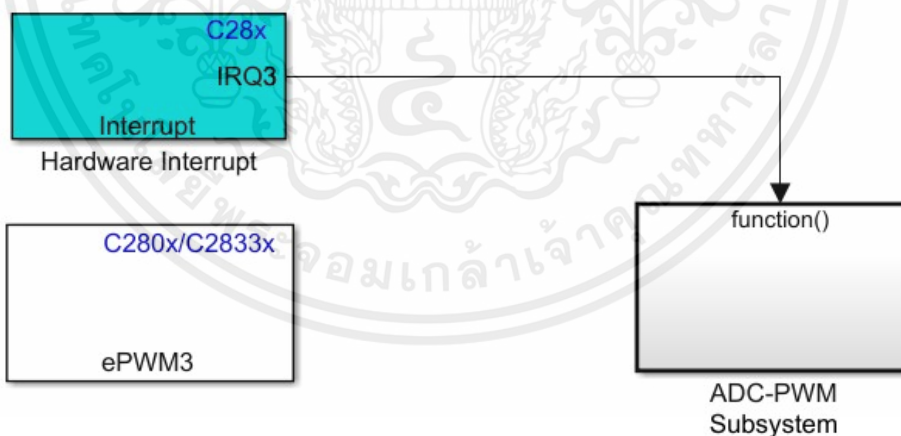
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล รุ่น TMS320F28069 ดังแสดงในรูป 4.9 มีหน้าที่ในการคำนวณสัญญาณควบคุมต่าง ๆ ซึ่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย สัญญาณกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่าย และสัญญาณกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทางจะถูกส่งมาจากวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า



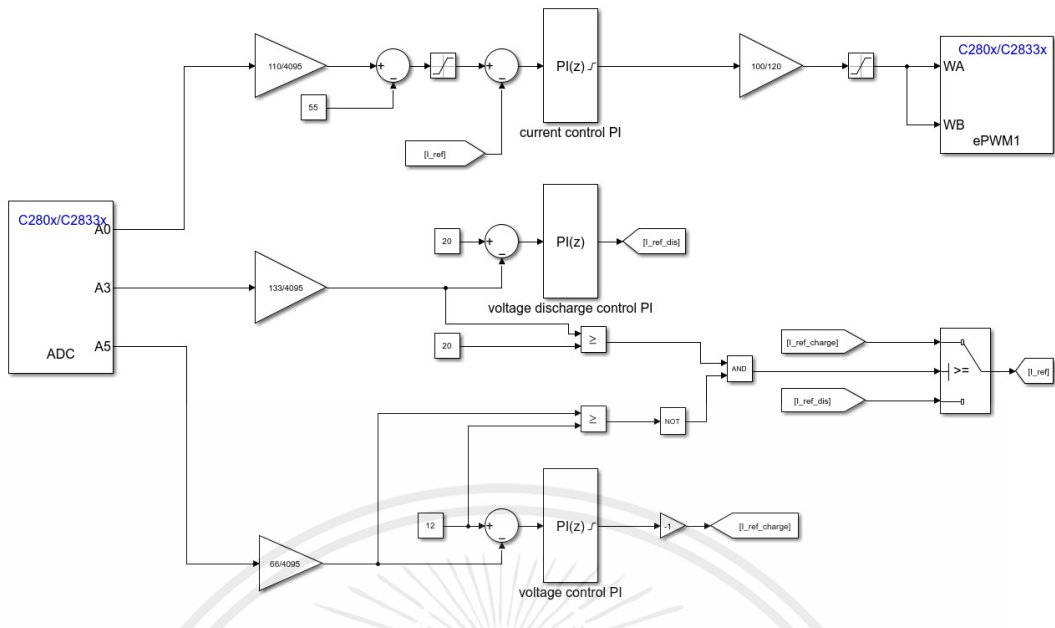
รูปที่ 2.30 หน่วยประมวลผลรุ่น TMS320F28069

4.5 การออกแบบการเขียนโปรแกรมควบคุม



รูปที่ 4.3 บล็อกการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ในโปรแกรม MATLAB Simulink

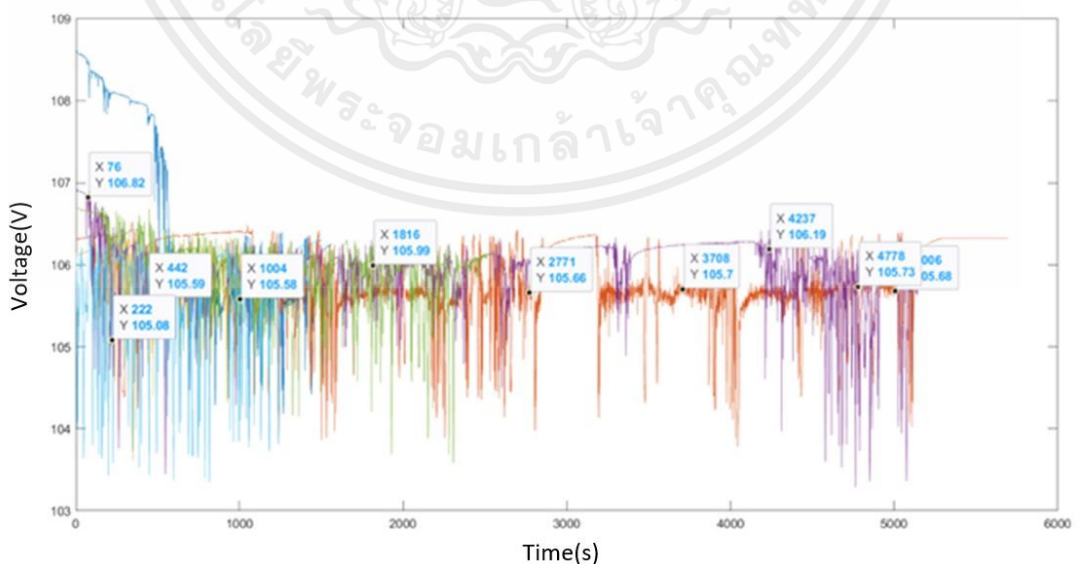
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ไดอะแกรมของวงจรควบคุม

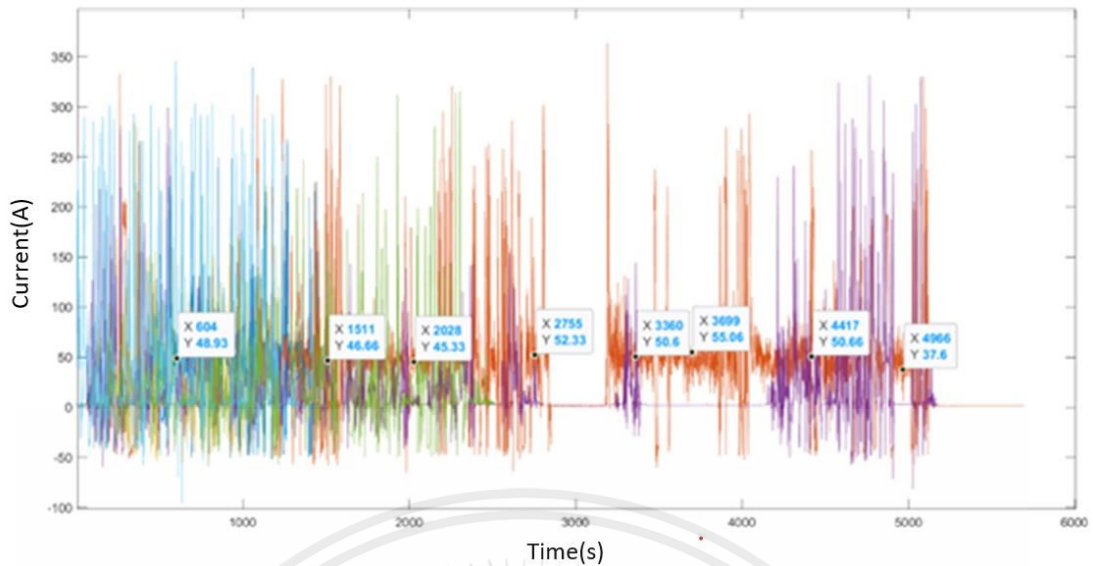
4.6 ค่า Characteristics ของรถ UNICON1

การใช้งานรถไฟฟ้า UNICON1 ในแต่ละรอบการทำงานจะมีการบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นไว้ เช่น แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, ค่า SOC, ค่าอุณหภูมิของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ โดยสามารถนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ทำการบันทึกค่าไว้ มาวิเคราะห์หาขนาดกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานจริงได้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงอัตราการใช้แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า UNICON1 ขณะใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงอัตราการใช้กระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้า UNICON1 ขณะใช้งานจริง

4.7 สรุป

การออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรตีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ในปริมาณนี้ จะเลือกใช้วงจรตีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง โดยจำกัดกระแสชาร์จให้ไม่เกิน 100 แอมป์ วงจรตีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทางควบคุมการทำงานด้วยการเปิดและปิดของสวิตช์ซึ่งเลือกใช้ไอจีบีทีของบริษัท SEMIKRON model SKM100GB124D ซึ่งจะสับสวิตช์ที่ความถี่ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยควบคุมด้วย Microcontrollers (MCUs) model TMS320F28069 เป็นตัวควบคุมด้วยการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยกระแสป้อนกลับซึ่งรับสัญญาณมาจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแส (LEM LA 55-P) และควบคุมแบบป้อนกลับด้วยแรงดันซึ่งรับสัญญาณมาจากอุปกรณ์ตรวจจับแรงดัน (LEM LV25-P) ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบค่าต่าง ๆ ของวงจร เช่น ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ รวมถึงการออกแบบวงจรควบคุมวงจรไฟเลี้ยงที่ใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

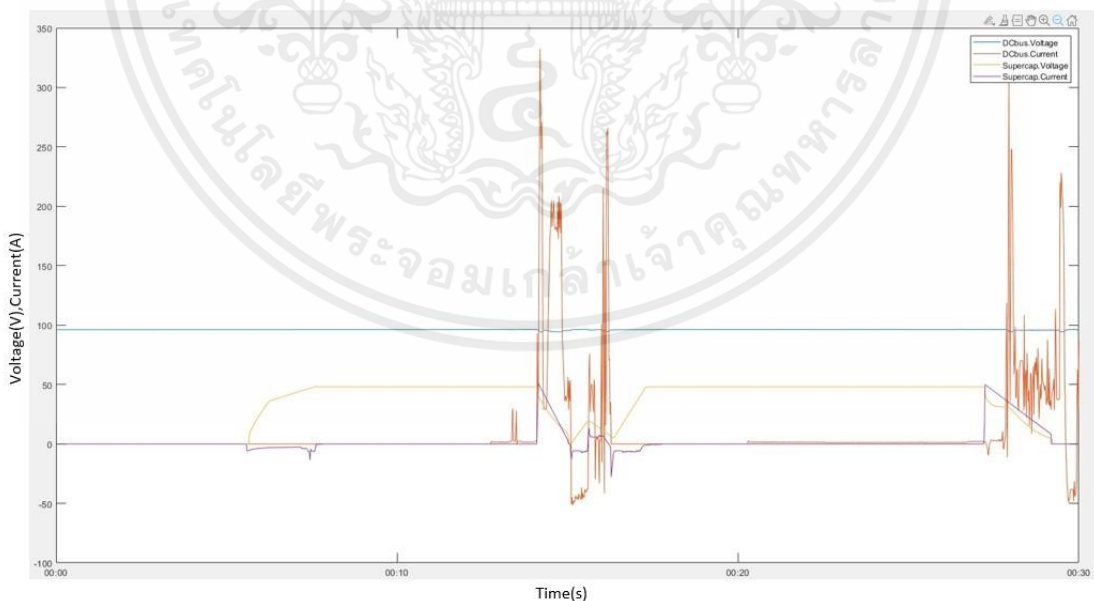
5.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอถึงผลการทดสอบการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัส โดยผ่านโมดูล บั๊ก-บูสต์ คอนเวอร์เตอร์ ด้วยการจ่ายกระแสและแรงดันที่มีค่าคงที่ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลการถ่ายโอนพลังงานไปยังดีซีบัส และโหลดพิกัด 96 โวลต์ 10 กิโลวัตต์ ซึ่งประกอบไปด้วยการนำเสนอผลของการทำงานของวงจร ในการถ่ายโอนพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุยิ่งยวดและดีซีบัส และทำการบันทึกค่าระดับของการอัดประจุในตัวเก็บประจุยิ่งยวด แรงดันไฟฟ้าและกระแสที่ได้จากการทดลอง ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและดีซีบัสตลอดช่วงเวลาการถ่ายโอนพลังงาน

5.2 ผลการทดสอบ

5.2.1 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน

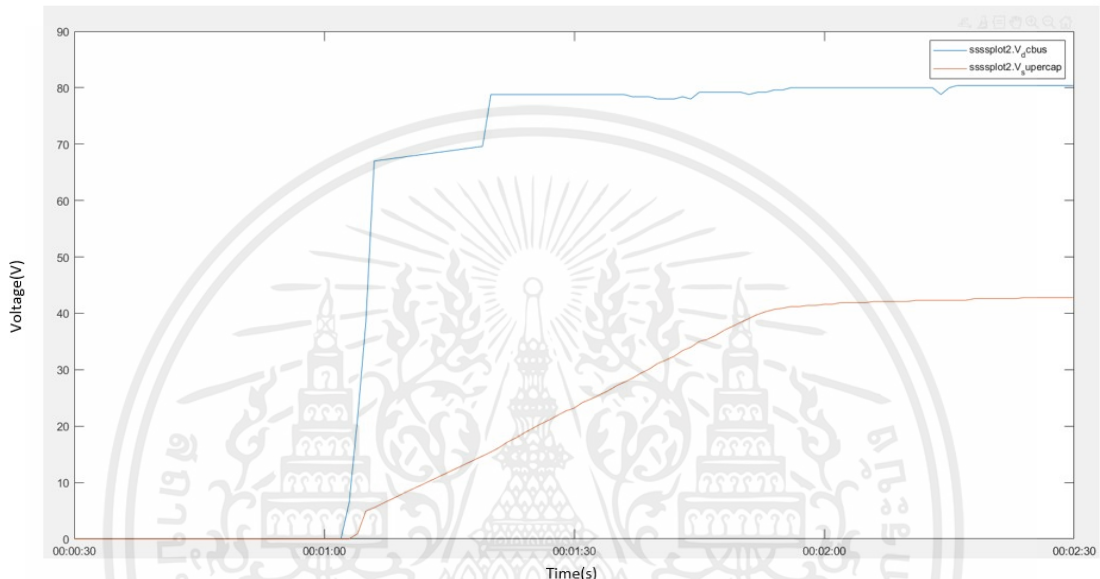
การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบ่งเป็น 3 สถานะการทำงานคือ การอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดผ่านดีซีบัส การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัส การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัสและโหลด



รูปที่ 5.1 กราฟการอัดประจุและการคายประจุของระบบกักเก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สภาวะการทำงานที่ 1 การอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดผ่านดีซีบัส
การทำงานในสภาวะการทำงานนี้จะมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า พิกัดแรงดันที่ออกแบบ
ในการทดลองคือ 80 โวลท์หรือมากกว่า พิกัดกระแส 50 แอมแปร์ เข้าทางด้านดีซีบัส เพื่อจำลองส
ถานการณ์ที่มีการอัดประจุให้แก่รถยนต์ไฟฟ้า จากนั้นจะทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถ่ายโอนจากดี
ซีบัสไปยังตัวเก็บประจุยิ่งยวดโดยผ่านดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ กราฟการอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุ
ยิ่งยวดผ่านดีซีบัส แสดงดังรูปที่ 5.2



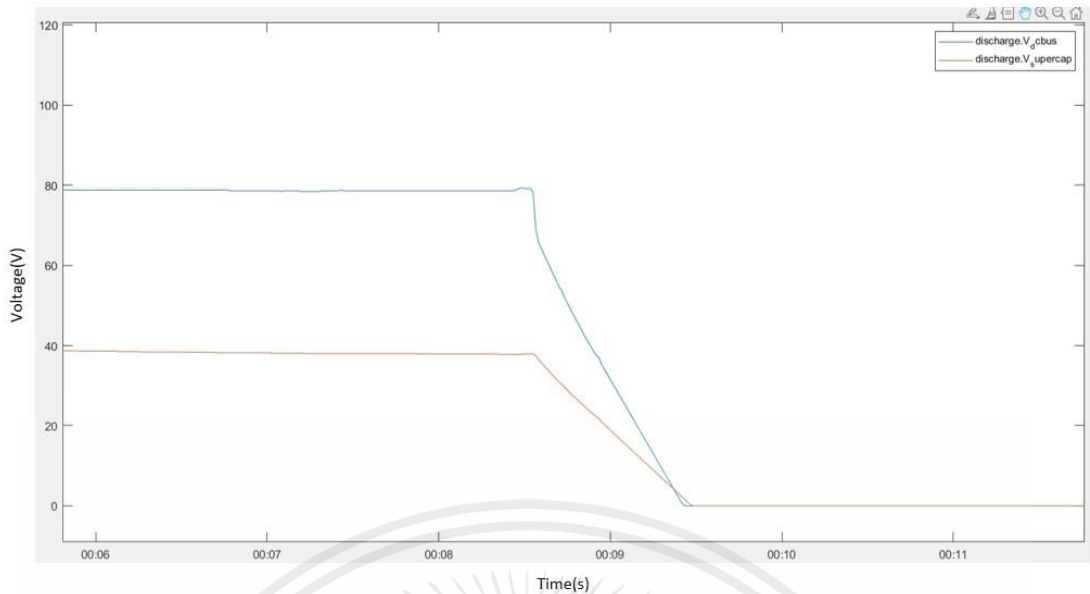
รูปที่ 5.2 กราฟการอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากดีซีบัส

ในรูปที่ 5.2 แสดงกราฟการอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากดีซีบัส โดยกราฟ
สีน้ำเงินแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าของดีซีบัสที่กำหนดคือ 80 โวลท์ กราฟสีแดงแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าของ
ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

- สภาวะการทำงานที่ 2 การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซี
บัส โดยใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์

การทำงานในสภาวะการทำงานนี้จะมีการจ่ายไฟไปยังดีซีบัสซึ่งต่อกับตัวเก็บประจุ
ยิ่งยวดผ่านวงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ ในสภาวะการทำงานปกติที่แรงดันไฟฟ้าฝั่งดีซีบัสนั้น มากกว่า
แรงดันไฟฟ้าที่โหลดต้องการ พลังงานไฟฟ้าจากดีซีบัสจะถ่ายโอนไปยังตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อทำการ
อัดประจุ และในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าฝั่งดีซีบัสนั้นน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดต้องการ พลังงาน
ไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะถูกถ่ายโอนไปยังดีซีบัสเพื่อทำการชดเชยพลังงานส่วนที่ขาดไป
เพื่อให้พลังงานที่จ่ายให้แก่โหลดมีค่าคงที่ กราฟการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซี
บัส เป็นดังรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

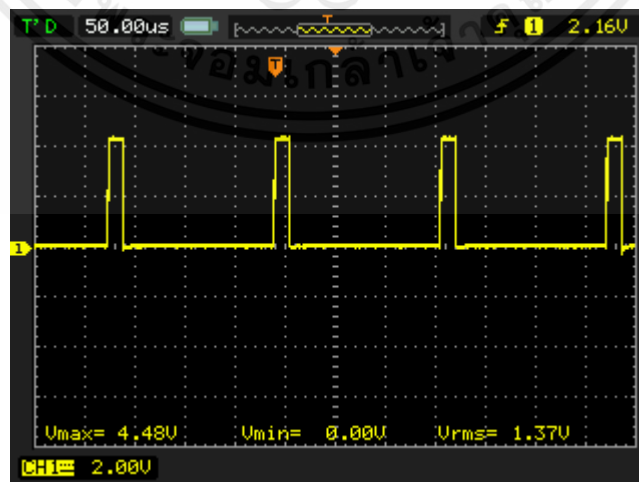


รูปที่ 5.3 กราฟการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัล

ในรูปที่ 5.3 แสดงกราฟการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัล โดยกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าของดีซีบัลที่กำหนดคือ 80 โวลต์ กราฟสีแดงแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

การทำงานของสภาวะการทำงานที่ 2 การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัลโดยใช้วงจรถิซิติซีคอนเวอร์เตอร์ จะแบ่งโหมดทำงานเป็น 2 โหมด คือ การทำงานโหมดบักของวงจรถิซิติซีคอนเวอร์เตอร์ และการทำงานโหมดบูสต์ของวงจรถิซิติซีคอนเวอร์เตอร์

การทำงานโหมดบักของวงจรถิซิติซีคอนเวอร์เตอร์

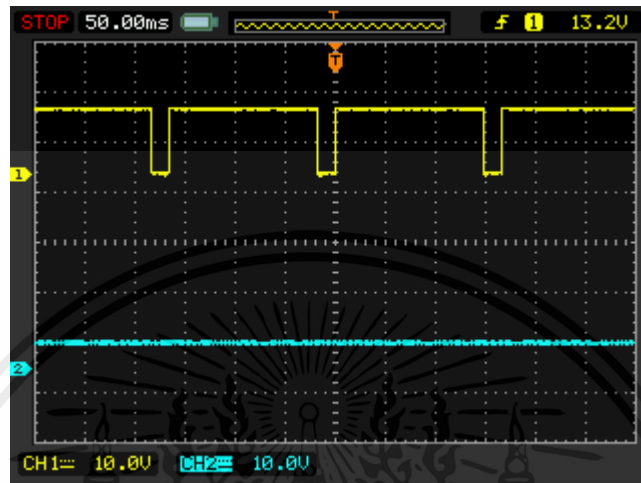


รูปที่ 5.4 กราฟสัญญาณ Duty cycle ทำงานที่ 90 เปอร์เซ็นต์ เพื่อไปขับสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

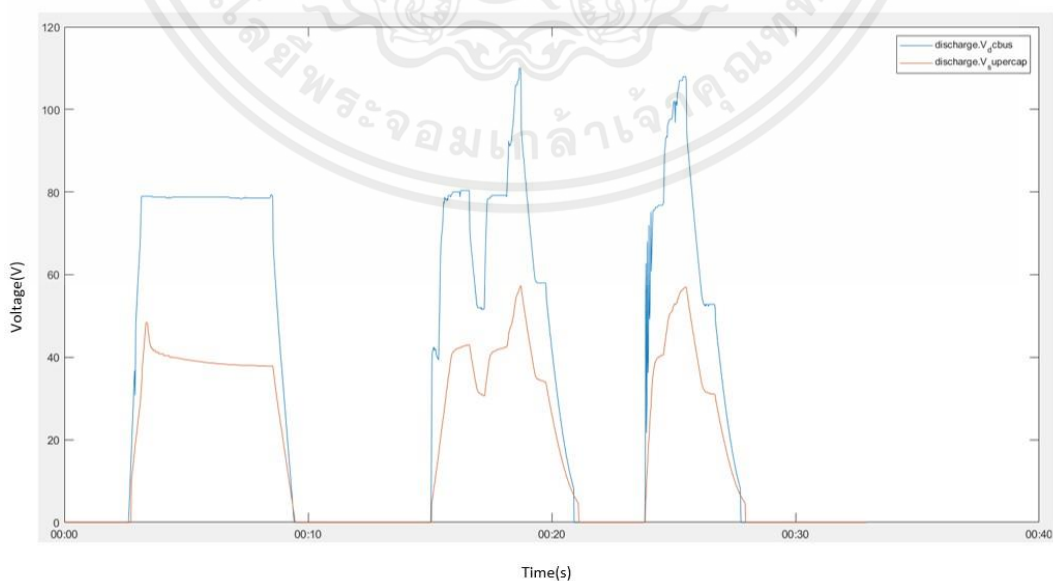
จากรูปที่ 5.4 แสดงถึงกราฟสัญญาณดิวิตซ์ไคเคลที่ออกจาก Microcontroller ก่อนจะเข้าวงจรขับเคลื่อนเพื่อไปขับสวิตช์ โดยจากกราฟจะแสดงค่าแรงดันเท่ากับ 4.48 โวลต์ และ 0 โวลต์ โดยมีความถี่การสวิตช์ซึ่งของวงจรที่ 25 กิโลเฮิร์ต และค่าดิวิตซ์ไคเคลเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์

การทำงานของโหมดบัสต์ของวงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์



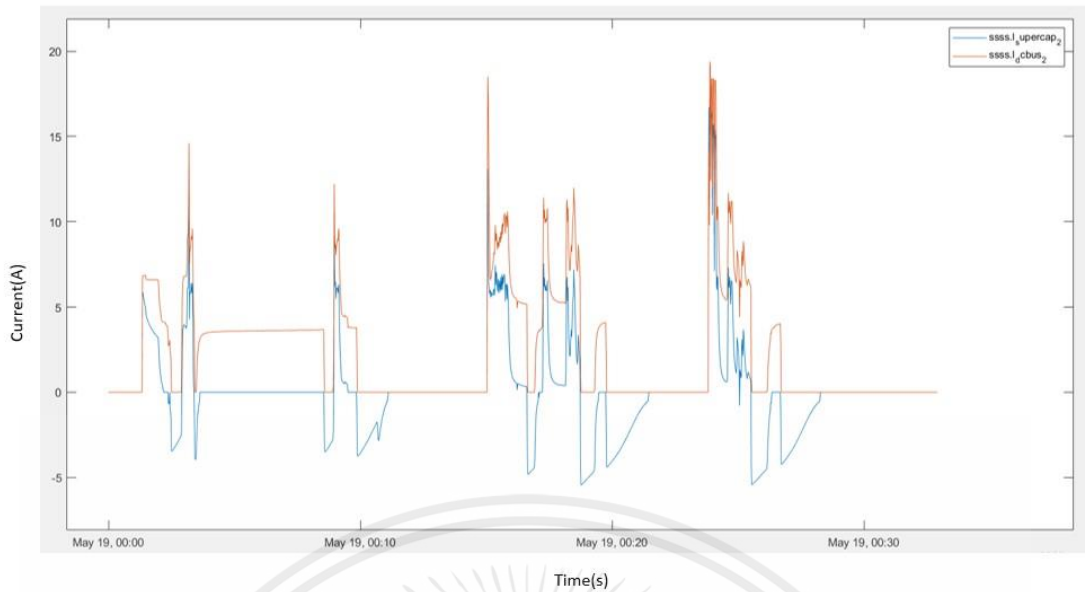
รูปที่ 5.5 กราฟสัญญาณ Duty cycle ทำงานที่ 20 เปอร์เซ็นต์ เพื่อไปขับสวิตช์

จากรูปที่ 5.5 แสดงถึงกราฟสัญญาณดิวิตซ์ไคเคลที่ออกจาก Microcontroller ก่อนจะเข้าวงจรขับเคลื่อนเพื่อไปขับสวิตช์ โดยจากกราฟจะแสดงค่าแรงดันเท่ากับ 4.48 โวลต์ และ 0 โวลต์ โดยมีความถี่การสวิตช์ซึ่งของวงจรที่ 25 กิโลเฮิร์ต และค่าดิวิตซ์ไคเคลเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายจากตัวเก็บประจุยิววดและดีซีบัสไปยังโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงกระแสไฟฟ้าที่จ่ายจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดและดีซีบัสไปยังโหลด

จากรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 เป็นกราฟแสดงกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดและดีซีบัสไปยังโหลด ซึ่งในการทดลองจะทำการปรับค่า Duty cycle ให้ไม่คงที่ เพื่อจำลองการใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้าของจริง โดยกราฟสีแดงและสีน้ำเงินแสดงถึงกระแสและแรงดันไฟฟ้าของดีซีบัสและตัวเก็บประจุยิ่งยวดตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ดีซีบัสเพื่อชดเชยพลังงานที่โหลดต้องการได้

- สถานะการทำงานที่ 3 การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัสและโหลดโดยใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์

การทำงานในสถานะการทำงานนี้ ผลการทดลองจะเหมือนกับสถานะการทำงานที่ 2 คือจะมีการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าไปยังดีซีบัส โดยได้ทำการต่อโหลดเพื่อศึกษาการทำงานในการถ่ายโอนพลังงานให้แก่โหลดเพิ่มเข้าไปด้วย

5.3 สรุป

จากการทดลองแบ่งการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานเป็น 3 สถานะการทำงาน สถานะการทำงานที่ 1 การอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดผ่านดีซีบัล จากการศึกษาพบว่าวงจรสามารถทำการอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดผ่านการจ่ายไฟเข้าทางดีซีบัลได้ ซึ่งเป็นการจำลองลักษณะการอัดประจุในรถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป สถานะการทำงานที่ 2 การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัลโดยใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ จากการทดลองพบว่าวงจรต้นแบบดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์สามารถถ่ายโอนพลังงานในโหมดการทำงานทั้งโหมดบักและโหมดบูสต์ของวงจรได้ตามที่ออกแบบไว้ ตามรูปที่ 5.3 ถึง รูปที่ 5.7 และสถานะการทำงานที่ 3 การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัลและโหลดโดยใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์



บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

6.1 บทสรุป

การกักเก็บพลังงานด้วยระบบแบตเตอรี่ในปัจจุบันได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ซึ่งรวมถึงการใช้แบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้าด้วย จากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ ทำให้ทราบถึงข้อจำกัดในการด้านการอัดประจุและระยะเวลาในการส่งจ่ายพลังงาน หรือมีความหนาแน่นพลังงานสูง แต่มีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าต่ำ ส่งผลกระทบให้ระยะเวลาในการอัดประจุแต่ละครั้งมีความยาวนาน ทางคณะผู้จัดทำโครงการจึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการผสมผสานระบบกักเก็บพลังงานดังกล่าวด้วยตัวเก็บประจุแบบยิ่งยวดซึ่งมีคุณสมบัติความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง แต่มีความหนาแน่นพลังงานที่ต่ำ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีของทั้งสองระบบกักเก็บพลังงานร่วมกัน

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากำหนดตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาใช้งานในระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ ในการศึกษาช่วงแรกเป็นการศึกษาถึงคุณลักษณะเฉพาะของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าทั้งสองแบบและระบบการถ่ายโอนพลังงานโดยใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ หลังจากนั้นจึงทำการจำลองระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ในการจำลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะการโอนถ่ายพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุยิ่งยวดกับดีซีบัสในระบบ รวมถึงในส่วนของการถ่ายโอนพลังงานให้กับภาระไฟฟ้าด้วย

โดยการบันทึกกราฟความสัมพันธ์สองชนิดคือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด แรงดันของดีซีบัส และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด กระแสไฟฟ้าของดีซีบัส และกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ จากผลการจำลอง โครงการวิจัยนี้ได้ใช้วงจร Bidirectional DC-DC converter ในการโอนถ่ายพลังงานระหว่างแหล่งกักเก็บพลังงานทั้งสอง เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ความซับซ้อนของวงจรไม่มาก อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบาและขนาดไม่ใหญ่มากอีกด้วย

ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานนี้ทำงานที่พิกัดแรงดัน 96 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 10 กิโลวัตต์ โดยใช้วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ชนิด Bidirectional DC-DC converter มาประยุกต์ใช้ในถ่ายโอนพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุยิ่งยวดกับดีซีบัส โดยใช้ Microcontroller TMS320F28069 ในการควบคุมการทำงานของวงจร จากผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดได้ และถ่ายโอนพลังงานจากการคายประจุของตัวเก็บไฟฟ้าแบบยิ่งยวดไปยังดีซีบัส ในช่วงบูสต์ได้ในช่วง 96 โวลต์จนถึง 64 โวลต์ ที่ดิวิตีไซเคิล 20 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้จากการศึกษาและทดลองพบว่าวงจร Bidirectional DC-DC converter ที่ใช้ในการถ่ายโอนพลังงานระหว่างตัวเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจักษ์ยิ่งยวดกับดีซีบัสเพื่อใช้งานในแหล่งกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของระบบกักเก็บไฟฟ้าแบบผสมผสานได้

6.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง

จากการดำเนินการทดลองตลอดโครงการวิจัยนี้พบว่า มีข้อควรเสนอแนะและข้อควรระวัง ดังต่อไปนี้

1. เนื่องจากตัวเก็บประจื่อยิ่งยวดมีราคาค่อนข้างสูง ในการทดลองจำเป็นต้องลดขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองลงมา เพื่อป้องกันอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้ จึงอาจทำให้ข้อมูลผลการทดลองที่ได้นั้นน้อยเกินไปหรือคาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง
2. ใช้อุปกรณ์สวิตซ์ที่มีค่ากำลังสูญเสียที่น้อยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในส่วนของ วงจร บั๊ก-บูสต์ คอนเวอร์เตอร์
3. ในการออกแบบนั้นควรเลือกใช้ใช้อุปกรณ์ที่มีพิกัดกระแสและแรงดันเกินกว่าที่ออกแบบไว้เพื่อเป็นการป้องกันอุปกรณ์ไม่ให้เสียหายเมื่อใช้กระแสหรือแรงดันสูง
4. อุปกรณ์ในการวัดแรงดันไฟฟ้าควรใช้ Differential Probe เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

6.3 แนวทางการพัฒนา

โครงการวิจัยนี้สามารถพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เพิ่มพิกัดกำลัง และเพิ่มความหลากหลายในการใช้งานให้มากขึ้นดังนี้ ดังต่อไปนี้

1. ใช้ตัวเก็บประจื่อยิ่งยวดที่พิกัดแรงดันซึ่งใช้ในระบบของรถยนต์ไฟฟ้าจริง ๆ แทนการลดพิกัดแรงดันลงมา เพื่อนำไปพัฒนาสู่การใช้งานจริง

อ้างอิง

- [1] Nan Qin. (2016). “Electric Vehicle Architectures”. EV and Technology workshop, Electric vehicles transportation center.
- [2] R A Hanifah, S F Toha and S Ahmad. (2015). Electric Vehicle Battery Modelling and Performance Comparison in Relation to Range Anxiety.
- [3] Ryan Collin, Yu Miao, Alex Yokochi, Prasad Enjeti and Annette von Jouanne. (2019). “Advanced Electric Vehicle Fast-Charging Technologies”. Energies 2019, 12, 1839; <https://doi:10.3390/en12101839>
- [4] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunging Tan, Yongliang Li, Yulong Ding. (2008). Progress in electrical energy storage system: A critical review. Progress in Natural Science, 19(3), 291–312.
- [5] Ribeiro PF, Johnson BK, Crow ML, et al. Energy storage systems for advanced power applications. Proc IEEE 2001;89(12):1744–56
- [6] เอพีอาร์เทค. (2565). 7 ประเภทแบตเตอรี่รถยนต์ที่เจ้าของรถทุกคนควรรู้. <https://www.aprtech.co.th/content/6797/7-type-of-car-battery-that-we-should-to-know>.
- [7] สยามอีเอสเซลล์. (ม.ป.ป.). แบตเตอรี่น้ำ (WET). <https://www.gsbattery.co.th/th/productDetail/57/3/CV>
- [8] แบตเตอรี่มิตรภาพ. (ม.ป.ป.). แบตเตอรี่แห้ง (SMF). <https://batterymittapap.com/shop/3k-vs80V>
- [9] พงษ์แบตเตอรี่. (ม.ป.ป.). แบตเตอรี่กึ่งแห้ง (MF). <https://pongbattery.com/mf-battery/#:~:text=แบตเตอรี่กึ่งแห้ง%20หรือ%20Maintenance%20free%20%28MF%29%20คือ%E>
- [10] สยามอีเอสเซลล์. (ม.ป.ป.). แบตเตอรี่ไฮบริด. <https://www.gsbattery.co.th/th/productDetail/51/2/HB>
- [11] RenewableGreen. (n.d.). Gel batteries. <https://www.renovablesverdes.com/en/baterias-de-gel>.
- [12] พงษ์แบตเตอรี่. (ม.ป.ป.). แบตเตอรี่ AGM. <https://pongbattery.com/agmbattery>.
- [13] EverExceed. (n.d.). Lithium-Ion Battery Pack. https://www.everexceed.com/12-8v-100ah-lithium-ion-battery-pack-lifepo4-battery-to-replace-sla-battery_p285.html.
- [14] คลังไอซี. (ม.ป.ป.). ทำความรู้จัก คาปาซิเตอร์ (Capacitor) หรือ ตัวเก็บประจุ. [https://klang-ic.com/blog/ทำความรู้จัก-คาปาซิเตอร์-\(capacitor\)-หรือ-ตัวเก็บประจุ](https://klang-ic.com/blog/ทำความรู้จัก-คาปาซิเตอร์-(capacitor)-หรือ-ตัวเก็บประจุ).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



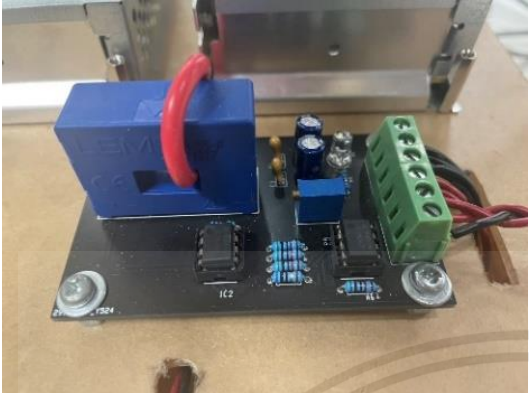
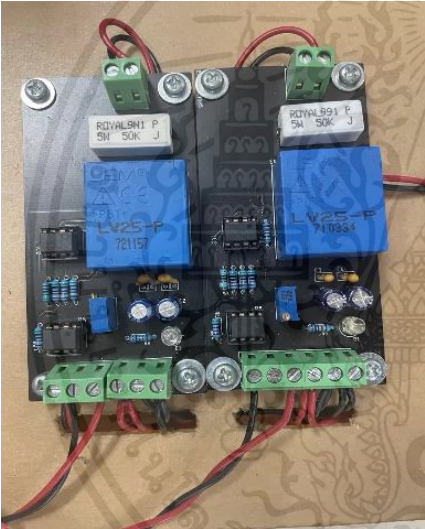
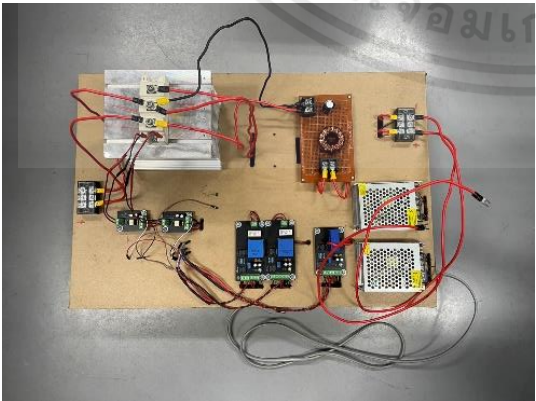
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญาโท

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor)</p>
	<p>ตัวเก็บประจุ (Capacitor)</p>
	<p>Differential Probe</p>




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญาโท

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p style="text-align: center;"><i>Current sensor</i></p>
	<p style="text-align: center;"><i>Voltage sensor</i></p>
	<p style="text-align: center;">วงจรควบคุม (<i>Control Circuit</i>)</p>




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญาโท

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>โหลทดสอบ</p>
	<p>Multimeter</p>
	<p>ออสซิลโลสโคป</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญาโท

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>DC Generator</p>
	<p>Function Generator</p>
	<p>Gate driver</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญาโท

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>ขดลวดเหนี่ยวนำ</p>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#include "nowonpwm.h"
#include "rtwtypes.h"

volatile int IsrOverrun = 0;
static boolean_T OverrunFlag = 0;
void rt_OneStep(void)
{
    /* Check for overrun. Protect OverrunFlag against preemption */
    if (OverrunFlag++) {
        IsrOverrun = 1;
        OverrunFlag--;
        return;
    }

    enableTimer0Interrupt();
    nowonpwm_step();

    /* Get model outputs here */
    disableTimer0Interrupt();
    OverrunFlag--;
}

volatile boolean_T stopRequested;
volatile boolean_T runModel;
int main(void)
{
    float modelBaseRate = 0.2;
    float systemClock = 100;

    /* Initialize variables */
    stopRequested = false;
    runModel = false;
    c2000_flash_init();

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

init_board();

#if defined(MW_EXEC_PROFILER_ON) || defined(MW_EXTMODE_RUNNING)

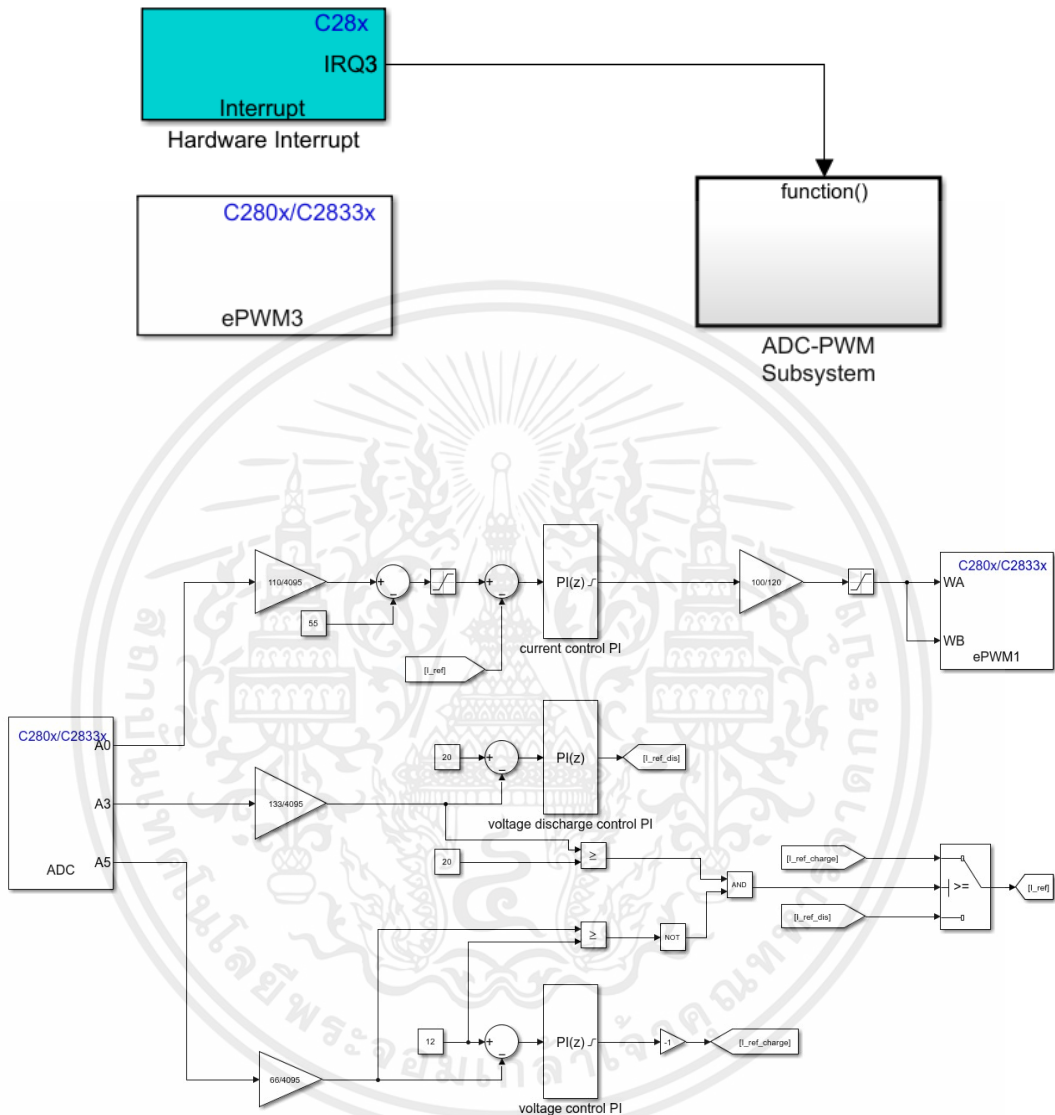
hardwareTimer1Init();

#endif

;
rtmSetErrorStatus(nowonpwm_M, 0);
nowonpwm_initialize();
globalInterruptDisable();
configureTimer0(modelBaseRate, systemClock);
runModel = rtmGetErrorStatus(nowonpwm_M) == (NULL);
enableTimer0Interrupt();
enable_interrupts();
globalInterruptEnable();
while (runModel) {
    stopRequested = !(rtmGetErrorStatus(nowonpwm_M) == (NULL));
}

/* Terminate model */
nowonpwm_terminate();
globalInterruptDisable();
return 0;
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์



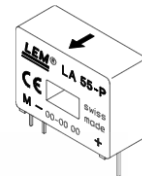
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Current Transducer LA 55-P

$$I_{PN} = 50 \text{ A}$$

For the electronic measurement of currents : DC, AC, pulsed... with a galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current	50	A
I_P	Primary current, measuring range	0 .. ± 70	A
R_M	Measuring resistance @		
		$T_A = 70^\circ\text{C}$	$T_A = 85^\circ\text{C}$
		R_{Mmin} R_{Mmax}	R_{Mmin} R_{Mmax}
	with $\pm 12 \text{ V}$	10 100	60 95 Ω
		@ $\pm 50 \text{ A}_{max}$	
		@ $\pm 70 \text{ A}_{max}$	10 50 60 ¹⁾ 60 ¹⁾ Ω
	with $\pm 15 \text{ V}$	50 160	135 155 Ω
		@ $\pm 50 \text{ A}_{max}$	
		@ $\pm 70 \text{ A}_{max}$	50 90 135 ²⁾ 135 ²⁾ Ω
I_{SN}	Secondary nominal r.m.s. current	50	mA
K_N	Conversion ratio	1 : 1000	
V_C	Supply voltage ($\pm 5\%$)	$\pm 12 \dots 15$	V
I_C	Current consumption	10 (@ $\pm 15 \text{ V}$) + I_S	mA
V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 mn	2.5	kV

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Printed circuit board mounting
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Accuracy - Dynamic performance data

X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ $\pm 15 \text{ V}$ ($\pm 5\%$)	± 0.65	%
		@ $\pm 12 \dots 15 \text{ V}$ ($\pm 5\%$)	± 0.90	%
ϵ_L	Linearity		< 0.15	%
I_O	Offset current @ $I_p = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$		Typ	Max
I_{OM}	Residual current ³⁾ @ $I_p = 0$, after an overload of $3 \times I_{PN}$			± 0.2 mA
I_{OT}	Thermal drift of I_O	$0^\circ\text{C} \dots + 70^\circ\text{C}$	± 0.1	± 0.3 mA
		$- 25^\circ\text{C} \dots + 85^\circ\text{C}$	± 0.1	± 0.5 mA
t_{ra}	Reaction time @ 10 % of I_{Pmax}		< 500	ns
t_r	Response time @ 90 % of I_{Pmax}		< 1	μs
di/dt	di/dt accurately followed		> 200	A/ μs
f	Frequency bandwidth (- 1 dB)		DC .. 200	kHz

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

General data

T_A	Ambient operating temperature	- 25 .. + 85	$^\circ\text{C}$
T_S	Ambient storage temperature	- 40 .. + 90	$^\circ\text{C}$
R_S	Secondary coil resistance @	$T_A = 70^\circ\text{C}$	80 Ω
		$T_A = 85^\circ\text{C}$	85 Ω
m	Mass	18	g
	Standards ⁴⁾	EN 50178	

Notes : ¹⁾ Measuring range limited to $\pm 60 \text{ A}_{max}$
²⁾ Measuring range limited to $\pm 55 \text{ A}_{max}$
³⁾ Result of the coercive field of the magnetic circuit
⁴⁾ A list of corresponding tests is available

980706/8

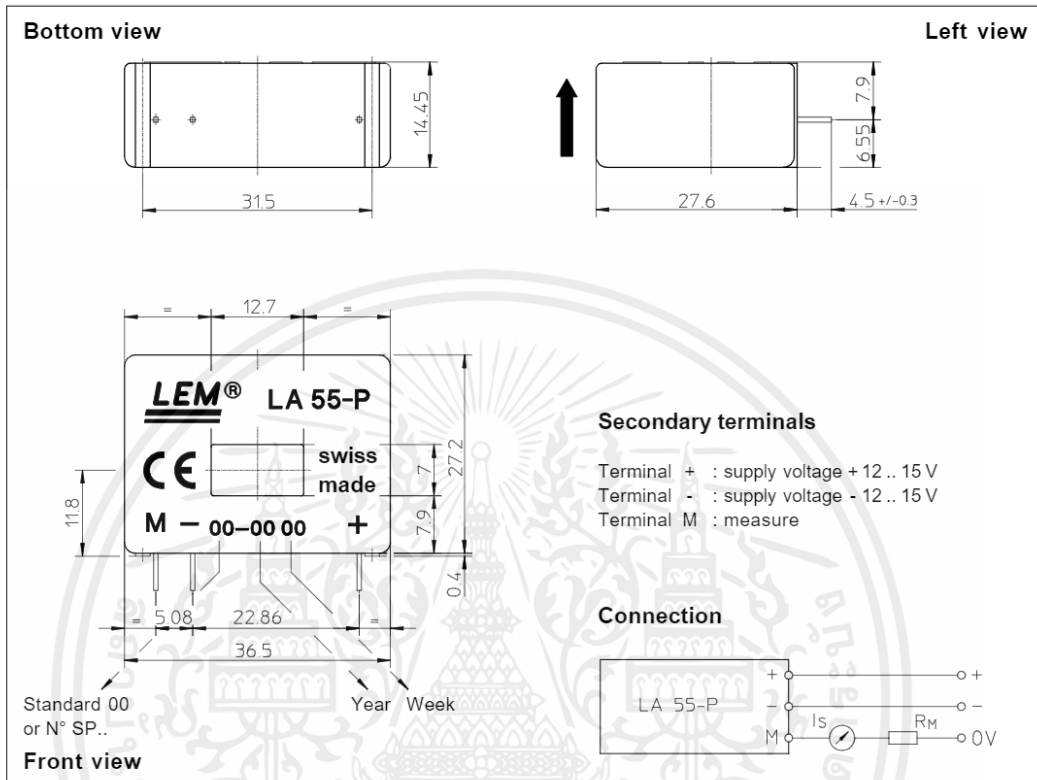
LEM Components

www.lem.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Dimensions LA 55-P (in mm. 1 mm = 0.0394 inch)



Mechanical characteristics

- General tolerance ± 0.2 mm
 - Primary through-hole 12.7 x 7 mm
 - Fastening & connection of secondary 3 pins
- Recommended PCB hole 0.63 x 0.56mm
0.9 mm

Remarks

- I_s is positive when I_p flows in the direction of the arrow.
- Temperature of the primary conductor should not exceed 90°C.
- Dynamic performances (di/dt and response time) are best with a single bar completely filling the primary hole.
- In order to achieve the best magnetic coupling, the primary windings have to be wound over the top edge of the device.
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without previous notice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DATASHEET 160V MODULE

FEATURES AND BENEFITS*

- Up to 10 year DC life
- 160V DC working voltage
- Resistive cell balancing
- Compact and light weight package
- Screw terminals

TYPICAL APPLICATIONS

- Wind turbine pitch control
- Small UPS systems
- Small industrial systems



PRODUCT SPECIFICATIONS

ELECTRICAL

BMOD0006 E160 B02

Rated Capacitance ¹	5.8 F
Minimum Capacitance, initial ¹	5.8 F
Maximum Capacitance, initial ¹	7 F
Maximum ESR _{DC} ¹ , initial ¹	240 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR _{DC} ¹	35 A
Rated Voltage	160 V
Absolute Maximum Voltage ²	170 V
Absolute Maximum Current	170 A
Leakage Current at 25°C, maximum ³	25 mA
Maximum Series Voltage	750 V
Capacitance of Individual Cells ⁹	350 F
Maximum Stored Energy, Individual Cell ⁹	0.35 Wh
Number of Cells	60

TEMPERATURE

Operating Temperature (Cell Case Temperature)	
Minimum	-40°C
Maximum	65°C
Storage Temperature (Stored Uncharged)	
Minimum	-40°C
Maximum	70°C

PHYSICAL

Mass, typical	5.2 kg
Power Terminals	M5 Thread
Recommended Torque - Terminal	4 Nm
Vibration Specification	IEC60068-2-6
Shock Specification	IEC60068-2-27,-29
Environmental Protection	IP54
Cooling	Natural Convection

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

Page 1 ➤ Document number: 3000246.5 ➤ maxwell.com

Maxwell
TECHNOLOGIES
Enabling Energy's Future™

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

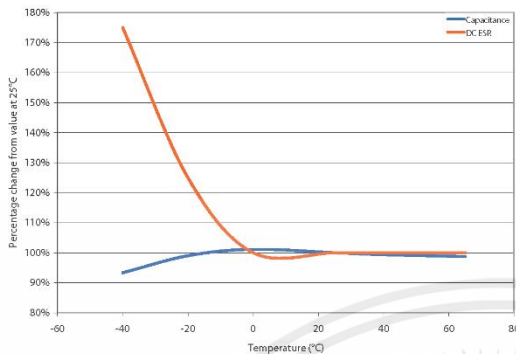
DATASHEET 160V MODULE

PRODUCT SPECIFICATIONS (Cont'd)

MONITORING / CELL VOLTAGE MANAGEMENT		BMOD0006 E160 B02
Internal Temperature Sensor		N/A
Temperature Interface		N/A
Cell Voltage Monitoring		Voltage Center Tap
Connector		M4
Cell Voltage Management		Passive
POWER AND ENERGY		
Usable Specific Power, P_d ⁴		2,500 W/kg
Impedance Match Specific Power, P_{max} ⁵		5,100 W/kg
Specific Energy, E_{max} ⁶		4 Wh/kg
Stored Energy, E_{stored} ⁷		21 Wh
SAFETY		
Short Circuit Current, typical (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)		670 A
Certifications		RoHS
High-Pot Capability ¹⁰		5,600 VDC
TYPICAL CHARACTERISTICS		
THERMAL CHARACTERISTICS		
Thermal Resistance (R_{ca} , All Cell Cases to Ambient), typical ⁹		1.1°C/W
Thermal Capacitance (C_{th}), typical		4,800 J/°C
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 15$ °C) ⁸		7 A _{RMS}
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 40$ °C) ⁸		12 A _{RMS}
LIFE		
DC Life at High Temperature ¹ (held continuously at Rated Voltage and Maximum Operating Temperature)		1,500 hours
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)		20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)		100%
Projected DC Life at 25°C ¹ (held continuously at Rated Voltage)		10 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)		20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)		100%
Shelf Life (Stored uncharged at 25°C)		4 years

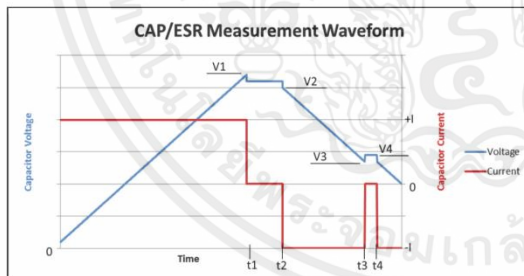
DATASHEET 160V MODULE

ESR AND CAPACITANCE VS TEMPERATURE



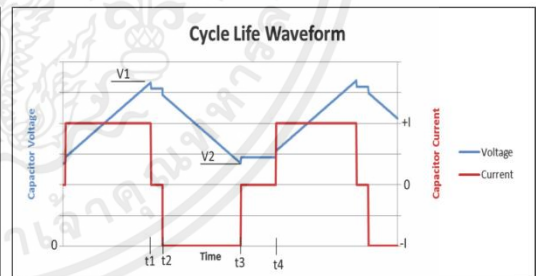
NOTES

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



$$V1 = V_{rated} \quad t2 - t1 = 15 \text{ seconds} \quad \text{Capacitance} = I \times (t3 - t2) / (V2 - V3)$$

$$V3 = 0.5 \times V_{rated} \quad t4 - t3 = 5 \text{ seconds} \quad \text{ESR} = (V4 - V3) / I$$



$$V1 = V_{rated} \quad t2 - t1 = 5 \text{ seconds (I=0)}$$

$$V2 = 0.5 \times V_{rated} \quad t4 - t3 = 15 \text{ seconds (I=0)}$$

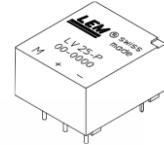


Voltage Transducer LV 25-P

For the electronic measurement of voltages : DC, AC, pulsed... with a galvanic isolation between the primary circuit (high voltage) and the secondary circuit (electronic circuit).

$$I_{PN} = 10 \text{ mA}$$

$$V_{PN} = 10 \dots 500 \text{ V}$$



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current	10	mA			
I_P	Primary current, measuring range	0 .. ± 14	mA			
R_M	Measuring resistance	with $\pm 12 \text{ V}$	@ $\pm 10 \text{ mA}_{\text{max}}$	30	190	Ω
			@ $\pm 14 \text{ mA}_{\text{max}}$	30	100	Ω
		with $\pm 15 \text{ V}$	@ $\pm 10 \text{ mA}_{\text{max}}$	100	350	Ω
			@ $\pm 14 \text{ mA}_{\text{max}}$	100	190	Ω
I_{SN}	Secondary nominal r.m.s. current	25	mA			
K_N	Conversion ratio	2500 : 1000				
V_C	Supply voltage ($\pm 5\%$)	$\pm 12 \dots 15$	V			
I_C	Current consumption	10 (@ $\pm 15 \text{ V}$) + I_S	mA			
V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test ¹⁾ , 50 Hz, 1 mn	2.5	kV			

Features

- Closed loop (compensated) voltage transducer using the Hall effect
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Principle of use

- For voltage measurements, a current proportional to the measured voltage must be passed through an external resistor R_i , which is selected by the user and installed in series with the primary circuit of the transducer.

Accuracy - Dynamic performance data

X_G	Overall Accuracy @ $I_{PN}, T_A = 25^\circ\text{C}$	@ $\pm 12 \dots 15 \text{ V}$	± 0.9	%
		@ $\pm 15 \text{ V} (\pm 5\%)$	± 0.8	%
ϵ_L	Linearity		< 0.2	%
I_o	Offset current @ $I_p = 0, T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ	± 0.15	mA
		Max	± 0.15	mA
I_{OT}	Thermal drift of I_o	0°C .. + 25°C	± 0.06	± 0.25 mA
		+ 25°C .. + 70°C	± 0.10	± 0.35 mA
t_r	Response time ²⁾ @ 90 % of $V_{P,max}$	40	μs	

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low thermal drift
- Low response time
- High bandwidth
- High immunity to external interference
- Low disturbance in common mode.

General data

T_A	Ambient operating temperature	0 .. + 70	$^\circ\text{C}$
T_S	Ambient storage temperature	- 25 .. + 85	$^\circ\text{C}$
R_P	Primary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	250	Ω
R_S	Secondary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	110	Ω
m	Mass	22	g
	Standards ³⁾	EN 50178	

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Power supplies for welding applications.

Notes : ¹⁾ Between primary and secondary

²⁾ $R_i = 25 \text{ k}\Omega$ (L/R constant, produced by the resistance and inductance of the primary circuit)

³⁾ A list of corresponding tests is available

981125/14

LEM Components

Tope Co., Ltd. Tel: (02) 8228-0658 Fax: (02) 8228-0659 <http://www.sensor.com.tw> e-mail: tope@ms1.hinet.net

www.lem.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบระบบจัดเก็บพลังงานแบบผสมผสาน ด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

DESIGN OF A HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM WITH SUPERCAPACITORS FOR ELECTRIC VEHICLES

นางสาวสุภารัตน์ ศิวขาว นายอภิวัฒน์ ดิษฐคำแจ้ง และนายอินทาม สติตานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซอย ฅลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-mail: 62010964@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นงานนำเสนอระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยประยุกต์ใช้วงจรคิซึคิซึคอนเวอร์เตอร์เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด คือ มีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการอัดและคายประจุได้รวดเร็ว ในทางกลับกันแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนนั้นมีข้อดีคือมีความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูง เป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ดี โดยในการผสมผสานทั้งสองแหล่งกักเก็บพลังงานจะประยุกต์ใช้วงจรคิซึคิซึคอนเวอร์เตอร์ ชนิดบัก-บูสต์ในการเชื่อมต่อ พิกัดคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอมีขนาดแรงดันที่ 96 โวลต์ สามารถจ่ายกำลังได้สูงสุดที่ 10 กิโลวัตต์

คำสำคัญ : ระบบกักเก็บพลังงาน, ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด, แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน, วงจร คิซึ-คิซึ คอนเวอร์เตอร์

ABSTRACT

This thesis presents an integrated energy storage system between a supercapacitor and a lithium-ion battery by applying a DC-DC converter circuit due to the basic properties of a supercapacitor. It has a high power density. This indicates the ability to charge and discharge quickly. Lithium-ion batteries, on the other hand, have the advantage of having a high energy density. It indicates the ability to store electrical energy well. In combining the two energy storage sources, a DC-DC converter circuit is applied. Connection buck-boost type: the proposed converter has a voltage of 96 volts and can supply a maximum power of 10 kW.

1. บทนำ

ปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกได้ตระหนักถึงความสำคัญของการลดการใช้พลังงานและการปลดปล่อยมลพิษในภาคขนส่งเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการหันมาใช้การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนแทนการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นต้องมีการจัดเก็บอย่างเป็นระบบ ทำให้ต้องนำเทคโนโลยีระบบจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System หรือ BESS) เข้ามาใช้ในการกักเก็บพลังงาน โดยเทคโนโลยีนี้ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ให้มี

ประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีแนวโน้มด้านราคาที่ลดลง ส่งผลให้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนร่วมกับ BESS เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมาก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการพัฒนารูปแบบการคมนาคมเข้าสู่สังคมการใช้ยานยนต์ไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น ในอนาคตยานยนต์ไฟฟ้ากำลังได้รับความนิยมสูงขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ เนื่องจากเป็นพลังงานบริสุทธิ์ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักที่มีการศึกษาและวิจัยเป็นจำนวนมากเพื่อพัฒนาให้ยานยนต์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด ซึ่งประเด็นที่มีความสำคัญมากสำหรับเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า ก็คือการพัฒนากระบวนการประจุแบตเตอรี่อย่างรวดเร็วหรือที่เรียกกันว่า Fast Charge เพื่อที่จะตอบสนองความต้องการและลักษณะในการใช้งานที่ทำให้ระบบกักเก็บพลังงานมีคุณภาพมากขึ้น

โครงการนี้จึงได้นำเสนอถึงการศึกษาร่วมกันของแหล่งกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน (Hybrid Energy Storage System) เพื่อที่จะนำแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดมาเชื่อมต่อกันในรูปแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง สำหรับการนำไปใช้งานในรถไฟฟ้าต่อไป อีกทั้งยังได้ศึกษาคุณสมบัติในการทำงานของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อวิเคราะห์ผลการทำงานร่วมกัน ในการลดเวลาในการอัดประจุ และตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานรถไฟฟ้า

2. ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน (HESS: Hybrid Energy Storage System)

ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน คือการนำแหล่งกักเก็บพลังงานสองแหล่งหรือมากกว่าที่มีข้อดีของเทคโนโลยีการเก็บพลังงานมาใช้งานร่วมกัน

2.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor)

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) หรือ อัลตราคาปาซิเตอร์ (Ultracapacitor) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำมาใช้งานร่วมกับแบตเตอรี่ในการประจุพลังงานไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่สามารถอัดประจุ (Charge) และ คายประจุ (Discharge) ได้อย่างรวดเร็วนี้ จึงนำมาใช้งานร่วมกับระบบจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อลดระยะเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอัดประจุของแบตเตอรี่ด้วย เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดใช้ระยะเวลาในการเก็บประจुरวดกว่าแบตเตอรี่ทำให้การเกิดความร้อนสะสมต่ำ การสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานลดลง และเมื่อนำมาต่อเข้ากับแบตเตอรี่จะทำให้สามารถอัดประจุได้เร็วและยังช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้มากขึ้น



รูปที่ 2.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

2.2 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion Battery)

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-Ion Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่ถูกพัฒนาขึ้นให้มีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้นานกว่า มีอัตราการชาร์จที่รวดเร็ว พร้อมจ่ายไฟได้อย่างเสถียรและคงที่ อีกทั้งยังไม่มีส่วนประกอบที่เป็นอันตรายต่อธรรมชาติและมนุษย์ เช่น ของเหลว กรด หรือตะกั่ว เราจึงมักพบแบตเตอรี่ประเภทนี้ในรถยนต์พลังงานไฟฟ้าเสียเป็นส่วนใหญ่



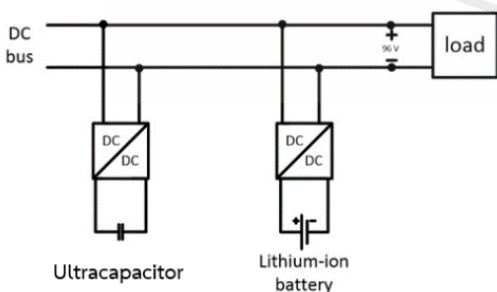
รูปที่ 2.2 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-Ion Battery)

3.การออกแบบและการทดลอง

3.1 การออกแบบวงจรไฟฟ้าของแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้า

แบบผสมผสาน

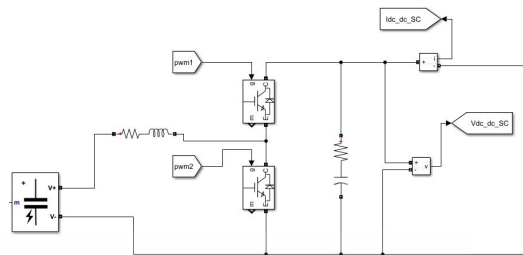
การเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน ดังรูปที่ 3.1 โดยมีการเชื่อมต่อแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดโดยผ่าน DC-DC converter เข้าสู่ DC bus ที่มีพิคคแรงดันเท่ากับพิคคแรงดันของ โหลด นั่นก็คือมอเตอร์สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า พิคคแรงดัน 96 V



รูปที่ 3.13 วงจรดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสาน

3.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink

การเชื่อมต่อกันระหว่างแหล่งกักเก็บพลังงานและกริดของระบบไฟฟ้า จะเชื่อมต่อกันผ่านวงจรถอกลับเฟส ซึ่งในการทดลองนี้เราได้เลือกใช้งานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC-DC converter) เข้ามาใช้งาน

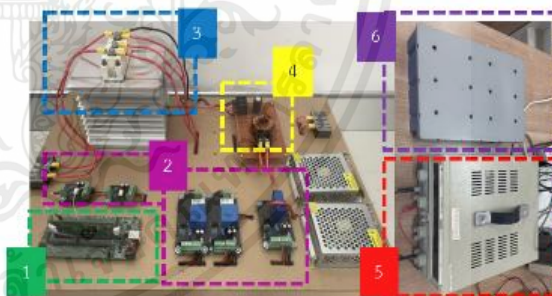


รูปที่ 3.2 การจำลองวงจรภายในของดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด และกริด ของระบบ ผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink

4.การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

เนื่องด้วยจุดประสงค์หลักของ โครงานนั้น ต้องการที่จะนำการออกแบบนี้ไปประยุกต์ใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบและการสร้างชิ้นงานต้นแบบต้องอยู่บนพื้นฐานของแนวคิดของการสร้างชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ประหยัดพื้นที่ น้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพที่สูง โดยเครื่องต้นแบบจะถูกจัดวางอยู่บนแผ่นอะคริลิก ขนาด 40.5 x 61.0 ตารางเซนติเมตร หนา 4 มิลลิเมตร จำนวน 1 แผ่น แสดงดังรูปที่ 4.7

รูปที่ 4.7 เครื่องต้นแบบทั้งหมด: (1) Microcontrollers, (2) ชุดควบคุม, (3) IGBT, (4) ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ,



(5) DC Power Supply, (6) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

5.ผลการทดลอง

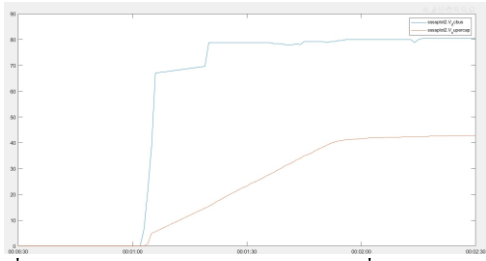
5.1 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน

การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบ่งเป็น 3 สภาวะการทำงานคือ การอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดผ่านดีซีบัส การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัส การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัสและโหลด

- สภาวะการทำงานที่ 1 การอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดผ่านดีซีบัส การทำงานในสภาวะการทำงานนี้จะมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า พิคคแรงดันที่ออกแบบในการทดลองคือ 80 โวลท์หรือมากกว่า พิคคกระแส 50 แอมแปร์ เข้าทางด้านดีซีบัส เพื่อจำลองสถานการณ์ที่มีการอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

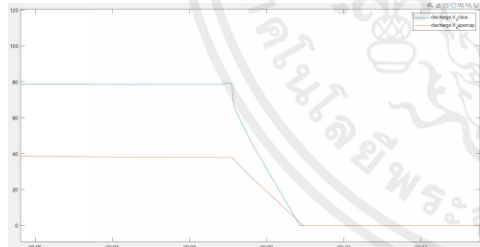
ประจุให้แก่รถยนต์ไฟฟ้า จากนั้นจะทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถ่ายโอนจากดีซีบัตไปยังตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยผ่านดิซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ กราฟการอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดผ่านดีซีบัต แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.8 กราฟการอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากดีซีบัต

ในรูปที่ 5.1 แสดงกราฟการอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากดีซีบัต โดยกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าของดีซีบัตที่กำหนดคือ 80 โวลต์ กราฟสีแดงแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

- สภาวะการทำงานที่ 2 การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัต โดยใช้วงจรดิซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ การทำงานในสภาวะการทำงานนี้จะมีการจ่ายไฟไปยังดีซีบัตซึ่งต่อกับตัวเก็บประจุยิ่งยวดผ่านวงจรดิซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ ในสภาวะการทำงานปกติที่แรงดันไฟฟ้าฝั่งดีซีบัตนั้นมากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดต้องการ พลังงานไฟฟ้าจากดีซีบัตจะถ่ายโอนไปยังตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อทำการอัดประจุ และในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าฝั่งดีซีบัตนั้นน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ โหลดต้องการ พลังงานไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะถูกถ่ายโอนไปยังดีซีบัตเพื่อทำการชดเชยพลังงานส่วนที่ขาดไป เพื่อให้พลังงานที่จ่ายให้แก่โหลดมีค่าคงที่ กราฟการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัตเป็นดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 กราฟการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยัง ดีซีบัต

ในรูปที่ 5.2 แสดงกราฟการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัต โดยกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าของดีซีบัตที่กำหนดคือ 80 โวลต์ กราฟสีแดงแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

การทำงานของสภาวะการทำงานที่ 2 การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัตโดยใช้วงจรดิซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ จะแบ่งโหมดการทำงานเป็น 2 โหมด คือ การทำงานโหมดบัคของวงจรดิซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ และการทำงานโหมดบูสต์ของวงจรดิซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าวงจรต้นแบบดิซีดีซีคอนเวอร์เตอร์สามารถถ่ายโอนพลังงานใน โหมดการทำงานทั้ง โหมดบัคและ โหมดบูสต์ของ วงจรได้ตามที่ออกแบบไว้

- สภาวะการทำงานที่ 3 การถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังดีซีบัตและโหลดโดยใช้วงจรดิซีดีซีคอนเวอร์เตอร์

การทำงานในสภาวะการทำงานนี้ ผลการทดลองจะเหมือนกับสภาวะการทำงานที่ 2 คือจะมีการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าไปยังดีซีบัต โดยได้ทำการต่อโหลดเพื่อศึกษาการทำงานในการถ่ายโอนพลังงานให้แก่โหลดเพิ่มเข้าไปด้วย

6. สรุปผลการทดลอง

ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานนี้ทำงานที่พิกัดแรงดัน 96 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 10 กิโลวัตต์ โดยใช้วงจรดิซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ชนิด Bidirectional DC-DC converter มาประยุกต์ใช้ในถ่ายโอนพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุยิ่งยวดกับดีซีบัต โดยใช้ Microcontroller TMS320F28069 ในการควบคุมการทำงานของวงจร จากผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดได้ และถ่ายโอนพลังงานจากการคายประจุของตัวเก็บไฟฟ้าแบบยิ่งยวดไปยังดีซีบัตในช่วงบูสต์ได้ในช่วง 96 โวลต์จนถึง 64 โวลต์ ที่คิวดีไอเกิล 20 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าจากการศึกษาและทดลองพบว่าวงจร Bidirectional DC-DC converter ที่ใช้ในการถ่ายโอนพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุยิ่งยวดกับดีซีบัตเพื่อใช้งานในแหล่งกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของระบบกักเก็บไฟฟ้าแบบผสมผสานได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำผอย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยทัต มณีอินทร์ ที่กรุณาเป็นที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางการศึกษาวิจัย รวมถึงตรวจสอบความเรียบร้อยของปริญญานิพนธ์ จึงขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Nan Qin. (2016). "Electric Vehicle Architectures". EV and Technology workshop, Electric vehicles transportation center.
- [2] R A Hanifah, S F Toha and S Ahmad. (2015). Electric Vehicle Battery Modelling and Performance Comparison in Relation to Range Anxiety.
- [3] เสาวนีย์ กันตะ. (2560). การศึกษายางจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง 4 เฟส ด้วยเทคนิค อินเตอร์ลิฟ. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). ปทุมธานี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นางสาวสุดารัตน์ ผิวขาว
วัน เดือน ปีเกิด 9 กันยายน 2543
ที่อยู่ 2/1 ซ.ทานสัมพันธ์ 6/3 ต.ท่าทราย อ.เมืองนนทบุรี จ.นนทบุรี
11000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2561

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเบญจมราชา
นุสรณ์

ปีการศึกษา 2565

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรม
พลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (สำนักงานไทรน้อย)
ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 กรกฎาคม 2565

ฝึกงานภาคฤดูร้อน



ชื่อ-นามสกุล นายอภิวัฒน์ ดิษฐคำเรือง
วัน เดือน ปีเกิด 3 มีนาคม 2543
ที่อยู่ 39/4 ม.7 ต.ปากแพรก อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช 80140

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2561

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวิทยาศาสตร์
จุฬาราชวิทยาลัย นครศรีธรรมราช

ปีการศึกษา 2565

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรม
พลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
บริษัท ผลิตไฟฟ้าและน้ำเย็น จำกัด ฝ่ายซ่อมบำรุง
ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 กรกฎาคม 2565

ฝึกงานภาคฤดูร้อน



ชื่อ-นามสกุล นายอินอาม สถิตานนท์
 วัน เดือน ปีเกิด 5 กรกฎาคม 2544
 ที่อยู่ 3 ซ.ติวานนท์ 54 ถ.ติวานนท์ ต.ท่าทราย อ.เมืองนนทบุรี จ.
 นนทบุรี 11000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2561

ปีการศึกษา 2565

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสามเสนวิทยาลัย
 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรม
 พลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน)
 ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 กรกฎาคม 2565



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้