

การประเมินสมรรถนะของระบบคิกกำลังขณะเบรกโดยใช้ระบบกักเก็บ  
พลังงานไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

PERFORMANCE EVALUATION OF A REGENERATIVE BRAKING SYSTEM  
BASED ON SUPERCAPACITOR/BATTERY HYBRID ENERGY STORAGE  
SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-D-018-112

การประเมินสมรรถนะของระบบค้ำกำลังขณะเบรกโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

PERFORMANCE EVALUATION OF A REGENERATIVE BRAKING SYSTEM  
BASED ON SUPERCAPACITOR/BATTERY HYBRID ENERGY STORAGE  
SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE EVALUATION OF A REGENERATIVE BRAKING SYSTEM  
BASED ON SUPERCAPACITOR/BATTERY HYBRID ENERGY STORAGE  
SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2018  
KMITL-2018-EN-D-018-112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2018**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประเมินสมรรถนะของระบบคืนกำลังขณะเบรกโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

Thesis Title Performance Evaluation of a Regenerative Braking System based on Supercapacitor/Battery Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles

นักศึกษา นายคุณากร คิตดี

รหัสประจำตัว 58601001

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-D-018-112

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิบูลย์ ชันแฉก	
รศ.ดร.สมชาติ จิริวิภากร พุก	
ผศ.ดร.ชาย ชมภู่อีไหว	
ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์	
รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 14.00-16.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-302 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินสมรรถนะของระบบคั่นกำลังขณะเบรกโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
นักศึกษา	นายคุณากร คิตติ
รหัสประจำตัว	58601001
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอระบบคั่นกำลังขณะเบรกโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่านไฟกระแสดตรง โดยที่กลไกการควบคุมระบบคั่นกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานระควบคุม ANN เพื่อกระจายแรงเบรกได้ถูกพัฒนาไปพร้อมกันในงานวิจัยนี้ เมื่อเข้าสู่โหมดชะลอ หรือเบรก แรงดันดีซีลิงค์จะเข้าสู่สถานะบัส โดยใช้รูปแบบอัลกอริธึมการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์สามเฟส ดังนั้นไดโอดจะอยู่ในสถานะไบอัสไปข้างหน้า ซึ่งช่วยให้พลังงานจากการเบรกจะสามารถถูกถ่ายโอนกลับมาเก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้ จนกระทั่งถึงค่าสูงสุดที่ (96%) พลังงานจากการเบรกจะถูกเปลี่ยนมาเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ได้ เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบคั่นกำลังขณะเบรกที่ได้นำเสนอ การจำลองผลได้ถูกดำเนินการภายใต้ 3 สถานการณ์ : ยานยนต์ไฟฟ้าที่ไม่มีระบบคั่นกำลังขณะเบรก, ยานยนต์ไฟฟ้าที่มีระบบคั่นกำลังขณะเบรกโดยใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพียงอย่างเดียว และยานยนต์ไฟฟ้าที่มีระบบคั่นกำลังขณะเบรกโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ โดยใช้ระยะทางต่อหนึ่งรอบการขับขี่ที่ 8210.28 เมตร จากผลการทดสอบพบว่ายานยนต์ไฟฟ้าที่ไม่มีระบบคั่นกำลังขณะเบรกสามารถขับขี่ได้ระยะทางที่ 105.96 กม. (13 รอบการขับขี่) ในขณะที่ ยานยนต์ไฟฟ้าที่มีระบบคั่นกำลังขณะเบรกโดยใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพียงอย่างเดียว สามารถขับขี่ได้ระยะทาง 126.33 กม. (15.5 รอบการขับขี่). ยานยนต์ไฟฟ้าที่มีระบบคั่นกำลังขณะเบรกโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ สามารถขับขี่ได้ระยะทาง 175.24 กม. (21.5 รอบการขับขี่) ซึ่งเพิ่มขึ้น 48.91 กม. (6 รอบการขับขี่) เมื่อเทียบกับยานยนต์ไฟฟ้าที่มีระบบคั่นกำลังขณะเบรกโดยใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นการยืนยันระบบคั่นกำลังขณะเบรกโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ ที่นำเสนอ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงานขณะเบรกได้ และสามารถเพิ่มระยะทางในการขับขี่ได้เมื่อเทียบกับยานยนต์ไฟฟ้าที่มีระบบคั่นกำลังขณะเบรกโดยใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ระบบที่นำเสนอยังช่วยปรับปรุงการเร่งของยานยนต์ไฟฟ้า และสามารถยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ เนื่องจากการทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Performance Evaluation of a Regenerative Braking System based on Supercapacitor/Battery Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles
<b>Student</b>	Mr. Kunagone Kiddee
<b>Student ID.</b>	58601001
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2018
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-Ngern

## ABSTRACT

This research has proposed the SC/battery hybrid energy storage system (HESS) for the regenerative braking system (RBS) program of the front-wheel BLDC-motor-driven electric vehicle (EV). The ANN-based RBS control mechanism was deployed to optimize the three-phase inverter's switching scheme and the braking force distribution of the EV. In the regenerative braking mode, the ANN-based RBS program transferred the braking energy to store in the SC, until reaching the maximum safety threshold (96%), and subsequently diverted the energy to the battery. Furthermore, the ANN-based RBS control mechanism uniformly distributed the braking force between the front and rear wheels of the vehicle. To comparatively assess the performance of the SC/battery RBS program, the simulations were carried out under three scenarios: the EV without the RBS, with the battery-only RBS and with the SC/battery (HESS) RBS, given one drive cycle of 8069.57 m. The results revealed that, in the absence of the RBS, the vehicle could travel 105.96 km (13 cycles) while, under the battery-only RBS condition, the distance travelled by the EV was 126.33 km (15.5 cycles). The distance logged by the vehicle with the HESS-based RBS was 175.24 km (21.5 cycles), an increase of 48.91 km (6 cycles), in comparison with that of the battery-only vehicle. The findings indicated that the ANN-based RBS program could effectively enhance the harvest of the regenerative braking energy, as evident in the elongated drive range vis-à-vis that of the battery-only vehicle. Moreover, the SC/battery RBS program contributes to the improved vehicle acceleration and the extended battery life attributable to the SC's supplemental function.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือให้ความรู้ในการวิจัยที่สัมพันธ์กับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำช่วยแก้ปัญหา ตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์ และให้กำลังใจในการเขียนวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ ดร. วิวัฒน์ เกษรวงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือทุกด้าน ตั้งแต่ความรู้ในการวิจัยที่สัมพันธ์กับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำช่วยแก้ปัญหา และแก้ไข ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ กองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการทุนวิจัยเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน และพลังงานทดแทน (Energy Storage Systems) กระทรวงพลังงาน

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัยในทุกๆด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องจักรในกระบวนการผลิต เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ผลตลอดการวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ โครงการกองทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ โดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับการทำงานวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อจรรยา และคุณแม่นารรัตน์ คิตติ คุณสุดตา คิตติ รวมถึงครอบครัวญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู เป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาย่างดียิ่งมาโดยตลอด

คุณค่าและคุณประโยชน์ของงานวิจัยเล่มนี้ขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ทุกท่าน ที่ให้การอบรมสั่งสอนสร้างความรู้แก่ผู้วิจัย

คุณากร คิตติ

# สารบัญ

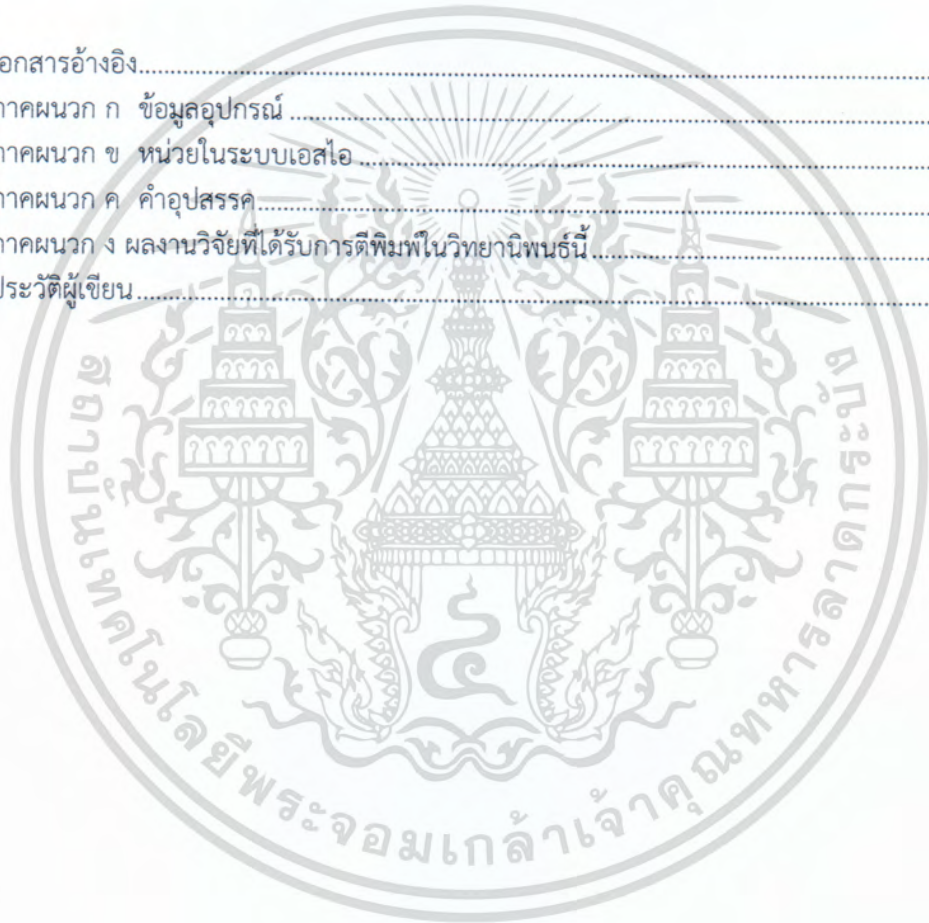
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ii
กิตติกรรมประกาศ .....	iii
สารบัญ .....	iv
สารบัญตาราง .....	vii
สารบัญรูป.....	viii
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	2
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทํางาน.....	5
2.1 บทนำ .....	5
2.2 ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle).....	5
2.2.1 ยานยนต์ที่ใช้พลังงานจากระบบสันดาปภายในและพลังงานไฟฟ้า, ยานยนต์ไฮบริดจ์.....	6
2.2.2 ยานยนต์ไฮบริดจ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากสายส่งพลังงานภายนอก .....	7
2.2.3 ยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิง.....	7
2.2.4 ยานยนต์ที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่.....	8
2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน .....	10
2.3.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน .....	10
2.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน.....	14
2.3.3 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน .....	15
2.2.4 ยานยนต์ที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่.....	17
2.4 ระบบควบคุม.....	27
2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	28
บทที่ 3 การออกแบบ และวิเคราะห์หลักการทํางานระบบกักเก็บพลังงานแบบ SC/Battery.....	29
3.1 โครงสร้าง และโหมดการทํางานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอ .....	29
3.1.1 โหมดปกติ (normal mode).....	30
3.1.2 โหมดการเร่ง (acceleration mode).....	31
3.1.3 โหมดการคืนกำลังขณะเบรกด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด (SC-enabled regenerative braking mode) .....	31

## สารบัญ (ต่อ)

3.1.4 โหมดการคืนกำลังขณะเบรกด้วยแบตเตอรี่ (Battery-enabled regenerative braking mode) .....	32
3.2 การวิเคราะห์ระบบกู้คืนกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ .....	33
3.3 การวิเคราะห์การสูญเสียของระบบ (Analysis of the system losses).....	37
3.4 แรงที่เป็นปัจจัยส่งผลในการขับเคลื่อนและการเบรก .....	38
3.4.1 แรงต้านหรือแรงเสียดทานการหมุนของยางรถยนต์ (Rolling Resistance loss).....	38
3.4.2 แรงต้านของอากาศ (Aerodynamics resistance losses).....	38
3.4.3 แรงจากความชันพื้นถนน (Road gradient force).....	38
3.4.4 แรงชั่วขณะ (Transient force).....	39
3.5 การออกแบบการควบคุมของระบบกู้คืนกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ .....	39
3.6 ส่วนควบคุม ANN (ANN controller) .....	42
3.7 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกู้คืนกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ .....	47
3.8 Battery Model .....	48
3.9 Supercapacitor Model .....	49
3.10 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด .....	51
บทที่ 4 การออกแบบทดสอบระบบกู้คืนกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery .....	54
4.1 โครงสร้างระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์โครงสร้างแบบ SC/Battery ที่นำเสนอ .....	54
4.2 โครงสร้างระบบควบคุมระบบกู้คืนกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ .....	55
4.3 มอเตอร์ .....	57
4.4 แบตเตอรี่ .....	58
4.5 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด .....	60
4.6 การออกแบบวงจรลดทอนระดับแรงดัน (DC/DC Buck Converter).....	62
4.7 อินเวอร์เตอร์สามเฟส .....	65
4.8 การทดสอบอุปกรณ์ .....	68
4.9 การออกแบบการจำลองผล .....	73
4.10 รอบการขับขี่ (Drive Cycles).....	79
4.10.1 LAFTP-72 Drive Cycle.....	79
4.10.2 INRETS Route1 Drive Cycle .....	81
4.11 วิเคราะห์รอบการใช้งานของแบตเตอรี่ Battery Cycle Life .....	85
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล .....	86
5.1 รูปแบบที่ใช้ในการจำลอง และทดสอบระบบ HESS .....	86
5.2 การจำลอง และทดสอบกระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบตเตอรี่ และมอเตอร์ในโหมดการเร่ง.....	89

## สารบัญ (ต่อ)

5.3	กระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบตเตอรี่ และมอเตอร์ในโหมดการเร่ง .....	92
5.4	การจำลอง และทดสอบพลังงานที่เก็บได้ในโหมดการเบรก.....	94
5.5	การจำลอง และทดสอบพลังงานที่เก็บได้ในโหมดการเบรก.....	96
5.6	ระยะทางการขับเคลื่อนจากการจำลอง และทดสอบระบบที่นำเสนอ.....	99
บทที่ 6	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	101
6.1	การจำลอง และทดสอบ .....	101
6.2	ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	102
เอกสารอ้างอิง.....		103
ภาคผนวก ก ข้อมูลอุปกรณ์ .....		106
ภาคผนวก ข หน่วยในระบบเอสไอ .....		111
ภาคผนวก ค คำอุปสรรค.....		112
ภาคผนวก ง ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานุกรณนี้.....		113
ประวัติผู้เขียน.....		140



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แรงดันไฟฟ้าเฟสที่ถูกปล่อยลอยสำหรับวัตต์แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับในแต่ละช่วง.....20
3.1	พารามิเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้า และเงื่อนไขของพื้นถนน ..... 42
3.2	พารามิเตอร์ของรอบขับซีเทรนนิ่ง (training drive cycle)..... 44
4.1	พารามิเตอร์สำหรับการจำลอง และทดสอบระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์โครงสร้างแบบ SC/Battery ที่นำเสนอ .....55
4.2	พารามิเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้า และเงื่อนไขพื้นถนน..... 56
4.3	พารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ..... 58
4.4	ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน..... 59
4.5	เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแต่ละยี่ห้อ..... 61
4.6	พารามิเตอร์ของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์..... 63
4.7	สัญญาณ Hall Effect และสถานการณ์สวิตชิงอินเวอร์เตอร์ของมอเตอร์ BLDC..... 65
4.8	พารามิเตอร์ของรอบการขับซีแบบ INRETS route1 ..... 84
4.9	พารามิเตอร์ของรอบการขับซีแบบ LAFTP-72 ..... 84
4.10	ผลการจำลองอายุรอบใช้งาน (cycle life)..... 85
5.1	ค่าแรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวดช่วงก่อนและหลังการเบรกจากการจำลอง..... 95
5.2	ค่าแรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวดช่วงก่อนและหลังการเบรกจากการทดสอบ ..... 95
5.3	พลังงานจลน์ช่วงก่อน และที่เก็บได้หลังจากการเบรกจากการจำลอง..... 95
5.4	พลังงานจลน์ช่วงก่อน และที่เก็บได้หลังจากการเบรกจากการทดสอบ ..... 96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของยานยนต์ไฟฟ้า.....	9
2.2 ขั้นตอนการทำงานระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อขับขี่.....	9
2.3 ขั้นตอนการทำงานระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อเบรก.....	9
2.4 ขั้นตอนการเติมประจุสำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า.....	10
2.5 ส่วนประกอบต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน.....	10
2.6 ส่วนสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน.....	11
2.7 รูปแบบการพันขดลวดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	
(ก) Concentrated winding.....	12
(ข) Distributed winding.....	12
2.8 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของวัสดุแม่เหล็กชนิดต่างๆในจุดภาคที่ 2.....	12
2.9 ตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน.....	13
2.10 สัญญาณของตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์.....	14
2.11 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน.....	14
2.12 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง โรเตอร์.....	16
2.13 สัญญาณ Hall Sensor, สัญญาณควบคุมสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้ง 6 ตัวแบบ PWM-on เทคนิค แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และ กระแสไฟฟ้าเฟส.....	17
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับกับจุดคอมมิวเตชัน.....	19
2.15 แรงดันไฟฟ้าเฟส A เฟส B และ เฟส C.....	21
2.16 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ช่วงสวิตซ์ Q4 สถานะสัญญาณ on.....	21
2.17 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ช่วงสวิตซ์ Q4 มีสถานะสัญญาณ Off.....	22
2.18 ทิศทางการไหลของกระแส ช่วงสวิตซ์ Q3 สถานะสัญญาณ On.....	23
2.19 ทิศทางการไหลของกระแส ช่วงสวิตซ์ Q3 สถานะสัญญาณ off.....	24
2.20 การคำนวณคาบเวลา ใน 1 รอบการหมุนทางไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลจากตำแหน่งจุดผ่านศูนย์กลางของ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ.....	25
2.21 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน.....	26
3.1 โครงสร้างระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอ.....	30
3.2 การไหลของพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอในโหมดปกติ.....	30
3.3 การไหลของพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอในโหมดเร่ง.....	31
3.4 การไหลของพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอในโหมดคืนกำลังขณะเบรกด้วย ตัวเก็บประจุยิ่งยวด HSC-enabled regenerative braking mode.....	32
3.5 การไหลของพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอในโหมดคืนกำลังขณะเบรกด้วย แบตเตอรี่ Battery-enabled regenerative braking mode.....	32

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์สามเฟส มอเตอร์ BLDC และระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอ .....	33
3.7 รูปแบบคลื่นสัญญาณของ Back-EMFs, armature currents, Hall Effect sensors, และ the switching template	
(ก) รูปแบบคลื่นสัญญาณในโหมดปกติ .....	34
(ข) รูปแบบคลื่นสัญญาณในโหมดคืบกำลังขณะเบรก .....	34
3.8 การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ในโหมดคืบกำลังขณะเบรกที่แต่ละช่วงเวลา .....	34
3.9 ส่วนประกอบต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน .....	39
3.10 โครงสร้างของระบบควบคุมของระบบกักเก็บกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ .....	40
3.11 การกระจายแรงเบรกระหว่างล้อหน้า และล้อหลังสำหรับการศึกษาในยานยนต์ไฟฟ้า .....	41
3.12 โครงสร้างของ ANN .....	45
3.13 ผังแสดงขั้นตอนการทำงานของระบบกักเก็บกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ .....	46
3.14 โมเดลของแบตเตอรี่ .....	48
3.15 บล็อกไดอะแกรมสำหรับโมเดลแบตเตอรี่ .....	48
3.16 โมเดลตัวเก็บประจุยิ่งยวด .....	50
3.17 บล็อกไดอะแกรมสำหรับโมเดลตัวเก็บประจุยิ่งยวด .....	50
3.18 กราฟของราโกลเนเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกำลังงานและความหนาแน่นพลังงานของตัวเก็บพลังงานชนิดต่างๆ .....	51
4.1 Structure of the proposed HESS .....	54
4.2 โครงสร้างระบบควบคุมระบบกักเก็บกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ .....	56
4.3 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ขนาด 36 volt, 20 Ah .....	60
4.4 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด 2.7 V 120 F 18 ต่อแบบอนุกรม .....	62
4.5 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ที่ติดตั้งในระบบ HESS .....	62
4.6 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HESS ที่นำเสนอในโหมดเร่ง .....	63
4.7 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HESS ที่นำเสนอ .....	64
4.8 วงจรสร้างสัญญาณขับมอสเฟส (MOSFET) โดย VSS ของ IC NE555P เท่ากับ 6V .....	64
4.9 วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage divider circuit) .....	65
4.10 วงจรในการจำลองผลอินเวอร์เตอร์สามเฟส .....	66
4.11 วงจรควบคุมมอเตอร์ BLDC .....	66
4.12 วงจรควบคุมมอเตอร์ BLDC ที่ออกแบบ .....	67
4.13 วงจรควบคุมมอเตอร์ BLDC ยี่ห้อโกลเด้นมอเตอร์ .....	67

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ระบบ HESS ร่วมกับ RBS ที่นำเสนอ และชุดเครื่องมือการทดสอบ .....	68
4.15 ทดสอบการขับเคลื่อนโดยใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักพลังงานเพียงอย่างเดียว .....	69
4.16 เครื่องวัด และเก็บบันทึกข้อมูล Data Acquisition and Control Interface 9063 .....	70
4.17 Tektronix DPO2024 200 MHz Digital Phosphor Oscilloscopes และ Function generator Storage Oscilloscope .....	70
4.18 มอเตอร์ BLDC 5 kW .....	71
4.19 DAQ Card NI 6024E .....	71
4.20 Fly wheel ขนาด 5 กก. ....	72
4.21 Fly wheel ใส่ในมอเตอร์ .....	72
4.22 ออกแบบจำลองวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ .....	73
4.23 ออกแบบจำลองในโปรแกรม LABVIEW เพื่อดูสถานะประจุ .....	74
4.24 ออกแบบจำลองระบบ HESS SC/Battery .....	75
4.25 ออกแบบจำลองระบบควบคุม PI ของระบบ HESS แบบ SC/Battery .....	76
4.26 โมเดลสำหรับจำลองหาค่าประสิทธิภาพของระบบ HESS .....	76
4.27 แท่งแสดงระดับแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแต่ละชุดขณะชาร์จเต็ม .....	77
4.28 แท่งแสดงระดับแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแต่ละชุดขณะการคืนกำลังขณะเบรก .....	77
4.29 สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เทียบกับความเร็ว .....	78
4.30 ความต้องการพลังงานในรอบการขับเคลื่อนแบบ LAFTP-72 .....	80
4.31 แรงบิดของยานยนต์ในรอบการขับเคลื่อนแบบ LAFTP-72 .....	80
4.32 การกระจายกำลังงานของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ที่ 820-920s .....	81
4.33 การกระจายกำลังงานของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ที่รอบการขับเคลื่อนแบบ INRETS Route1 .....	82
4.34 การกระจายกำลังงานของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ที่รอบการขับเคลื่อนแบบ INRETS Route1 ที่ช่วงเวลา 150-250 วินาที .....	82
4.35 สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ที่รอบการขับเคลื่อนแบบ INRETS Route1 ในช่วงเวลา 150-250 วินาที .....	83
5.1 การจำลองความเร็วและแรงบิดของระบบกักเก็บกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ	
(ก) กราฟจำลองความเร็วของรอบการขับเคลื่อนแบบ LA FTP-72. ....	88
(ข) กราฟจำลองความเร็วของรอบการขับเคลื่อนแบบ INRETS route1 .....	88
(ค) แรงมอเตอร์ของการคืนกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ .....	88
5.2 แสดงกราฟแรงบิดมอเตอร์เจเนอเรเตอร์ (motor-generator torque curve) .....	89
5.3 กระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบตเตอรี่ และมอเตอร์ในโหมดการเร่ง .....	90

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

5.4 ผลการทดลองระบบกักเก็บกำลังขณะเบรกที่	
(ก) Three-phase Back-EMFs ของขดลวดสเตเตอร์ระหว่างโหมดปกติ และโหมดคืนกำลังขณะเบรก .....	91
(ข) แรงดัน และกระแสของดีซีลิงค์ระหว่างโหมดปกติ และโหมดคืนกำลังขณะเบรก.....	91
(ค) กระแสของตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบบเตอริ์ และดีซีลิงค์ระหว่างโหมดปกติ และโหมดคืนกำลังขณะเบรก .....	92
5.5 ผลการทดลองระบบกักเก็บกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ	
(ก) แรงดันของ Hall Effect sensors เมื่อมอเตอร์ BLDC เข้าสู่โหมดชะลอ .....	93
(ข) แรงดันดีซีลิงค์ที่ค่าตัวชี้ไขเคล็ดที่แตกต่างกัน และที่ความเร็วที่ต่างกัน .....	93
(ค) ความเริ่มของมอเตอร์ BLDC ในโหมดปกติ โหมดคืนกำลังขณะเบรกด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด โหมดคืนกำลังขณะเบรกด้วยแบบเตอริ์ และการเบรกเชิงกล .....	94
5.6 การจำลอง และการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว และเวลาที่ใช้ช่วงการเบรก.....	96
5.7 สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบบเตอริ์	
(ก) สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบบเตอริ์ ที่เริ่มที่สถานะประจุ 88.3% และ 83.8%. ตามลำดับ .....	97
(ข) สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบบเตอริ์ ที่เริ่มที่สถานะประจุ 98.3% และ 84.8%. ตามลำดับ .....	97
(ค) สถานะประจุของแบบเตอริ์ ที่เริ่มที่สถานะประจุ 84.12%.....	98
5.8 การจำลอง และทดสอบการเปรียบเทียบระยะทางการขับขี่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไข 3 แบบ คือระบบ HESS ร่วมกับ RBS, ระบบแบบเตอริ์อย่างเดียรร่วมกับ RBS และระบบแบบเตอริ์อย่างเดี่ยวที่ไม่มี RBS โดยใช้รอบการขับขี่แบบ INRETS Route1.....	99
5.9 การจำลอง และทดสอบการเปรียบเทียบระยะทางการขับขี่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไข 3 แบบ คือระบบ HESS ร่วมกับ RBS, ระบบแบบเตอริ์อย่างเดียรร่วมกับ RBS และระบบแบบเตอริ์อย่างเดี่ยวที่ไม่มี RBS โดยใช้รอบการขับขี่แบบ LAFTP-72.....	100

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า เป็นเทคโนโลยียานยนต์ประเภทที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อน [1] โดยใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งเก็บอยู่ในแบตเตอรี่หรืออุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอื่น ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถประยุกต์ใช้กับภาคการขนส่งทางถนน มีแนวโน้มที่เทคโนโลยีจะขยายตัวในอนาคตอันใกล้ จากข้อได้เปรียบของประสิทธิภาพด้านพลังงานที่สูงกว่ารถยนต์แบบปกติเกือบเท่าตัว อีกทั้งข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ให้แรงบิดได้ทันทีทำให้รถพลังงานไฟฟ้ามีอัตราเร่งตอบสนองได้รวดเร็วและเร็วกว่ารถที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน [2]-[4] รวมถึงความสะดวกในการบำรุงรักษา เนื่องจากระบบขับเคลื่อน (Power train) ของยานยนต์ไฟฟ้ามีความซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน และที่สำคัญคือ สามารถลดการปล่อยสารมลพิษหรือทำให้มีการปลดปล่อยสารมลพิษใกล้เคียงศูนย์ (Near emissions) ในการเดินทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขับในเมือง [2]-[9]

ดังที่กล่าวข้างต้น ยานยนต์ไฟฟ้าจะมีเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังหลักในการขับเคลื่อน และใช้พลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในแบตเตอรี่เท่านั้น ไม่มีเครื่องยนต์อื่นในยานยนต์ ดังนั้นระยะทางการวิ่งของยานยนต์จึงขึ้นอยู่กับการออกแบบขนาดและชนิดของแบตเตอรี่ ซึ่งระบบที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานเพียงอย่างเดียวยังข้อจำกัดในบางประการ โดยเฉพาะในเรื่องของแบตเตอรี่ เช่น ข้อจำกัดของความหนาแน่นกำลังงาน (Power density) ซึ่งส่งผลต่ออัตราการเร่ง แบตเตอรี่มีน้ำหนักมาก [5] เนื่องจากต้องใช้ในการจ่ายพลังงานให้เพียงพอต่อความต้องการพลังงานที่ยานยนต์ต้องใช้ในการขับเคลื่อนในสถานะต่างๆ เช่น การเร่งเพื่อแซง หรือการขับขึ้นในพื้นที่ลาดชัน ใช้เวลาในการเติมประจุมากกว่าการเติมเชื้อเพลิง จึงจำเป็นที่จะต้องหาอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดอื่นเข้ามาช่วยเพื่อให้ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ระยะทางที่ไกลและนานขึ้น [7],[8] รวมถึงต้องสามารถนำเอาพลังงานที่สูญเสียกลับมาหมุนเวียนใช้ให้ได้มากที่สุด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor :SC) เป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติพิเศษตรงที่มีค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) สูงกว่าตัวเก็บประจุอื่นๆ มากถึง 100-10,000 เท่า [4]-[6] อีกทั้งยังสามารถอัดประจุให้เต็มได้ภายในเวลาอันรวดเร็วเพียง 1-10 วินาที เทียบกับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion Batteries) ซึ่งต้องใช้เวลานานโดยเฉลี่ย 10-60 นาที อีกทั้งการคายประจุก็สามารถทำได้ภายในเวลาระดับวินาทีเช่นกัน จุดเด่นอีกประการของตัวเก็บประจุยิ่งยวดคือสามารถที่จะอัดและคายประจุได้กว่า 500,000 รอบ มากกว่าความสามารถของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนถึง 100 เท่า และมากกว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead-Acid battery) 1,000 - 10,000 เท่า [6] โดยจากข้อมูลเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า SC มีความลักษณะเด่นในเรื่องค่าความหนาแน่นกำลังงาน (Power density) ซึ่งมากกว่าแบตเตอรี่แบบปกติอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถใช้ SC เพื่อเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวได้ เนื่องจาก SC มีข้อจำกัดในเรื่องค่าความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ จึงเป็นที่มาของการใช้

ลักษณะเด่นของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานแต่ละชนิดดังกล่าวมาทำงานร่วมกันเพื่อใช้ในระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์ (Hybrid Energy Storage System :HES) [2]-[11] สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

ซึ่งการทำงานร่วมกันระหว่าง Battery และ SC ในระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า สามารถช่วยในเรื่องสมรรถนะ เช่น เมื่อต้องขับขึ้นเขาหรือขึ้นในที่ลาดชัน หรือเร่งเครื่องเพื่อแซง [11] ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งมีลักษณะเด่นในเรื่องค่าความหนาแน่นกำลังงาน (Power density) จะสามารถให้กำลังสูงในเวลาอันสั้นได้ และเมื่อมีการชะลอ หรือเบรก ตัวเก็บประจุยิ่งยวดก็สามารถที่จะกักเก็บพลังงานกลแล้วแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าไว้ได้ เรียกว่าการกู้คืนกำลังงานขณะเบรก (Regenerative braking) [4]-[12]

โดยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการมีการศึกษา และวิจัยโครงสร้างของ HES ในรูปแบบต่างๆ ซึ่ง โครงสร้างของ HES ที่ได้มีการศึกษา และวิจัยที่สุดคือโครงสร้าง HES แบบ SC/Battery [3]-[22] โดยลักษณะโครงสร้าง HES แบบ SC/Battery แบบทั่วไป แบตเตอรี่จะถูกเชื่อมต่อโดยตรงกับดีซีบัส (dc-bus) โดยที่ ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง (Bidirectional DC/DC converter) ใช้ในการควบคุมการจ่ายพลังงานระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด [13] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการความจำเป็นในการใช้อุปกรณ์กักเก็บพลังงานทั้งสองชนิด รวมทั้งดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางกำลังสูง ทำให้ต้นทุนระบบรวมทั้งหมดของโครงสร้าง HES แบบ SC/Battery แบบทั่วไป มีค่าสูง จึงไม่สามารถตอบสนองด้านต้นทุน-ประสิทธิภาพได้เท่าที่ควร [17] (Not cost-effective) นอกจากนี้การใช้ ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางกำลังสูง เพื่อความเหมาะสมในการใช้ควบคุมและรักษาระดับกำลังงาน (Power level) ของ SC เพื่อประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน SC ทำให้ประสิทธิภาพของการคืนกำลังขณะเบรกมีค่าลดลง [18]-[25] เนื่องจากการสูญเสียกำลังงาน (power dissipation) จากกระบวนการแปลงพลังงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในระบบ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษา ออกแบบ และประเมินประสิทธิภาพ ระบบคืนกำลังขณะเบรก โดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์ (Hybrid Energy Storage System :HES) โครงสร้างแบบ SC/Battery ที่นำเสนอ สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยระบบ HES โครงสร้างแบบ SC/Battery ที่นำเสนอประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุยิ่งยวด, แบตเตอรี่, วงจรลดทอนระดับแรงดัน แบบดีซี-ดีซี ชนิดทิศทางเดียว (Unidirectional dc-dc buck converter) และ ไดโอดคืนกำลัง (Regenerative diode) นอกจากนี้ กลไกการควบคุมระบบคืนกำลังขณะเบรก (Regenerative braking system : RBS control mechanism) ได้ถูกพัฒนาไปพร้อมกันในงานวิจัยนี้ เมื่อเข้าสู่โหมดชะลอ หรือเบรกแรงดันดีซีลิงค์ (DC-link voltage) จะเข้าสู่สถานะบัส โดยรูปแบบอัลกอริทึมการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์สามเฟส (Appropriate switching algorithm) ดังนั้นไดโอดจะอยู่ในสถานะไบอัสไปข้างหน้า (Forward biased) ซึ่งช่วยให้พลังงานจากการเบรกจะสามารถถูกถ่ายโอนกลับมาเก็บไว้ที่ SC ได้ โดยไม่ต้องอาศัยการใช้วงจรทอนระดับแรงดันเพิ่ม ซึ่งแรงดันดีซีลิงค์สามารถปรับได้ผ่านการเปลี่ยนแปลงดิวตี้ไซเคิล (Duty-cycle) ของการมอดูเลตสัญญาณตามความกว้างพัลส์ (Pulse width modulation : PWM) ที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ ด้วยเหตุนี้ เมื่อ SC ถูกเติมประจุจากการเบรกจนเข้าใกล้ค่าสูงสุดในการอัดประจุของ SC ระบบจะทำการปรับให้พลังงานจากการเบรก (Braking energy) เปลี่ยนมาเก็บในแบตเตอรี่แทนได้ โดยใช้ switching scheme ของอินเวอร์เตอร์ จากวิธีการที่นำเสนอ สามารถปรับปรุงค่าประสิทธิภาพของการคืนกำลังขณะเบรก (Regenerative braking efficiency) ให้เพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากการลดพิสัยจำนวนการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังลง จึงถือได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าจุดเด่นของวิทยานิพนธ์นี้ นอกจากนี้ โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks : ANN) และการควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (Proportional-integral-derivative : PID controller) ได้ถูกนำมาปรับใช้เพื่อวัตถุประสงค์การกระจายแรงเบรก (Braking force distribution) สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีอุปกรณ์กักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาออกแบบระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
3. เพื่อศึกษาออกแบบระบบกู้คืนกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
4. เพื่อประเมินสมรรถนะระบบกู้คืนกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
5. เพื่อนำข้อมูลจากการทดสอบไปพัฒนาเป็นไลบรารีพื้นฐานสำหรับออกแบบระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับศึกษา ออกแบบ และประเมินสมรรถนะระบบกู้คืนกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ BLDC ขนาด 5 kW ที่ความต้องการความเร็วในการวิ่งเฉลี่ยที่ 30-45 km/h โดยเริ่มจากการออกแบบโครงสร้างระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ โดยใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ขนาด 2.7 V, 120 F จำนวน 18 เซลล์ ต่อบรรจุ และแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนขนาด 36 V, 20 Ah รวมถึงหากโลกเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพระบบกู้คืนกำลังขณะเบรกให้เหมาะสม แล้วทำการสร้างระบบพร้อมด้วยกลไกการควบคุมการคืนกำลังขณะเบรก จากนั้นนำมาจำลอง และทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าการคืนกำลังขณะเบรกภายใต้ 3 เงื่อนไข ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่อย่างเดียวไม่มีระบบคืนกำลังขณะเบรก, ยานยนต์ไฟฟ้าที่มีระบบคืนกำลังขณะเบรกโดยใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพียงอย่างเดียว และยานยนต์ไฟฟ้าที่มีระบบคืนกำลังขณะเบรกโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ โดยใช้ระยะทางต่อหนึ่งรอบการขับขี่ที่ 8069.57 เมตร และ 10,996.78 เมตร และหาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการจำลองผลและการทดสอบจริง เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบที่นำเสนอ และนำข้อมูลจากการทดสอบไปพัฒนาในการสร้างไลบรารีพื้นฐานสำหรับออกแบบระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

## 1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัยขอบเขตของการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ ได้แก่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิด (Electric Double Layer Capacitors : EDLC) และแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน รวมถึงหลักการการทำงานของระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยทฤษฎีได้กล่าวแยก และแบ่งออกเป็น ส่วนประกอบต่างๆ ได้แก่ มอเตอร์ การควบคุมมอเตอร์ วงจรลดทอนระดับแรงดัน แบบดีซี-ดีซี ชนิดทิศทางเดียว (Unidirectional dc-dc buck converter) และ ไดโอดคืนกำลัง (Regenerative diode) นอกจากนี้ในส่วนของการควบคุม จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks : ANN) และการควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (Proportional-integral-derivative : PID controller) ได้ถูกนำมาปรับใช้สำหรับระบบที่นำเสนอสุดท้ายในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของแรงต่างๆที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า อีกทั้งได้อธิบายการคำนวณการหาค่าประสิทธิภาพพลังงานจากการคืนกำลังขณะเบรกอีกด้วย

บทที่ 3 ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบ การวิเคราะห์ และหลักการการทำงานของระบบกู้คืนกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเริ่มจากการศึกษาออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงานสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยเน้นลักษณะสมบัติทางไฟตรงของตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิด EDLC และแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน จากนั้นทำการออกแบบระบบ HESS โครงสร้างแบบ SC/Battery ที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุยิ่งยวด, แบตเตอรี่, วงจรลดทอนระดับแรงดัน แบบดีซี-ดีซี ชนิดทิศทางเดียว (Unidirectional dc-dc buck converter) และ ไดโอดคืนกำลัง (Regenerative diode) รวมไปถึงกลไกการควบคุมระบบคืนกำลังขณะเบรก (Regenerative braking system : RBS control mechanism) และทำการทดสอบตัวควบคุมพีไอ (PID controller) ด้วยสัญญาณอินพุตรูปพัลส์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณบนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks : ANN) เพื่อเป็นการตรวจสอบการทำงานของส่วนควบคุมก่อนนำไปใช้งานในระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า

บทที่ 4 ในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมอุปกรณ์ และการออกแบบการทดสอบระบบกู้คืนกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า รวมถึงการจำลองผลเพื่อใช้เปรียบเทียบกับทดสอบจริง

บทที่ 5 เป็นผลการทดลองและวิเคราะห์ผล โดยในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบโครงสร้างทดสอบ และการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของระบบกู้คืนกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า รวมถึงการศึกษาผลที่ได้จากการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ในโหมดการทำงานทั้ง 4 โหมด จากนั้น ทำการวัดสถานะประจุของทั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ในระบบ ระบบกู้คืนกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery ที่นำเสนอ เพื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่น

บทที่ 6 เป็นบทสรุป และข้อเสนอแนะทั้งหมดของวิทยานิพนธ์นี้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้คือ ทฤษฎีพื้นฐานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor: BLDC Motor) วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน และการลดการกระเพื่อมแรงบิดในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

### 2.2 ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle) [2]-[8]

ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle : EV) คือรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าโดยใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งเก็บอยู่ในแบตเตอรี่หรืออุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอื่น และด้วยข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ให้แรงบิดได้ทันทีทำให้รถพลังงานไฟฟ้ามีอัตราเร่งที่เรียบและรวดเร็วรถพลังงานไฟฟ้ารุ่นแรกๆ ปรากฏในคริสต์ทศวรรษ 1880 เมื่อเริ่มต้นศตวรรษที่ 19 ยานยนต์ไฟฟ้ามีเสถียรภาพในการขับเคลื่อนสูง ง่ายต่อการใช้งาน ในขณะที่ยานยนต์สันดาปภายในยังใช้งานไม่สะดวกนัก เนื่องจากต้องใช้แรงคนในการเริ่มการทำงานของเครื่องยนต์ ส่วนเครื่องยนต์อื่น ๆ เช่น เครื่องจักรไอน้ำ ยังต้องการการจุดเตาตลอดจนประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องต่ำ ทำให้ในปี ค.ศ. 1920 มีการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าแพร่หลายยิ่งขึ้น อยู่ในรูปของระบบขนส่งสาธารณะและรถส่งของต่าง ๆ อย่างไรก็ตามเครื่องยนต์สันดาปภายในมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง (ค.ศ. 1911) จึงทำให้ยานยนต์สันดาปภายในได้รับความนิยมมากขึ้น นอกจากนี้ความได้เปรียบในส่วนของค่าพลังงานจำเพาะของเชื้อเพลิง (พลังงานที่ปล่อยออกมาในหนึ่งหน่วยน้ำหนักของแหล่งพลังงาน) อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สันดาปภายในมีค่าพลังงานจำเพาะประมาณ 9000 Wh/kg แม้ยานยนต์จะมีประสิทธิภาพการทำงานเพียง 20% และทำให้ค่าพลังงานจำเพาะเหลือเพียง 1800 Wh/kg [16] ในขณะที่แบตเตอรี่ Lead-acid นั้นมีพลังงานจำเพาะเพียง 30 Wh/kg เมื่อส่งพลังงานไปยังมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งมีประสิทธิภาพ 90% จึงทำให้เหลือค่าพลังงานจำเพาะเพียง 27 Wh/kg เท่านั้น ส่งผลให้ต้องใช้แบตเตอรี่จำนวนมากในการให้พลังงาน หมายถึงการที่ยานยนต์ต้องรับน้ำหนักของแบตเตอรี่ที่มากขึ้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความได้เปรียบของเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สันดาปภายในโดยการเปรียบเทียบอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ต่อน้ำหนักที่ต้องรองรับเพื่อขับเคลื่อนยานยนต์ในระยะทาง 50 และ 500 กิโลเมตร ยานยนต์ไฟฟ้ายังมีข้อจำกัดอีกอย่างหนึ่งคือ เวลาที่ใช้ในการเติมพลังงาน ในขณะที่ยานยนต์สันดาปภายในใช้เวลาเพียง 1 นาทีเติมเชื้อเพลิง ยานยนต์ไฟฟ้าต้องใช้เวลา 4 – 8 ชั่วโมง ในการประจุพลังงานเข้าในแบตเตอรี่ ตลอดจนแบตเตอรี่นั้นมีราคาสูงและมีอายุการใช้งานจำกัด (ภายใน 5 ปี) เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ขนาดและคุณภาพเดียวกัน จึงทำให้ส่วนแบ่งการตลาดของยานยนต์เปลี่ยนข้างมาเป็นยานยนต์สันดาปภายใน

หลังจากนั้นในช่วงปี ค.ศ. 1930 ยานยนต์ไฟฟ้าและยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดได้เริ่มหายไปจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตลาดยานยนต์จากสาเหตุที่ได้กล่าวข้างต้น พอร์ตได้สร้างยานยนต์สันดาปภายใน โมเดล-ที ซึ่งใช้งาน ได้สะดวกสบาย กว่ายานยนต์ไฟฟ้า ในค.ศ. 1973 ราคาน้ำมันในตลาดโลกสูงขึ้น รัฐบาลสหรัฐจึงเริ่ม รมรงค์ให้หันกลับมาใช้ยานยนต์ไฟฟ้าอีกครั้งเพื่อลดปริมาณการใช้น้ำมันและลดมลพิษ

คณะกรรมการทรัพยากรทางอากาศของแคลิฟอร์เนีย (California Air Resources Board (CARB)) มีนโยบายให้ผลิตและใช้ยานยนต์ไร้มลพิษ (Zero emission vehicle) โดยกำหนดให้ 2% ของยานยนต์ทั้งหมด ในรัฐแคลิฟอร์เนียโดยมีเป้าหมายเพื่อลดมลพิษลง 10% ภายในปี ค.ศ. 2003 และใน ปีค.ศ. 1997 โตโยต้าได้เริ่มจัดจำหน่ายยานยนต์โตโยต้าพริอุสในประเทศญี่ปุ่น โดย การพัฒนายานยนต์ประเภทนี้ยังได้ดำเนินต่อมาถึงปัจจุบัน เนื่องจากเกิดการตระหนักในการรักษา สิ่งแวดล้อม และการพัฒนา ทางด้านเทคโนโลยีของแบตเตอรี่จากในยุคแรกที่มีการพัฒนาแบตเตอรี่ แบบ Lead-acid ซึ่งมีขนาดใหญ่ น้ำหนักเยอะ แต่ให้พลังงานได้น้อย เป็นแบตเตอรี่แบบ Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion และ Li-Po ซึ่งมีค่าอัตราส่วนพลังงานต่อน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามลำดับ ประกอบกับราคาของ แบตเตอรี่มีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อย ๆ จึงทำให้เกิดความคุ้มค่าที่จะพัฒนาและผลิตออกมาใช้งานยิ่งขึ้น ถึงแม้ว่ายานยนต์ไฟฟ้าจะมีปัญหาหรืออุปสรรคต่างๆ ดังที่กล่าวข้างต้น แต่ก็มีข้อดีที่เด่นชัดในส่วน ของการทำงานโดยไม่มีมลภาวะทางอากาศและเสียง จึงมักจะนำไปใช้ในโกดัง โรงงาน สนามกอล์ฟ ตลอดจนใช้เป็นยานพาหนะใน ระยะทางสั้น ๆ (ไม่เกิน 4 กิโลเมตร) เช่น จักรยานไฟฟ้า รถเข็นไฟฟ้า สำหรับผู้พิการ ซึ่งสามารถใช้ภายในบนทางเท้า หรือ ภายในอาคารได้ ยานยนต์ไฟฟ้านั้นไม่สามารถ ลดปริมาณการใช้พลังงานได้ แต่ยานยนต์ไฟฟ้าเป็นตัวช่วยในการจัดการมลพิษโดยย้ายจุดปล่อย มลพิษไปยังโรงผลิตพลังงานแทน ซึ่งทำให้สามารถจัดการกับมลพิษอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ใน ปัจจุบันสามารถแบ่งประเภทของยานยนต์ไฟฟ้าได้ดังนี้

### 2.2.1 ยานยนต์ที่ใช้พลังงานจากระบบสันดาปภายในและพลังงานไฟฟ้า, ยานยนต์ไฮบริด (Hybrid Electric Vehicle, HEV) [4]

ยานยนต์ประเภทนี้ขับเคลื่อนด้วยแหล่งพลังงาน 2 ชนิด โดยรูปแบบที่ใช้กันทั่วไปนั่นคือ การ นำระบบเครื่องยนต์สันดาปภายใน และระบบไฟฟ้ามาให้พลังงานร่วมกัน การจัดการระบบพลังงานนี้ ส่วนใหญ่ออกแบบระบบได้ 3 รูปแบบ คือ ระบบไฮบริดแบบอนุกรม (Series hybrid) ซึ่งจะใช้ มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนยานยนต์เท่านั้น โดยมอเตอร์ไฟฟ้านั้นสามารถเลือกรับพลังงานจาก แบตเตอรี่ หรือเครื่องยนต์สันดาปภายใน หรือรับพลังงานจากทั้งสองแหล่ง พร้อมกันก็ได้ กำลังที่ได้ จากการขับเคลื่อนนั้นจึงมาจากมอเตอร์ไฟฟ้าอย่างเดียว ส่วนระบบไฮบริดแบบขนาน (Parallel hybrid) นั้น สามารถขับเคลื่อนได้ทั้งจากมอเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยทั้งมอเตอร์ ไฟฟ้าและเครื่องยนต์จะถูกต่อเข้ากับ ชุดส่งกำลังไปยังล้อขับเคลื่อน ระบบไฮบริดแบบอนุกรม-ขนาน (Series-parallel hybrid) เป็นระบบที่นำข้อดีของระบบไฮบริดแบบอนุกรมและแบบขนานมาปรับใช้ งานในแต่ละช่วงความเร็วของยานยนต์ โดยใช้กำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าในช่วงความเร็วต่ำ (แบบ อนุกรม) แต่ในช่วงอื่น ๆ ที่ต้องการอัตราเร่งสูง หรือประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อการ ใช้งาน ก็จะใช้การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าคู่กับเครื่องยนต์สันดาปภายในด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม (แบบขนาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าทั้งระบบไฮบริดทั้งหมดต้องอาศัยเครื่องยนตสันดาปภายในเป็นต้นกำลัง ข้อได้เปรียบของยานยนต์แบบไฮบริดคือความสามารถในการเก็บพลังงานส่วนเกินที่เครื่องยนต์ผลิตได้ในบางขณะ เช่นที่ความเร็วเดินทางที่เหมาะสม หรือ ขณะที่ชะลอความเร็วจากการผ่อนคันเร่ง เป็นต้น นอกจากนี้สามารถใช้ระบบ “Regenerative braking” ซึ่งเป็นการนำพลังงานที่โดยปกติจะสูญเสียไปในรูปของความร้อนจากผ้าเบรกและจานเบรกในขณะลดความเร็วของยานยนต์ เป็นการใช้เจนเนอเรเตอร์แทนผ้าเบรกในช่วงของการลดความเร็วเพื่อเก็บพลังงานจากการห้ามล้อเข้าสู่แบตเตอรี่ และระบบ “start-stop” ซึ่งเป็นการดับเครื่องในขณะที่รถหยุดนิ่ง เพื่อประหยัดพลังงานสำหรับการขับในเมือง ขณะที่รอสัญญาณไฟจราจรหรือการติดขัดที่ทำให้ยานยนต์หยุดนิ่งเป็นเวลานาน เนื่องจากระบบไฮบริดใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นเครื่องยนต์หลักจึงไม่จำเป็นต้องใช้แบตเตอรี่ที่มีความจุมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับแล้วจะเห็นได้ว่า ระบบไฮบริดแบบอนุกรมมีข้อเสียในส่วนของ การสูญเสียพลังงานจากการส่งพลังงานผ่านทั้งเจนเนอเรเตอร์ และมอเตอร์ ข้อเสียอีกประการหนึ่งคือต้นทุนของระบบที่สูงกว่าแบบขนาน จึงทำให้ปัจจุบันมีการใช้ระบบไฮบริดแบบขนานในยานยนต์หลากหลายรูปแบบ

## 2.2.2 ยานยนต์ไฮบริดที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากสายส่งพลังงานภายนอก (Plug –in Hybrid Electric Vehicle, PHEV) [4]

ยานยนต์ดังกล่าวมีระบบการทำงานคล้ายกับยานยนต์ไฮบริดทั่วไป แต่มีความสามารถในการขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าได้ระยะทางที่ไกลกว่ายานยนต์ไฮบริดข้างต้น จากข้อมูลการศึกษาของ New Automotive Innovation and Growth Team (NAIGT) [4] มองว่ายานยนต์ไฮบริดในลักษณะนี้จะเป็นยานยนต์รูปแบบหนึ่งในอนาคต หากการพัฒนา ระบบเก็บพลังงานมีการพัฒนาที่ก้าวกระโดด เนื่องจากระยะทางที่ยานยนต์ไฮบริดนี้สามารถเคลื่อนที่ด้วยพลังงานไฟฟ้าได้ไกลขึ้นทำให้จำเป็นต้องมีช่องทางสำหรับประจุพลังงานเข้าแบตเตอรี่โดยตรง อย่างไรก็ตามข้อมูลที่จำเป็นต่อการตัดสินใจเลือกระยะทางสำหรับยานยนต์ไฮบริดที่สามารถเคลื่อนที่อาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากต้นทุนของยานยนต์ไฮบริดขึ้นอยู่กับขนาดความจุของแบตเตอรี่ด้วย

## 2.2.3 ยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) [5]

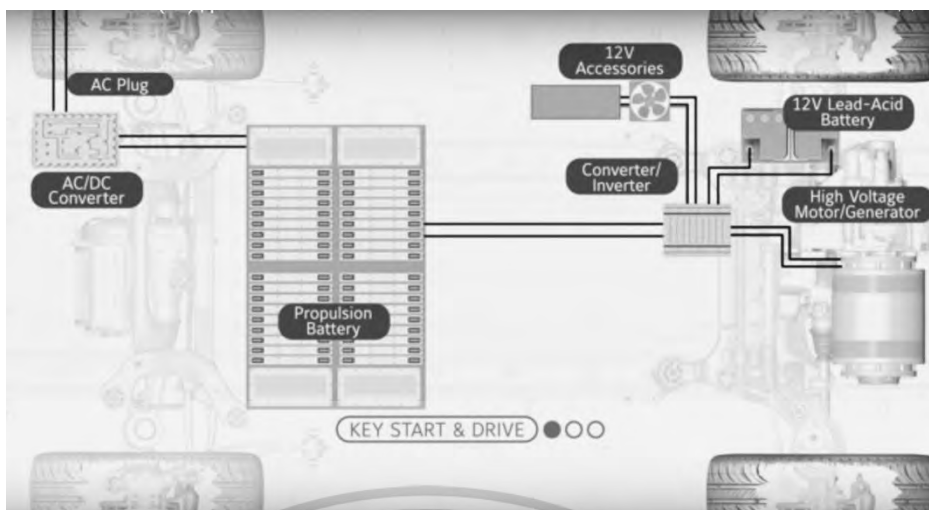
ยานยนต์ชนิดนี้จะมีลักษณะการทำงานเหมือนกับยานยนต์ที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ โดยจะใช้ fuel cell แทนแบตเตอรี่ยานยนต์ fuel cell นั้นมีโครงสร้างของการทำงานใกล้เคียงกับแบตเตอรี่ แตกต่างกันที่เซลล์เชื้อเพลิงนี้ถูก ออกแบบมาให้มีการเติมไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบ จึงช่วยขจัดปัญหาด้านปริมาณความจุที่มีอยู่อย่างจำกัดของแบตเตอรี่ แต่ในการใช้งานจริงก็ยังคงพึ่งพาแบตเตอรี่ เช่น ยานยนต์ตัวอย่าง Honda FCX เพื่อใช้ในการเก็บพลังงานจาก regenerative braking และส่งถ่ายพลังงานในช่วงที่ยานยนต์มีภาระงานสูง เช่น ช่วงเพิ่มอัตราเร่ง ขึ้นทางชัน เป็นต้น fuel cell มีหลายประเภท เรียกตามวัสดุที่นำมาใช้ทำสารตั้งต้น แต่ส่วนใหญ่ที่ใช้ในยานยนต์เป็นประเภท Polymer Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC) โดยหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยไฮโดรเจนจะถูกป้อนผ่านขั้วแอโนด และเกิดการทำปฏิกิริยา เคมีแยกประจุบวกกับประจุลบออกจากกัน ประจุลบจู่วิ่งอยู่ภายนอกทำหน้าที่เป็นกระแสไฟฟ้า ประจุบวกจะรวมตัวกับออกซิเจน ที่ถูกป้อนเข้ามาอีกฝั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

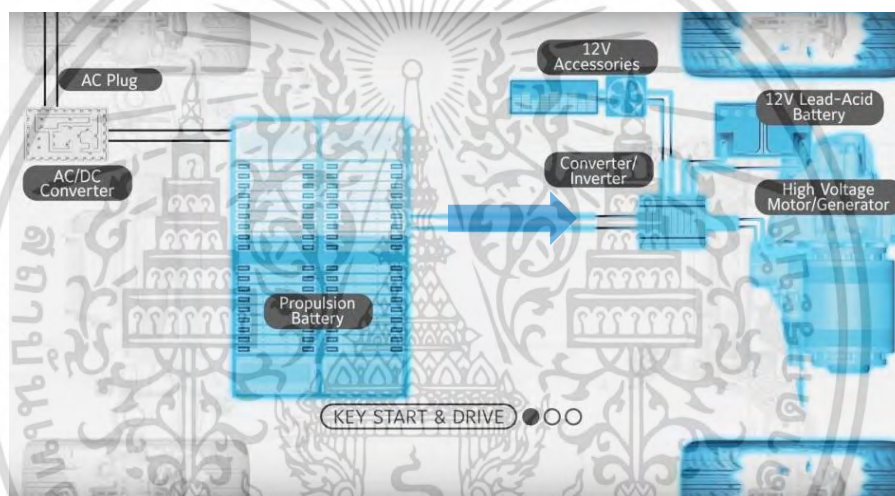
หนึ่งกลายเป็นน้ำและถ่ายออกนอกระบบ แต่ก็ต้องใช้อุปกรณ์เพื่อใช้ในการจ่ายอากาศและไฮโดรเจนพร้อมกับการระบายความร้อน และก็ทำให้สถานีเติมเชื้อเพลิงต้องมีกระบวนการในการที่จะอัดไฮโดรเจนที่มีความดันสูงถึง 500 บาร์หรือ ลดอุณหภูมิไฮโดรเจนให้อยู่ในรูปของของเหลวเพื่อให้สามารถขนส่งหรือเติมให้แก่ยานยนต์ต่าง ๆ ได้สะดวกขึ้น ยานยนต์ชนิดนี้ ต้องออกแบบและจัดวางให้มีความปลอดภัยสูง เนื่องจากไฮโดรเจนเป็นก๊าซไวไฟ จึงจำเป็นต้องมีเซนเซอร์ในการตรวจจับการชนที่มากกว่ายานยนต์อื่น ๆ เพื่อที่จะได้ปิดวาล์วจ่ายได้อย่างฉับไวขณะเกิดการชนขึ้น

## 2.2.4 ยานยนต์ที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle, BEV) [2]-[18]

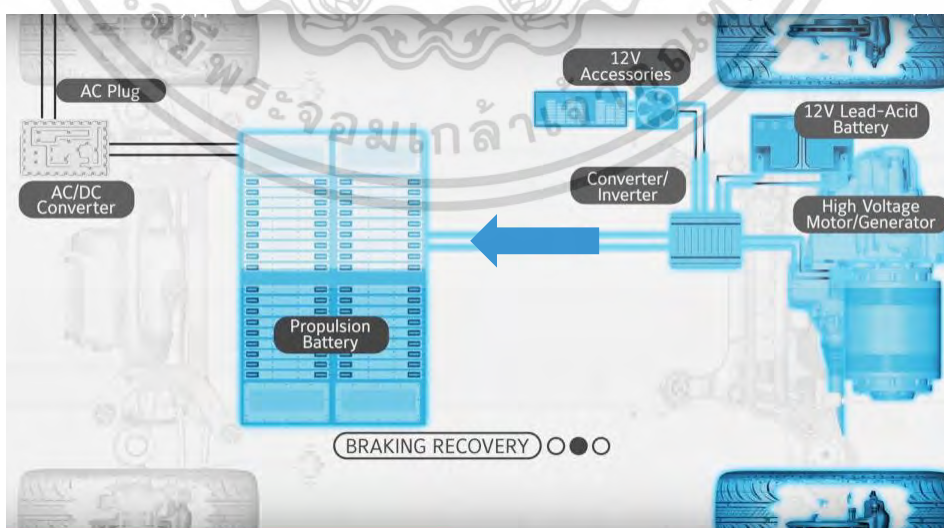
แนวคิดของยานยนต์ที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ คือ การนำแบตเตอรี่แบบเก็บประจุใหม่ได้มาใช้ในการเก็บพลังงานและจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อให้มอเตอร์เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลในการขับเคลื่อนยานยนต์ (รูปที่ 2.1) โดยปกติแล้วแบตเตอรี่จะถูกประจุไฟจากแหล่งพลังงานภายนอก เช่น ไฟฟ้าตามอาคารบ้านเรือน หรือจุดประจุไฟตามสถานที่ต่าง ๆ โดยยานยนต์ประเภทนี้มักต้องการระบบ “Regenerative braking” ซึ่งเป็นระบบที่ใช้เก็บพลังงานที่เหลือจากการห้ามล้อ โดยขณะที่ล้อหมุนช้าลงเรื่อย ๆ นั้น ล้อจะทำการหมุนมอเตอร์กลับด้านเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ากลับเข้าไปประจุที่แบตเตอรี่อีกทีหนึ่ง โดยรวมแล้วจะสามารถแบ่งสถานการณ์ทำงานได้เป็น 4 สถานะ คือ เดินหน้า ถอยหลัง ห้ามล้อขณะเดินหน้า และห้ามล้อขณะถอยหลัง โดยยานยนต์ไฟฟ้ามักถูกใช้ในการขนส่งระยะสั้น เช่น จักรยานไฟฟ้า รถสามล้อไฟฟ้า รถเข็นไฟฟ้า รถกอล์ฟ ยานยนต์ประเภทนี้มีความสามารถในการเคลื่อนที่จำกัด เนื่องจากความจุของแหล่งพลังงานและสถานที่สำหรับเติมพลังงานมีจำกัด จึงจำเป็นต้องมีแหล่งเติมพลังงานสาธารณะเพื่อขยายระยะขับเคลื่อน โดยโครงสร้างพื้นฐานทั่วไปของ BEV ก็มี charger, rechargeable battery packs, power converter, motor controller และ motor โดยหลักการทำงานของ EV แสดงดังรูป 2.2 -2.4 ในกรณีที่ใช้แบตเตอรี่เป็น energy storage ในการให้พลังงานเพียงอย่างเดียว ก็จะเริ่มด้วยแบตเตอรี่จะให้พลังงานเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ผ่าน power converter และส่วนหนึ่งก็จะถูกจ่ายให้ accessories ภายในรถ และเมื่อเข้าโหมดชะลอ หรือเบรก Motor ก็จะทำหน้าที่เป็น generator Motor ก็จะทำหน้าที่เป็น generator transfer พลังงานคืนสู่ battery ผ่าน converter ต่อมาก็จะเป็นโหมดการ charge ซึ่งเป็นการอัดประจุให้แบตเตอรี่และการชาร์จด้วย AC plug ผ่าน charger



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของยานยนต์ไฟฟ้า [15]

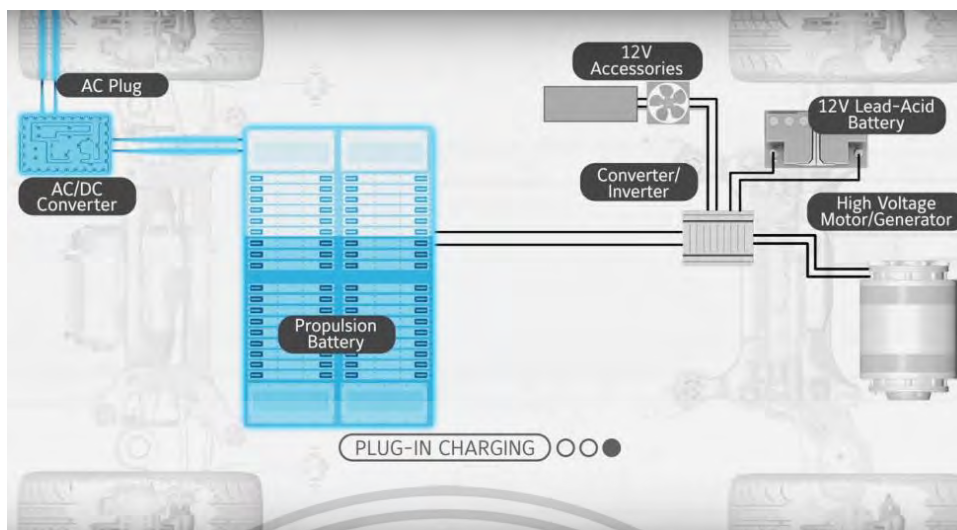


รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการทำงานระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อขับขี่ [15]



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการทำงานระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อเบรก [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



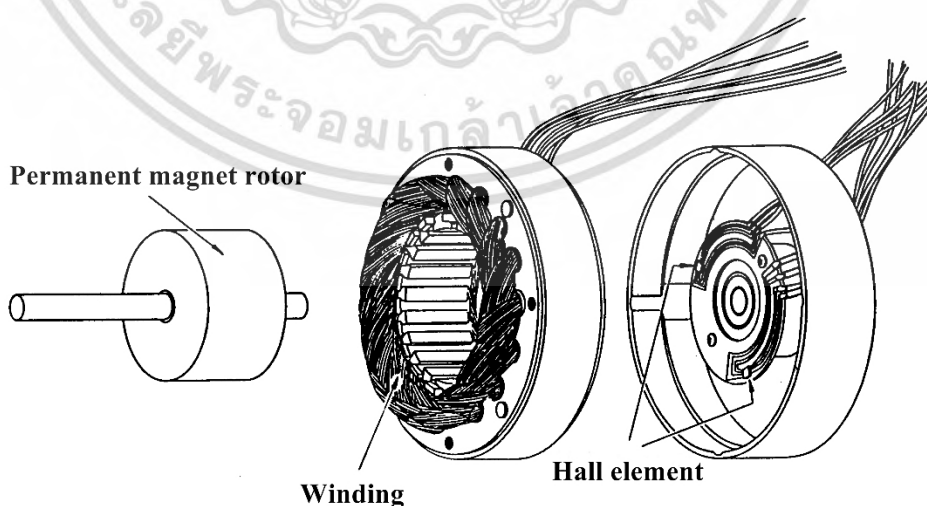
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเติมประจุสำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า [15]

## 2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน [2]-[5]

ในหัวข้อนี้ อธิบายถึงโครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.3.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับประเภทซิงโครนัส มอเตอร์ ที่มีโรเตอร์ (Rotor) เป็นแม่เหล็กถาวร มีทั้งแบบแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส หรือ หลายเฟส โดยทั่วไปนิยมใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านแบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส เพราะให้แรงบิดมาก และมีการกระเพื่อมของแรงบิดน้อย และถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านประกอบด้วย 3 ส่วนคือ 1) สเตเตอร์ (Stator) 2) โรเตอร์ (Rotor) และ 3) ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.1 สเตเตอร์ [14]

โครงสร้างในส่วนของสเตเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน 3 เฟสมีองค์ประกอบเหมือนกับมอเตอร์ซิงโครนัสหรือมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประกอบด้วย ขดลวดตัวนำ (Winding) พินอยู่ในร่องสลิตของสเตเตอร์ เรียกว่า ขดลวดสเตเตอร์ (Stator Winding) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งขดลวดนี้ มีรูปแบบการเชื่อมต่อทั้ง แบบวาย (Wye) หรือ แบบเดลต้า (Delta) ขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยทั่วไปแล้วนิยมเชื่อมต่อขดลวดแบบวายที่ไม่เชื่อมต่อจุดนิวทรัล เพราะให้ประสิทธิภาพมอเตอร์ที่ดี และมีต้นทุนที่ถูก

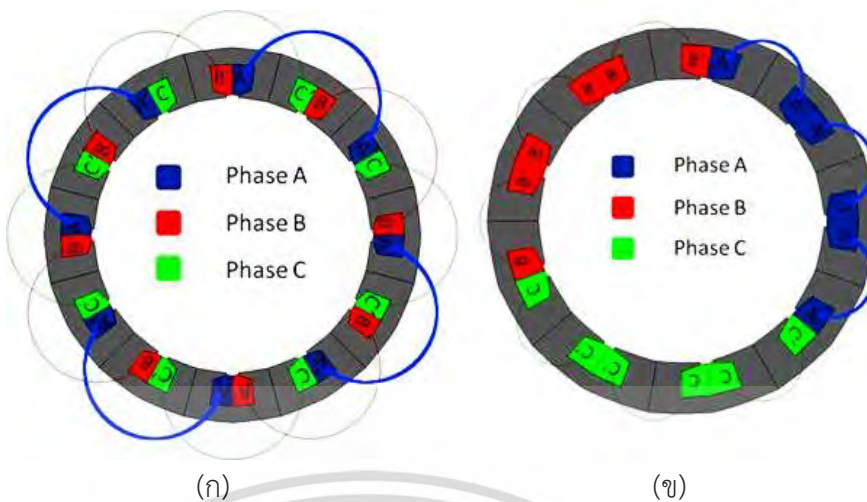


รูปที่ 2.6 ส่วนสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน [21]

สำหรับการพันขดลวดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีด้วยกัน 2 รูปแบบคือ การพันขดลวดแบบกระจุกตัว (Concentrated Winding) และการพันขดลวดแบบกระจายตัว (Distributed Winding) รูปแบบการพันขดลวดที่แตกต่างกันมีผลต่อลักษณะรูปคลื่นสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (Back Electromotive Force: Back EMF)

- การพันขดลวดแบบกระจุกตัว (Concentrated Winding) โดยจะมีลักษณะการวางขดลวดของแต่ละเฟสดังรูปที่ 2.7 (ก) การพันขดลวดแบบนี้ทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ (air-gap flux density) ในมอเตอร์เท่ากัน ส่งผลให้รูปคลื่นสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับมีรูปร่างเหมือนกับรูปคลื่นสัญญาณความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูในอุดมคติ [11]

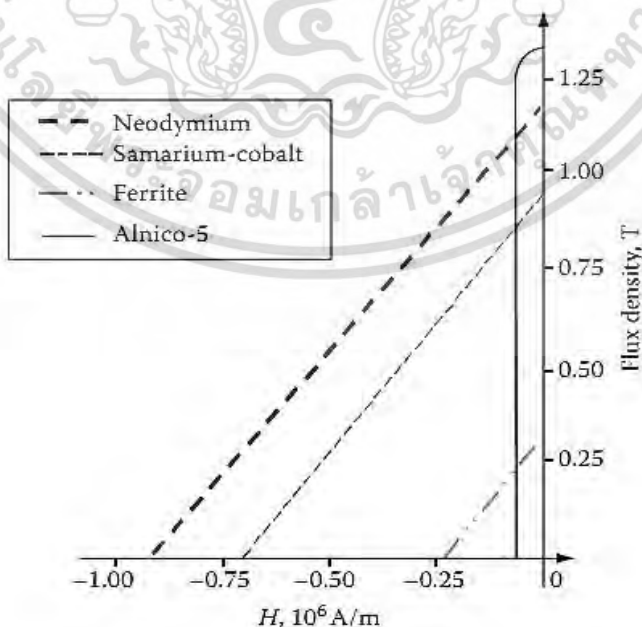
- การพันขดลวดแบบกระจายตัว (Distributed Winding) โดยขดลวดมีการพันขดลวดกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.7 (ข) มีวัตถุประสงค์เพื่อระบายความร้อนของขดลวดผ่านพื้นที่ผิวภายในสเตเตอร์ อย่างไรก็ตามการพันด้วยวิธีนี้ทำให้สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากในทางปฏิบัติ เป็นการยากที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศจะกระจายตัวให้อยู่ในรูปแบบสัญญาณสี่เหลี่ยมคางหมูในอุดมคติ [11]



รูปที่ 2.7 รูปแบบการพันขดลวดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน [8] (ก) Concentrated winding (ข) Distributed winding

2.3.1.2 โรเตอร์ [11]

ส่วนของโรเตอร์ ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet) อย่างน้อย 1 คู่ขั้วหรือหลายคู่ขั้วยึดติดอยู่บนแกนเหล็ก โดยวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นแม่เหล็กถาวรมีหลายชนิดเช่น Neodymium-Iron-Boron ( NdFeB ) แม่เหล็กชนิดนี้ประกอบด้วย นีโอมีเดียม เหล็ก และโบรอน ซึ่งมีค่า Remanence ( $B_r$ ) และ Coercivity ( $H_c$ ) สูง การเปรียบเทียบคุณลักษณะของวัสดุแม่เหล็กชนิดต่างๆแสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งพบว่าวัสดุแม่เหล็ก ชนิด Neodymium-Iron-Boron (NdFeB) ให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก(Flux density) และความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity, H ) สูงที่สุด

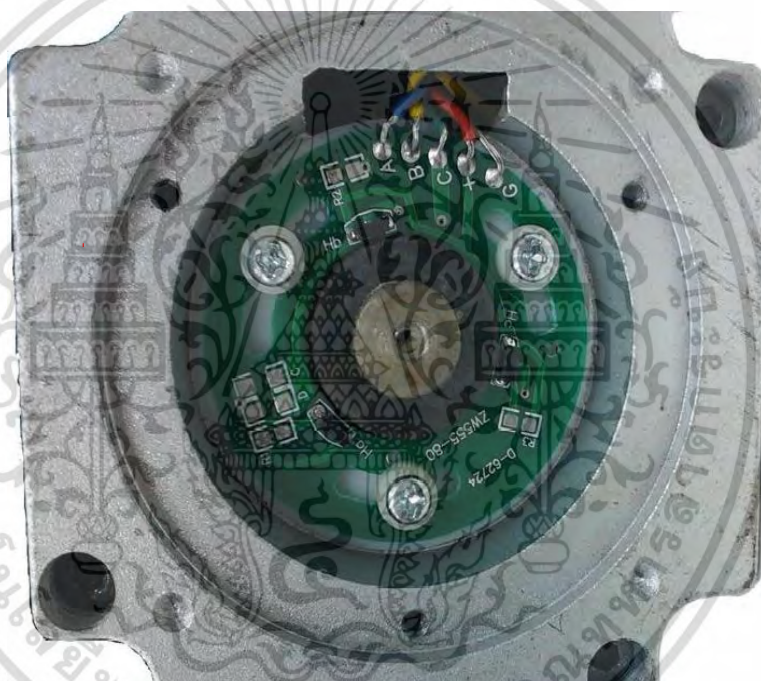


รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของวัสดุแม่เหล็กชนิดต่างๆในจุดภาคที่ 2 [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

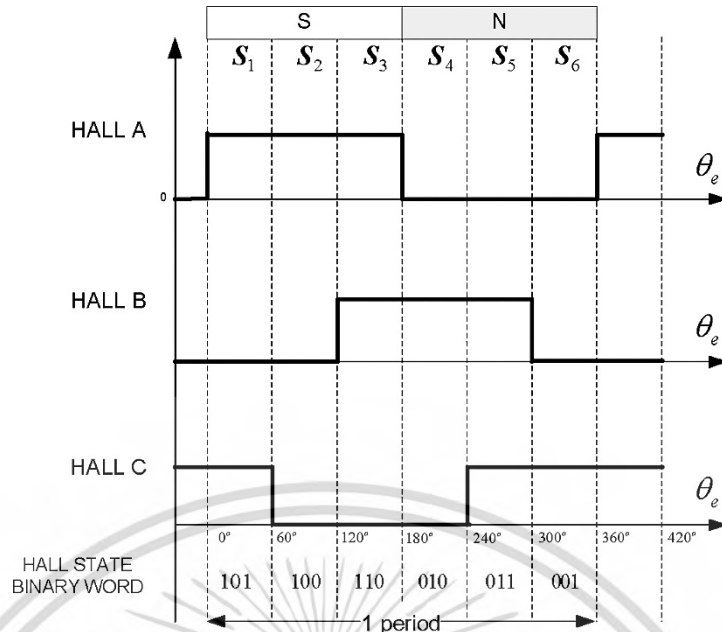
### 2.3.1.3 ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ [11]

ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ถูกติดตั้งในมอเตอร์เพื่อทำหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ แล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อควบคุมการเปิดปิดสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังให้คอมมิวเตชันกระแสไฟฟ้าได้ถูกต้อง โดยตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์มีหลายชนิด เช่น เอ็นโคเดอร์ (Encoder) รีโซลเวอร์ (Resolver) และตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall Effect Sensor) ส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์ เป็นตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์เพราะมีขนาดเล็ก ราคาถูก และใช้งานง่าย เมื่อนำตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์มาใช้ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ตัวตรวจจับนี้มักติดอยู่ บริเวณส่วนหลังของมอเตอร์จำนวนทั้งหมด 3 ตัว แต่ละตัวติดตั้งห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า ตำแหน่งการติดตั้ง ต้องสัมพันธ์กับตำแหน่งของขดลวดแต่ละเฟส เพื่อให้สัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์สัมพันธ์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

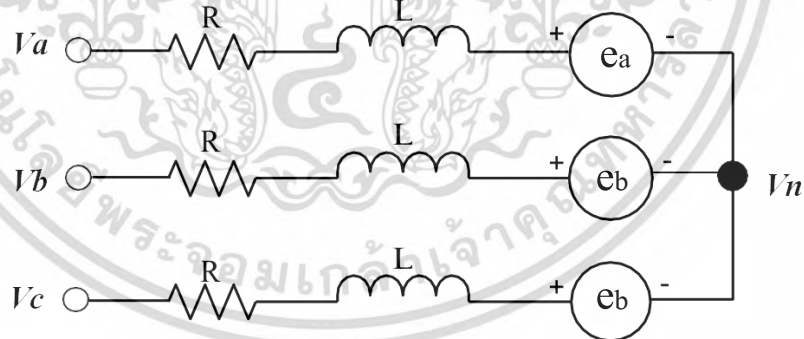
ตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์แต่ละตัวจะให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นลอจิก 1 เมื่อเจอขั้วเหนือของแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ และให้ลอจิกเป็น 0 เมื่อเจอขั้วใต้ของแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ เนื่องจากตำแหน่งติดตั้งตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์วางห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า ทำให้ใน 1 คาบของการหมุนสามารถแบ่งสัญญาณออกมาเป็น 6 ช่วง (Commutation States) ซึ่งแต่ละช่วงห่างกัน 60 องศาไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สัญญาณของตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์

2.3.1.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน [13]

เพื่อให้สามารถเข้าใจและอธิบายพฤติกรรมต่างๆของการขับเคลื่อนมอเตอร์ เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วรอบ และ แรงบิดที่สภาวะชั่ว ขณะและสภาวะคงตัวของมอเตอร์จึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ก่อน โดยวงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

จากรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลมอเตอร์ที่ขดลวดสเตเตอร์ถูกเชื่อมต่อแบบวาย จึงทำให้สามารถเขียนสมการแรงดันสเตเตอร์ได้ดังนี้

$$V_{an} = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \tag{2.1}$$

$$V_{bn} = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{cn} = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (2.3)$$

โดยที่  $V_{an}, V_{b1}, V_{c1}$  คือ แรงดันไฟฟ้าต้านเทียบจุดต่อร่วมนิวทรัลในแต่ละเฟส (V)

$e_a, e_b, e_c$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับในแต่ละเฟส (V)

$R$  คือ ความต้านทานขดลวดมอเตอร์ (Ohm)

$L = L_s - M$  คือ ความเหนี่ยวนำขดลวดมอเตอร์ (H)

$L_s$  คือ ความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส (H)

$M$  คือ ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างเฟส (H)

สำหรับสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับของมอเตอร์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$e_a = K_e \omega_m f_a(\theta) \quad (2.4)$$

$$e_b = K_e \omega_m f_b(\theta) \quad (2.5)$$

$$e_c = K_e \omega_m f_c(\theta) \quad (2.6)$$

$f_b(\theta), f_c(\theta)$  และ  $f_c(\theta)$  คือฟังก์ชันที่ขึ้นกับตำแหน่งมูโรเตอร์ซึ่งมีการกระจายตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Back EMF) ที่เปลี่ยนค่าตามตำแหน่งมูโรเตอร์ โดยมีค่าสูงสุดและต่ำสุด เท่ากับ 1 และ -1

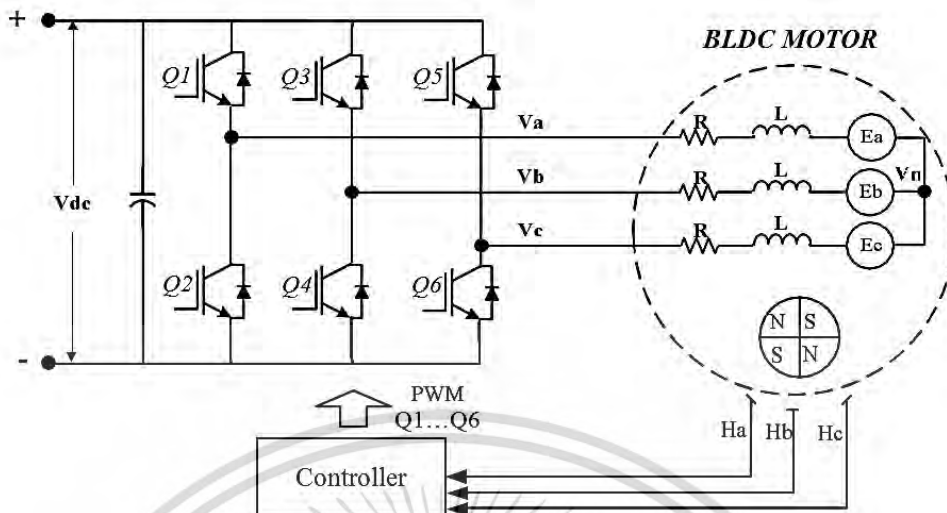
### 2.3.3 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน [1, 2]

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ และการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.3.3.1 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ [14]

เนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้ไม่มีแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ที่ทำหน้าที่จัดเรียงกระแสเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้จึงจำเป็นต้องใช้วงจรวจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เรียกว่า วงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับดังแสดงรูปที่ 2.10 วงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ประกอบด้วยสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้งหมด 6 ตัว โดยที่  $Q_1, Q_3$ , และ  $Q_5$  เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังชุดบน และ  $Q_2, Q_4$ , และ  $Q_6$  สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังชุดล่าง และมีฟรีวีลิ่งไดโอด (Free-Wheeling Diode) ต่อขนานกับสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวเพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าฟรีวีลิ่ง (Free-Wheeling Current) นอกจากนี้ยังมีตัวควบคุม (Controller) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์โดยรับข้อมูลอินพุตเป็นตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้มาจากตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์

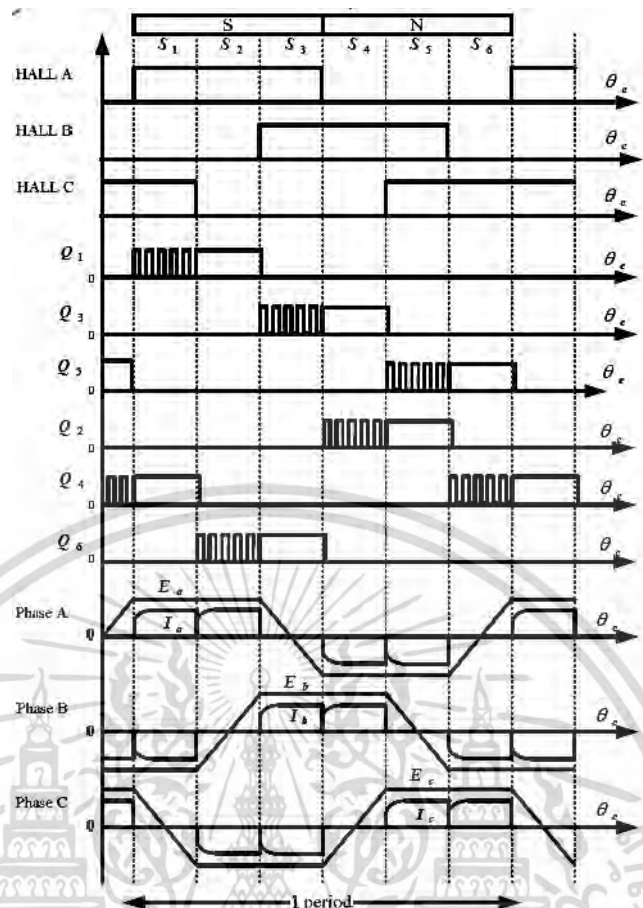
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิดนี้ วิธีการขับเคลื่อนแบบ Six-Step เป็นวิธีการที่นิยมใช้ โดยแบ่งช่วงคอมมิวเตชัน (Commutation States) หรือช่วงเปลี่ยนทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้าเป็น 6 ช่วง คือ S1, S2, S3, S4, S5 และ S6 แต่ละช่วงห่างกัน 60 องศาไฟฟ้า โดยในทุกช่วง ๆ ของการหมุน จะมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าผ่านขดลวดของมอเตอร์ทีละ 2 เฟส ส่วนขดลวดเฟสที่เหลือถูกปล่อยลอยไว้ เมื่อแรงดันไฟฟ้าถูกจ่ายให้กับขดลวดทั้งสองเฟส กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านเข้าขดลวดเฟสหนึ่งแล้วไหลออกขดลวดอีกเฟสหนึ่ง จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลทั้งช่วงบวกและช่วงลบ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละเฟสมีช่วงการนำกระแสอยู่ 120 องศาไฟฟ้าและมีลักษณะเหมือนสี่เหลี่ยม (Quasi-Square) ดังแสดงดังรูปที่ 2.13

เพื่อให้สามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ได้ เทคนิคพัลส์วิดมอดูเลชัน ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยการปรับค่าดีวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) หรือ อัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาเปิดสวิตช์ ( $T_{on}$ ) กับ คาบเวลา สวิตช์ซิง ( $T_s$ ) เพื่อควบคุมการเปิดปิดสวิตช์ทั้ง 6 ตัว ทำให้สามารถปรับแรงดันเฉลี่ยที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ได้



รูปที่ 2.13 สัญญาณ Hall Sensor, สัญญาณควบคุมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้ง 6 ตัวแบบ PWM-ON เทคนิค แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และ กระแสไฟฟ้าเฟส

เมื่อพิจารณาการทำงานของเทคนิคพัลส์วิดมอดูเลชั่นแบบ PWM-ON ตลอดช่วงการหมุน 360 องศาไฟฟ้า โดยแบ่งเป็น 6 ช่วง S1, S2, S3, S4, S5 และ S6 สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

ช่วง S1: ตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์ เฟส A (Hall A) เปลี่ยนสถานะลอจิกจาก 0 เป็น 1 ตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์ เฟส B (Hall B) มีสถานะลอจิกเป็น 0 และตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์ เฟส C (Hall C) มีสถานะลอจิกเป็น 1 ตัวควบคุมส่งสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชั่น ควบคุมการ เปิด-ปิด สวิตช์  $Q_1$  ส่วนสวิตช์  $Q_4$  นำกระแสต่อเนื่อง ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าที่ขดลวดมอเตอร์เฟส A และออกที่ขดลวดมอเตอร์เฟส B ส่วนขดลวดมอเตอร์เฟส C ถูกปล่อยลอยไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล

ช่วง S2: ตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์ เฟส C (Hall C) เปลี่ยนสถานะลอจิกจาก 1 เป็น 0 ตัวควบคุมจะสั่งงานสวิตช์  $Q_1$  นำกระแสต่อเนื่อง และ  $Q_6$  ถูกควบคุมด้วยสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชั่น ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าที่ขดลวดมอเตอร์เฟส A และออกที่ขดลวดมอเตอร์เฟส C ส่วนขดลวดมอเตอร์เฟส B ถูกปล่อยลอยไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล

ช่วง S3: ตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์ เฟส B (Hall B) เปลี่ยนสถานะลอจิกจาก 0 เป็น 1 ตัวควบคุมส่งสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชั่น สั่งงานสวิตช์  $Q_3$  นำกระแสไฟฟ้า และ  $Q_6$  นำกระแสต่อเนื่อง ทำให้กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าที่ขดลวดมอเตอร์เฟส B และออกที่ขดลวดมอเตอร์เฟส C ขดลวดมอเตอร์เฟส A ถูกปล่อยลอยไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วง S4: ตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์ เฟส A (Hall A) เปลี่ยนสถานะลอจิกจาก 1 เป็น 0 ตัวควบคุมจะสั่งงานสวิตช์  $Q_3$  นำกระแสต่อเนื่อง และ  $Q_2$  ถูก ควบคุมด้วยสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชั่น ทำให้กระแสไฟฟ้า จะไหลเข้าที่ขดลวดมอเตอร์เฟส B และออกที่ขดลวดมอเตอร์เฟส A ขดลวดมอเตอร์เฟส C ถูกปล่อยลอยไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล

ช่วง S5: ตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์ เฟส C (Hall C) เปลี่ยนสถานะลอจิกจาก 0 เป็น 1 ตัวสวิตช์  $Q_5$  ถูกควบคุมด้วยสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชั่น และ  $Q_2$  นำกระแสต่อเนื่องทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าที่ขดลวดมอเตอร์เฟส C และไหลออกที่ขดลวดมอเตอร์เฟส A ส่วนขดลวดมอเตอร์เฟส B ถูกปล่อยลอยไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล

ช่วง S6: ตัวตรวจจับฮอลล์เอฟเฟกต์ เฟส B (Hall B) เปลี่ยนสถานะลอจิกจาก 1 เป็น 0 ตัวควบคุมจะสั่งงานสวิตช์  $Q_5$  นำกระแสต่อเนื่องและ  $Q_2$  ถูกควบคุมด้วยสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชั่น ทำให้กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าที่ขดลวดมอเตอร์เฟส C และไหลออกจากขดลวดมอเตอร์เฟส B ส่วนขดลวดมอเตอร์เฟส A ถูกปล่อยลอยไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล และวนกลับมาช่วง S1 อีกครั้งเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ

### 2.3.3.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ [3]

ถึงแม้ปัจจุบันได้มีการนำเอาตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ Hall Effect sensor มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านอย่างกว้างขวางเพื่อระบุตำแหน่งโรเตอร์ อย่างไรก็ตามในงานบางประเภทยังมีข้อจำกัดในการใช้งานของตัวตรวจจับตำแหน่ง Hall Effect sensor ซึ่งมีผลกระทบดังต่อไปนี้

- 1) การติดตั้งตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ทำให้เพิ่มขนาดของมอเตอร์
- 2) สภาพแวดล้อมการใช้งานไม่เหมาะสมเช่น อุณหภูมิสูง ความชื้นสูง ซึ่งส่งผลทำให้สมรรถนะการทำงานของตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลดลงและมีความน่าเชื่อถือต่ำ
- 3) การติดตั้งตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์เข้ากับตัวมอเตอร์ต้องการความแม่นยำสูง ถ้าติดตั้งไม่ถูกต้องส่งผลต่อการคอมมิวเตชันกระแสมอเตอร์ไม่ถูกต้อง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพมอเตอร์

ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงกล่าวถึง การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ โดยเริ่มต้นจากการหาตำแหน่งจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยวิธี Back EMF Based Method การเริ่มหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านจากสภาวะหยุดนิ่ง การคำนวณความเร็วรอบมอเตอร์จากจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และ การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

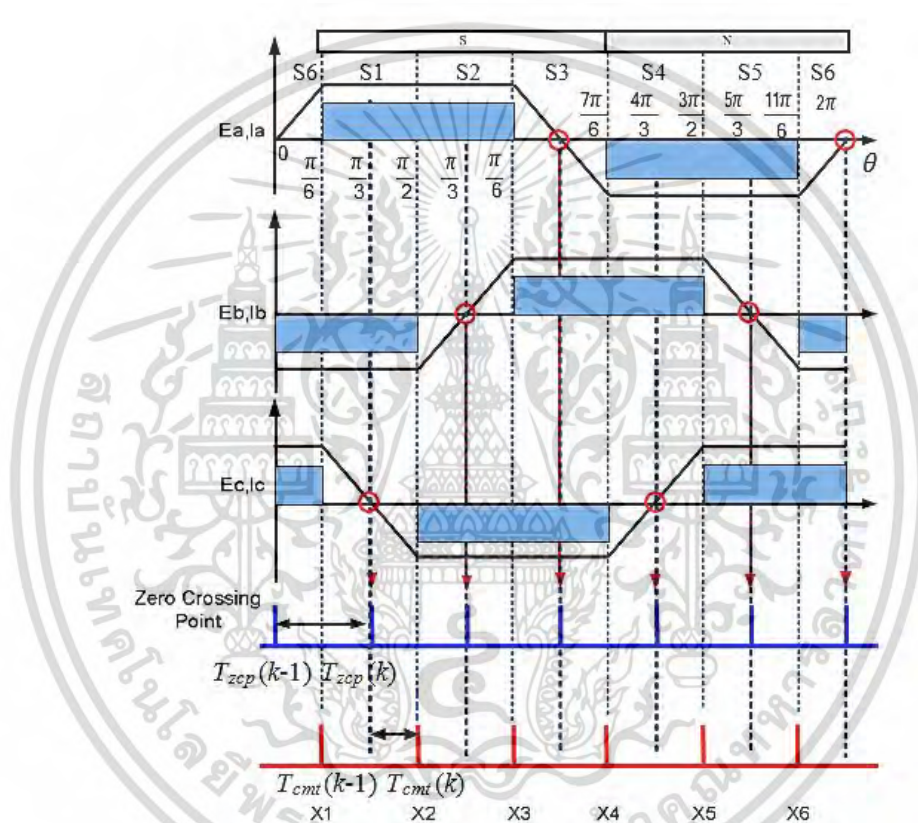
#### 1. การหาตำแหน่งจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยวิธี Back EMF Based Method

เป็นวิธีที่หาตำแหน่งจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ กับ จุดคอมมิวเตชัน กระแสไฟฟ้าเพื่อที่หาตำแหน่งมุมโรเตอร์ดังแสดงรูปที่ 2.14 ในรูปแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับแต่ละเฟส  $e_a$ ,  $e_b$  และ  $e_c$  เป็นรูปคลื่นแบบ สี่เหลี่ยม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คางหมู ซึ่งแต่ละเฟสห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า จุด  $X_1$  ถึง  $X_6$  คือจุดที่ทำการคอมมิวเตชันกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะล่าหลังจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับอยู่ 30 องศาไฟฟ้าที่ทุกๆคาบของเวลา ดังนั้น การหาจุดทำคอมมิวเตชัน สามารถทำได้จากการหน่วงระยะเวลาหลังจากเกิดจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับแต่ละครั้ง โดยสามารถหาจุดที่ทำการคอมมิวเตชัน กระแสไฟฟ้าได้ จากสมการ (2.7)

$$T_{cmt}(k) = T_{zcp}(k) + \frac{1}{2}\Delta T_{zcp}(k) \quad (2.7)$$

$$T_{zcp}(k) = T_{zcp}(k) - T_{zcp}(k-1) \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับกับจุดคอมมิวเตชัน

การหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ทำได้โดยวัดแรงดันไฟฟ้าเฟสที่ถูกปล่อยลอย ซึ่งเฟสที่ถูกปล่อยลอยสำหรับวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับแต่ละช่วงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แรงดันไฟฟ้าเฟสที่ถูกปล่อยลอยสำหรับวัตต์แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับในแต่ละช่วง

ช่วง	แรงดันไฟฟ้าเฟสที่ถูกปล่อยลอย
S1	เฟส C
S2	เฟส B
S3	เฟส A
S4	เฟส C
S5	เฟส B
S6	เฟส A

แรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟส ใน 1 คาบเวลาทางไฟฟ้า พบว่าสามารถแบ่งช่วงการทำงานได้ 4 ช่วง

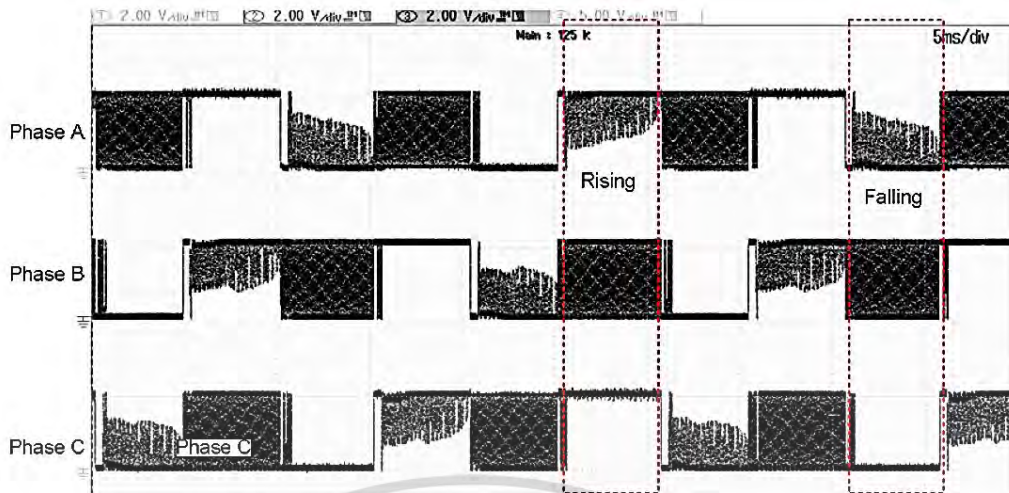
1) ช่วงฟรีวิลลิงไดโอดทำงาน คือ ช่วงที่มีการคอมมิวเตชัน กระแสไฟฟ้ามอเตอร์ ซึ่งเปลี่ยนทิศทางการไหลกระแสจากเฟส A ไปยังอีกเฟสหนึ่ง ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกลับทิศทางฟรีวิลลิงไดโอดที่ต่อขนานทำงาน ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเฟส A เท่ากับ แรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (เมื่อสวิตช์ตัวกลางของเฟสเปลี่ยนสถานะจาก on เป็น off) หรือเท่ากับศูนย์ (เมื่อสวิตช์ตัวบนของเฟสเปลี่ยนสถานะจาก on เป็น off)

2) ช่วง Floating คือ ช่วงที่เฟสถูกปล่อยลอย ไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าเฟส A ( $Q_1$  และ  $Q_2$  อยู่ในสถานะ OFF ทั้งคู่) ทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล โดยแรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้สามารถ นำไปหาจุดผ่านศูนย์แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับซึ่งการคำนวณหาจุดผ่านศูนย์แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ขอก้าวในลำดับถัดไป

3) ช่วง PWM คือ ช่วงที่สัญญาณควบคุมสวิตช์  $Q_1$  เป็นสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชัน แรงดันไฟฟ้าเฟส A ช่วงนี้จะสลับไปมาระหว่างแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงกับศูนย์เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตามค่าดิวิตีไซเคิลที่กำหนด ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในเฟส A

4) ช่วง on คือ ช่วงที่สัญญาณควบคุมสวิตช์  $Q_1$  เป็นสัญญาณ on ต่อเนื่อง แรงดันไฟฟ้าเฟส A ในช่วงนี้มีค่าคงที่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในเฟส A เช่นเดียวกัน

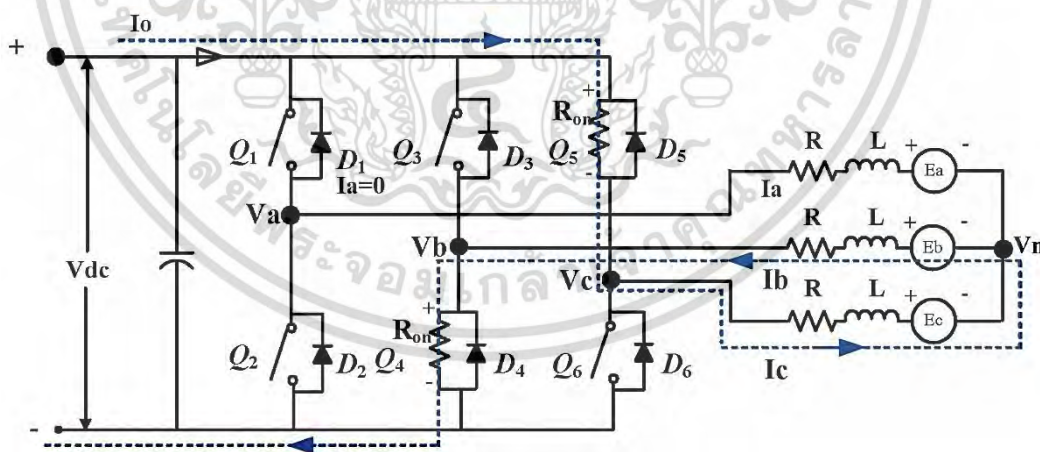
เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเฟส A ขณะที่ถูกปล่อยลอยมี 2 ช่วง คือ ช่วงขาขึ้น (Rising edge) และ ช่วงขาลง (Falling edge) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ขณะที่ทั้ง 2 ช่วงนี้มีสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ขั้วเล็กทรานซิสต์กำลังของเฟส B เป็นสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชัน ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าเฟส A ที่เป็นผลมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับและสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชัน



รูปที่ 2.15 แรงดันไฟฟ้าเฟส A เฟส B และ เฟส C

การวัดแรงดันไฟฟ้าเฟส A ในช่วงที่ถูกปล่อยลอย เพื่อหาค่าตำแหน่งจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับแบ่งออกเป็น 4 กรณีดังต่อไปนี้ (ยกตัวอย่างการหาค่าตำแหน่งจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับจากการวัดแรงดันไฟฟ้าเฟส A )

1) กรณีแรงดันไฟฟ้าเฟส A ที่ถูกปล่อยลอยอยู่ในช่วงขาขึ้น (Rising edge) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชัน ของเฟส B อยู่ในสถานะ on ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าขดลวดมอเตอร์เฟส C และไหลออกที่ขดลวดมอเตอร์เฟส B ผ่านสวิตช์  $Q_5$  (สถานะ on ต่อเนื่อง) และ  $Q_4$  (สถานะสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชัน on) ขณะที่ขดลวดมอเตอร์เฟส A ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังแสดงรูปที่ 2.16 ทำให้แรงดันไฟฟ้าเฟส A สามารถเขียนได้ดังนี้



รูปที่ 2.16 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ช่วงสวิตช์  $Q_4$  สถานะสัญญาณ On

$$V_a = E_a + \frac{[(V_{dc}-I_cR_{on})-I_bR_{on}]}{2} \tag{2.9}$$

ตามกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์  $I_a + I_b + I_c = 0$  ดังนั้น  $-I_b = I_c = I_o$  และ  $I_o = 0$  สมการที่ (2.9) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

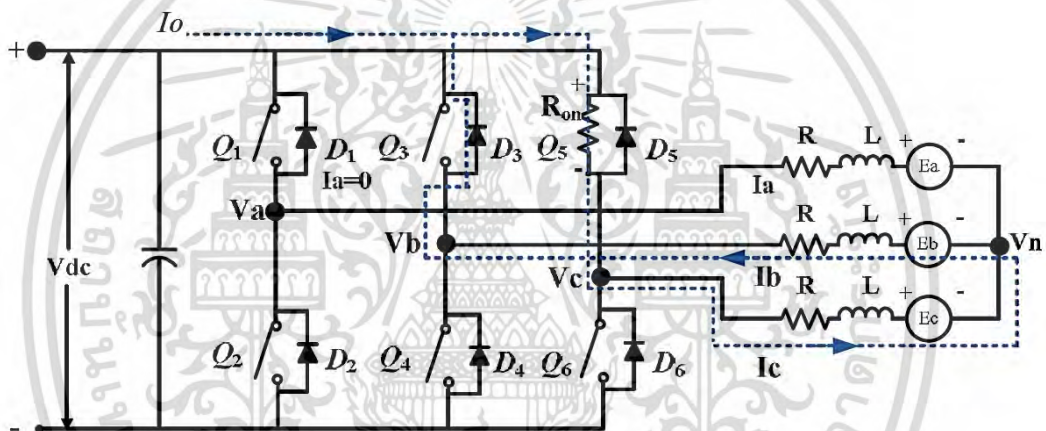
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_a = E_a + \frac{[(V_{dc} - I_o R_{on}) + I_o R_{on}]}{2} E_a + \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) แรงดันไฟฟ้าเฟส A ที่จุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ( $E_a = 0$ ) มีค่าเท่ากับ

$$V_a + \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.11)$$

2) กรณีแรงดันไฟฟ้าเฟส A ที่ถูกปล่อยลอยอยู่ในช่วงขาขึ้น (Rising edge) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชั่นของเฟส B อยู่ในสถานะ off กระแสไฟฟ้าไหลเข้าขดลวดมอเตอร์เฟส C และไหลออกที่ขดลวดมอเตอร์เฟส B โดยผ่านสวิตช์  $Q_5$  (สถานะ on ต่อเนื่อง) และฟรีวิลลิง ไดโอด (free-wheeling diode)  $D_3$  ขณะที่ขดลวดมอเตอร์เฟส A ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านดังแสดงรูปที่ 2.17 ทำให้สามารถเขียนแรงดันไฟฟ้าเฟส A ได้ดังนี้



รูปที่ 2.17 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ช่วงสวิตช์  $Q_4$  มีสถานะสัญญาณ Off

$$V_a = E_a + \frac{[(V_{dc} - I_c R_{on}) - (V_{dc} + V_a)]}{2} \quad (2.12)$$

$$V_a = E_a + \frac{[V_{dc} + (V_{dc} - I_c R_{on})]}{2} \quad (2.13)$$

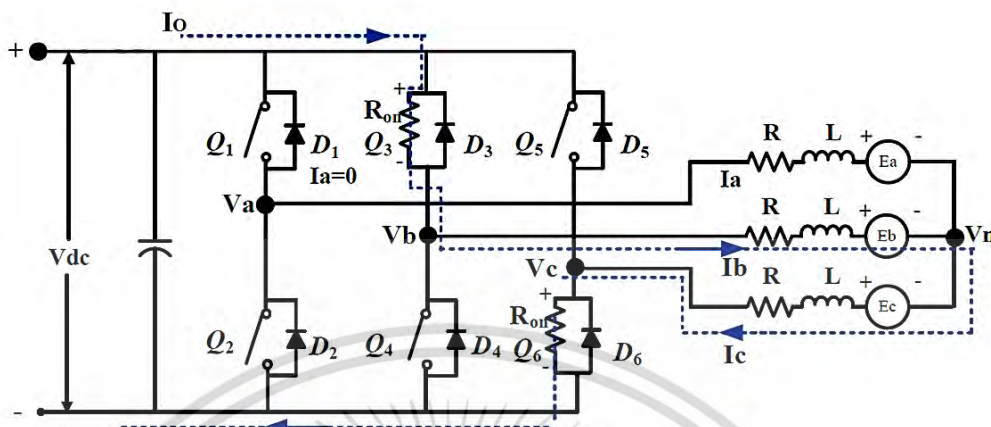
ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเฟส A ที่จุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ( $E_o = 0$ ) มีค่าเท่ากับ

$$V_a = V_{dc} \quad (2.14)$$

3) กรณีแรงดันไฟฟ้าเฟส A ที่ถูกปล่อยลอยอยู่ในช่วงขาลง (Falling edge) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชั่นของเฟส B อยู่ในสถานะ on กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าขดลวดมอเตอร์เฟส B และไหลออกที่ขดลวดมอเตอร์เฟส C ผ่านสวิตช์  $Q_3$  (สถานะสัญญาณพัลส์วิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอดูเลชัน on) และ  $Q_6$  (สถานะ on ต่อเนื่อง) ส่วนขดลวดมอเตอร์เฟส A ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังแสดงรูปที่ 2.18 ทำให้สามารถเขียนแรงดันไฟฟ้าเฟส A ได้ดังนี้



รูปที่ 2.18 ทิศทางการไหลของกระแส ช่วงสวิตช์  $Q_3$  สถานะสัญญาณ On

$$V_a = E_a + \frac{[(V_{dc} - I_c R_{on}) - I_c R_{on}]}{2} \tag{2.15}$$

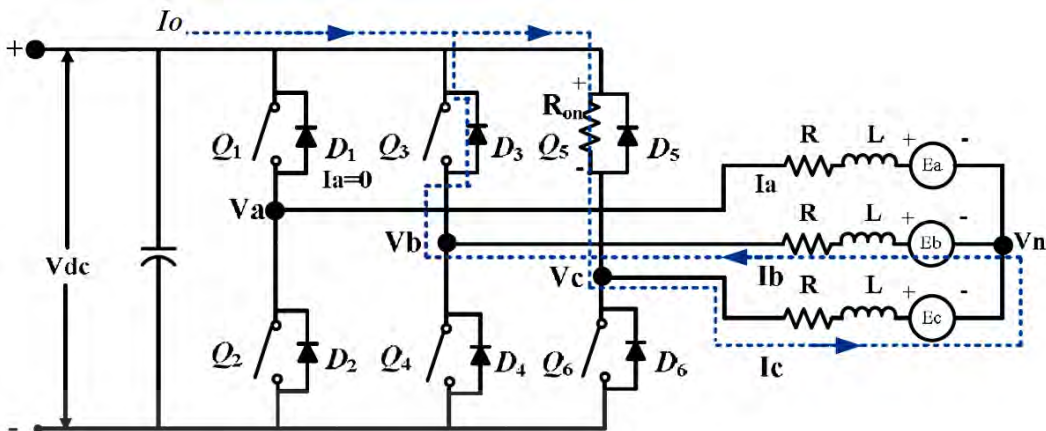
ตามกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์  $I_a + I_b + I_c = 0$  ดังนั้น  $I_b = -I_c = I_o$  และ  $I_o = 0$  สมการที่ (2.15) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$V_a = E_a + \frac{[(V_{dc} - I_c R_{on}) - I_c R_{on}]}{2} = E_a + \frac{V_{dc}}{2} \tag{2.16}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเฟส A ที่จุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับช่วงสัญญาณ มีค่าเท่ากับ

$$V_a = \frac{V_{dc}}{2} \tag{2.17}$$

4) กรณีแรงดันไฟฟ้าเฟส A ที่ถูกปล่อยลอยอยู่ในช่วงขาลง (Falling edge) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชันของเฟส B อยู่ในสถานะ off กระแสไฟฟ้าไหลเข้าขดลวดมอเตอร์เฟส B และไหลออกที่ขดลวดมอเตอร์เฟส C โดยผ่านสวิตช์  $Q_6$  (สถานะ on ต่อเนื่อง) และฟรีวิลลิงไดโอด (free-wheeling diode)  $D_4$  ขณะที่ขดลวดมอเตอร์เฟส A ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านดังแสดงในรูปที่ 2.19 ทำให้แรงดันไฟฟ้าเฟส A สามารถเขียนได้ดังนี้ [18]



รูปที่ 2.19 ทิศทางการไหลของกระแส ช่วงสวิตช์  $Q_3$  สถานะสัญญาณ Off

$$V_a = E_a + \frac{[-V_{dc} - I_c R_{on}]}{2} \tag{2.18}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเฟส A ที่จุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับมีค่าเท่ากับ

$$V_a = 0 \tag{2.19}$$

## 2. การเริ่มหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านจากสภาวะหยุดนิ่ง [4]

เนื่องจากในช่วงที่มอเตอร์ไฟฟ้าหยุดนิ่งหรือหมุนที่ความเร็วรอบต่ำ ๆ ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับมีค่าเท่ากับศูนย์หรือน้อยมาก ทำให้ไม่สามารถหาตำแหน่งจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับได้ ดังนั้นขั้นตอนการเริ่มต้นหมุนมอเตอร์จากสภาวะหยุดนิ่งจึงเป็นสิ่งจำเป็น งานวิจัยต่าง ๆ ได้นำเสนอวิธีการเริ่มต้นหมุนมอเตอร์สภาวะหยุดนิ่งหลายวิธีโดยวิธีที่นิยมใช้ คือวิธีการ Align and Go เนื่องจากเป็นวิธีง่ายและเหมาะกับการประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการต้นทุนต่ำ โดยโหลดประเภทนี้เป็นแบบแรงบิดแปรผันตามความเร็ว (Variable Torque) [8] ซึ่งทำให้มีแรงบิดของโหลดในช่วงเริ่มต้นหมุนมอเตอร์น้อย และไม่ต้องคำนึงถึงเรื่องการแกว่งของโรเตอร์ในช่วงแรกโดยมีขั้นตอนการเริ่มหมุนมอเตอร์ ขั้นตอนดังนี้

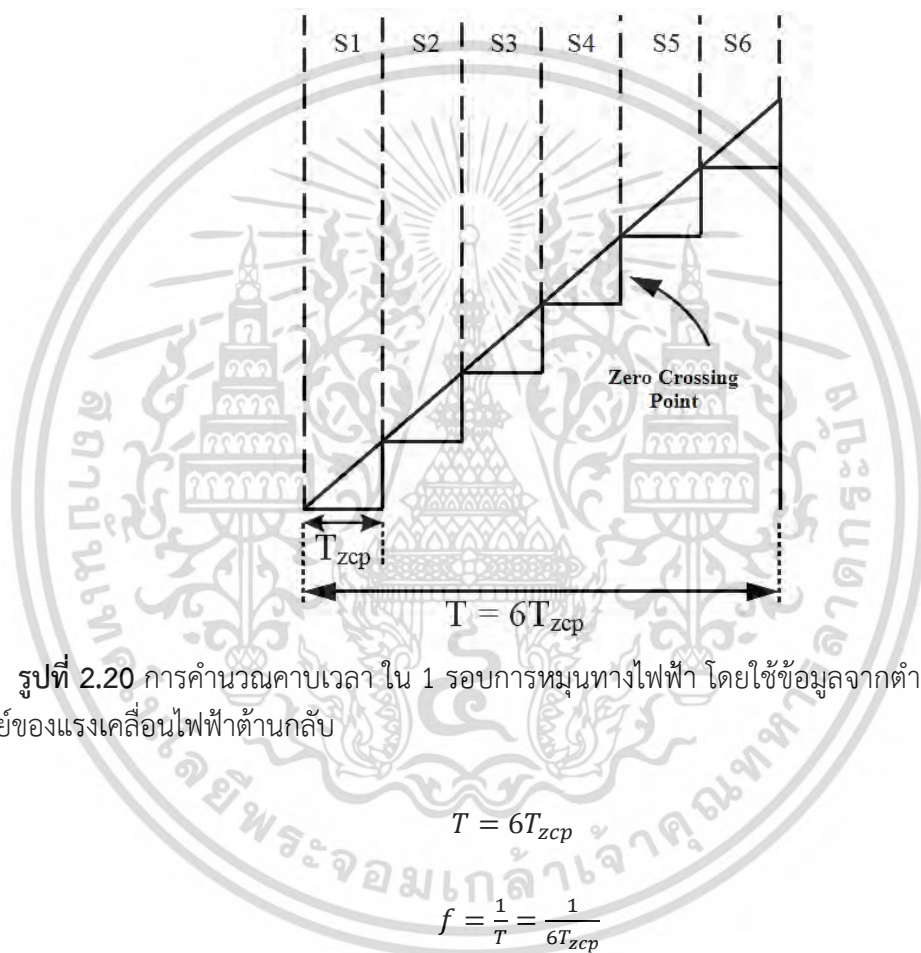
1) ลำดับแรกทำการบังคับโรเตอร์ให้อยู่ตำแหน่งเริ่มต้น โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ามอเตอร์ทั้งเฟสตามตำแหน่งเวกเตอร์แรงดัน (Voltage Vector) ที่ต้องการให้เป็นมุมเริ่มต้น เป็นช่วงเวลาหนึ่งเพื่อให้โรเตอร์วางตัวในตำแหน่งนั้น (alignment) [19]

2) หลังจากนั้นทำการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูบเปิด โดยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ด้วยการเพิ่มขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายตลอดสเตเตอร์และความถี่ เพื่อให้โรเตอร์เริ่มหมุนตามสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์จนสามารถชนะแรงเฉื่อยและความฝืดได้ส่งผลให้ความเร็วรอบมอเตอร์ค่อยๆเพิ่มขึ้น จนขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเพียงพอในการหาตำแหน่งจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับได้

3) ลำดับสุดท้ายทำการเปลี่ยนสถานะจากการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูบเปิดไปสู่การขับเคลื่อนแบบไรต์ตัวตรวจจับตำแหน่ง

### 3. การคำนวณความเร็วรอบมอเตอร์จากจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ [22]

การคำนวณความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้ตำแหน่งจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับสามารถคำนวณได้โดยการหาคาบเวลาระหว่างจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับแต่ละจุด ซึ่งใน 1 รอบการหมุนทางไฟฟ้า มีจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับทั้งหมด 6 จุด ซึ่งแต่ละจุดห่างกัน 60 องศาไฟฟ้า ดังนั้นคาบเวลาใน 1 รอบการหมุนทางไฟฟ้า ( $T$ ) เท่ากับ 6 เท่าของคาบเวลาระหว่างจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับแต่ละจุด ( $T_{zcp}$ ) ดังสมการ (2.18) หลังจากนั้นนำคาบเวลานี้มาคำนวณหาความถี่มอเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์ได้จากสมการ (2.18) และสมการ (2.19) ตามลำดับ



รูปที่ 2.20 การคำนวณคาบเวลาใน 1 รอบการหมุนทางไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลจากตำแหน่งจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ

$$T = 6T_{zcp} \quad (2.20)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{6T_{zcp}} \quad (2.21)$$

$$N = \frac{120f}{P} = \frac{120}{P6T_{zcp}} \quad (2.22)$$

โดยที่  $T_{zcp}$  คือ คาบเวลาระหว่างจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับแต่ละจุด (sec)

$N$  คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)

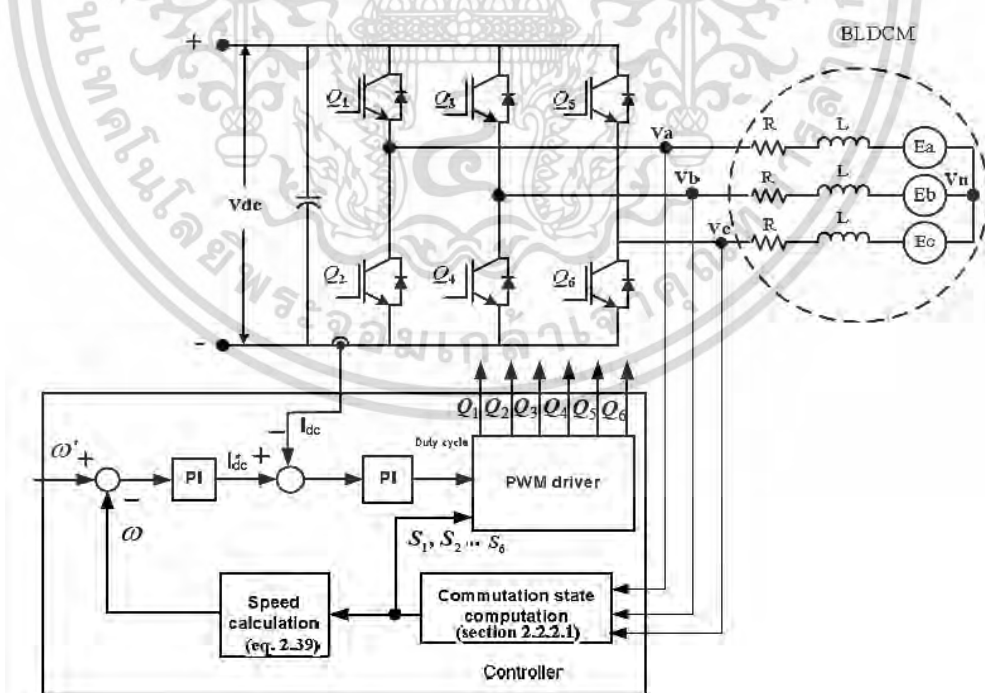
$P$  คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ [11]

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ถูกนำมาใช้ในงานที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้แม่นยำในขณะที่โหลดมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง โดยระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์มีลูกควบคุมด้วยกัน 2 ลูก คือ 1) ลูกควบคุมกระแสไฟฟ้า (Current Control) ทำหน้าที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ให้เท่ากับกระแสไฟฟ้าอ้างอิง และป้องกันไม่ให้อายุกระแสไฟฟ้าเกินพิกัดมอเตอร์ 2) ลูกควบคุมความเร็วรอบ (Speed Control) ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้เท่ากับความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิง

วิธีการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ทำได้โดยการวัดแรงดันไฟฟ้า  $V_a$ ,  $V_b$  และ  $V_c$  แล้วส่งค่าแรงดันไฟฟ้าเหล่านี้ให้กับตัวควบคุม (Controller) เพื่อคำนวณหาจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับและจุดคอมมิวเตชันกระแสไฟฟ้า (Commutation state computation) และกำหนดการเปิด-ปิด สวิตช์  $Q_1$   $Q_6$  ของวงจรอินเวอร์เตอร์ จากนั้นนำข้อมูลตำแหน่งจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับไปคำนวณหาความเร็วรอบมอเตอร์ย้อนกลับ (Speed calculation) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิง โดยผลต่างระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ย้อนกลับกับความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิง ถูกใช้เป็นสัญญาณอินพุตให้กับตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัล (PI controller) ซึ่งทำหน้าที่ปรับค่าตัวตั้งเซตของสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชัน เพื่อควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ และกระแสไฟฟ้าให้ได้ตามที่ต้องการ ดังแสดงรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

## 2.4 ระบบควบคุม (Controller)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัลและอนุพันธ์ (PI Controller) [24] ซึ่งเป็นตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่นิยมใช้งานอย่างกว้างขวาง ซึ่งประกอบด้วย 3 เทอม คือ สัดส่วน (Proportional ; P) และอินทิกรัล (Integral ; I) ซึ่งตัวควบคุมนี้รับสัญญาณความผิดพลาดระหว่างค่าอ้างอิง กับค่าจริงที่วัดได้ ( $e(t)$ ) เข้ามาเป็นสัญญาณอินพุต โดยตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณควบคุมที่ส่งให้ตัวระบบ ( $u(t)$ ) โดยสมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัลและอนุพันธ์ในโดเมนเวลาต่อเนื่อง (Continuous time) แสดงดังสมการที่ 2.23

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.23)$$

เมื่อนำตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัลและอนุพันธ์ไปประยุกต์ใช้กับการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital signal processing) จำเป็นต้องมีการแปลงสมการจากโดเมนเวลาต่อเนื่องให้อยู่ในโดเมนเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete time) ซึ่งเขียนดังสมการ (2.24)

$$u(k) = K_p \left( e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_d}{T} (e(k) - e(k-1)) \right) \quad (2.24)$$

จากสมการ 2.24 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัลและอนุพันธ์ สามารถอธิบายในเทอมของเวลาได้ดังนี้คือ

เทอมสัดส่วน (P) ขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดปัจจุบัน โดยนำค่าความผิดพลาดมาคูณกับอัตราขยายเชิงสัดส่วน เพื่อขยายสัญญาณควบคุมและลดค่าความผิดพลาดของระบบ

เทอมอินทิกรัล (I) ขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดสะสมในอดีตถึงปัจจุบันโดยถูกนำมาใช้เพื่อลดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว

ในทางปฏิบัติการใช้ตัวควบคุมแบบ PI [25] ขึ้นอยู่กับระบบที่ต้องการควบคุม สำหรับการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์นิยมใช้ ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัล (PI Controller) มากกว่า เพราะเทอมอนุพันธ์ไวต่อสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดค่าสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งอาจทำให้ระบบไม่เสถียรภาพได้ ถึงแม้ว่าเทอมอนุพันธ์สามารถลดผลกระทบของค่าพุ่งเกิน (Over shoot) ได้ก็ตาม

โดยตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัล จำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์  $K_p$ ,  $T_i$  ที่เหมาะสมกับระบบ ซึ่งในทางปฏิบัตินิยมหาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ด้วยวิธี Trial and Error [25] โดยกำหนดให้ในส่วนของเทอมอินทิกรัล มีค่าเป็นศูนย์ก่อน แล้วปรับเพิ่ม ค่า  $K_p$  จนกระทั่งผลตอบสนองของระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) โดยมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (Steady-State Error;  $E_{ss}$ ) น้อยที่สุดจากนั้นจึงปรับค่าเทอมอินทิกรัล เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว และสภาวะพลวัต จนกว่าผลการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ

## 2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

โดยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการมีการศึกษา และวิจัยโครงสร้างของระบบควบคุมและจัดการระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบแบตเตอรี่/ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า HESS ในรูปแบบต่างๆ ซึ่ง โครงสร้างของ HESS ที่ได้มีการศึกษา และวิจัยมากที่สุดคือโครงสร้าง HESS แบบ SC/Battery [1]-[13] โดยลักษณะโครงสร้าง HESS แบบ SC/Battery แบบทั่วไป แบตเตอรี่จะถูกเชื่อมต่อโดยตรงกับดีซีบัส (dc-bus) โดยที่ ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง (Bidirectional DC/DC converter) ใช้ในการควบคุมการจ่ายพลังงานระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการความจำเป็นในการใช้อุปกรณ์กักเก็บพลังงานทั้งสองชนิด รวมทั้งดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางกำลังสูง [8]-[15] ทำให้ต้นทุนระบบรวมทั้งหมดของโครงสร้าง HESS แบบ SC/Battery แบบทั่วไปมีค่าสูง [16]-[20] จึงไม่สามารถตอบสนองด้านต้นทุน-ประสิทธิภาพได้เท่าที่ควร (Not cost-effective) [19]-[20] นอกจากนี้การใช้ ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางกำลังสูง เพื่อความเหมาะสมในการใช้ควบคุมและรักษาระดับกำลังงาน (Power level) ของ SC เพื่อประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน SC ทำให้ประสิทธิภาพของการคืนกำลังขณะเบรกมีค่าลดลง เนื่องจากการสูญเสียกำลังงาน (power dissipation) [18]-[24] จากกระบวนการแปลงพลังงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในระบบ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษา ออกแบบ และประเมินสมรรถนะ ระบบควบคุมและจัดการระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบแบตเตอรี่/ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage Management System : HESMS) โครงสร้างแบบ SC/Battery โดยระบบ HESMS โครงสร้างแบบ SC/Battery ที่นำเสนอประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุยิ่งยวด, แบตเตอรี่, วงจรลดทอนระดับแรงดัน แบบดีซี-ดีซี ชนิดทิศทางเดียว (Unidirectional dc-dc buck converter) และ ไดโอดคืนกำลัง (Regenerative diode) นอกจากนี้ กลไกการควบคุมระบบคืนกำลังขณะเบรก (Regenerative braking system : RBS control mechanism) ได้ถูกพัฒนาไปพร้อมกันในงานวิจัยนี้ เมื่อเข้าสู่โหมดชะลอ หรือเบรก แรงดันดีซีลิงค์ (DC-link voltage) จะเข้าสู่สถานะบัส โดยรูปแบบการสวิตซ์ซึ่งที่เหมาะสม (Appropriate switching algorithm) ดังนั้นไดโอดจะอยู่ในสถานะไบอัสไปข้างหน้า (Forward biased) ซึ่งช่วยให้พลังงานจากการเบรกจะสามารถถูกถ่ายโอนกลับมาเก็บไว้ที่ SC ได้ โดยไม่ต้องอาศัยการใช่วงจรทระดับแรงดันเพิ่ม ซึ่งแรงดันดีซีลิงค์สามารถปรับได้ผ่านการเปลี่ยนแปลงดิวตี้ไซเคิล (Duty-cycle) ของการมอดูเลตสัญญาณตามความกว้างพัลส์ (Pulse width modulation : PWM) ที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ ด้วยเหตุนี้ เมื่อ SC ถูกเติมประจุจากการเบรกจนเข้าใกล้ค่าสูงสุดในการอัดประจุของ SC ระบบจะทำการปรับให้พลังงานจากการเบรก (Braking energy) เปลี่ยนมาเก็บในแบตเตอรี่แทนได้ โดยใช้ switching scheme ของอินเวอร์เตอร์ จากวิธีการที่นำเสนอ สามารถปรับปรุงค่าประสิทธิภาพของการคืนกำลังขณะเบรก (Regenerative braking efficiency) ให้เพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากการลดพิภักจำนวนการใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังลง จึงถือได้ว่าจุดเด่นของวิทยานิพนธ์นี้ นอกจากนี้ โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks : ANN) [25]-[27] และการควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (Proportional-integral-derivative : PID controller) ได้ถูกนำมาปรับใช้เพื่อวัตถุประสงค์การกระจายแรงเบรก (Braking force distribution) ของยานยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบ และวิเคราะห์หลักการทำงานของระบบกักเก็บกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery

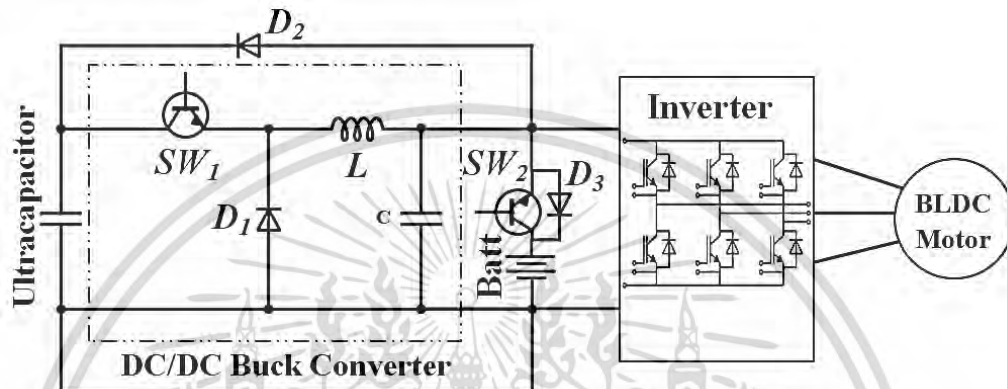
ในบทนี้ จะกล่าวถึงการการออกแบบ และวิเคราะห์หลักการทำงานของระบบกักเก็บกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเริ่มจากการศึกษาออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงานสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยเน้นลักษณะสมบัติทางไฟตรงของตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิด Electrical Double Layer Capacitor (EDLC) และแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน จากนั้นทำการออกแบบระบบ HESS โครงสร้างแบบ SC/Battery ที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุยิ่งยวด, แบตเตอรี่, วงจรลดทอนระดับแรงดัน แบบดีซี-ดีซี ชนิดทิศทางเดียว (Unidirectional dc-dc buck converter) และ ไดโอดคืนกำลัง (Regenerative diode) ซึ่งในการวิเคราะห์การทำงานของระบบประกอบไปด้วย 4 โหมดการทำงาน รวมไปถึงกลไกการควบคุมระบบคืนกำลังขณะเบรก (Regenerative braking system : RBS control mechanism) และทำการทดสอบตัวควบคุมพีไอ (PID controller) ด้วยสัญญาณอินพุตรูปพัลส์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณบนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks : ANN) เพื่อเป็นการตรวจสอบการทำงานของส่วนควบคุมก่อนนำไปใช้งานในระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า

### 3.1 โครงสร้าง และโหมดการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอ

ระบบ HESS โครงสร้างแบบ SC/Battery ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุยิ่งยวด, แบตเตอรี่, วงจรลดทอนระดับแรงดัน/บัสคอนเวอร์เตอร์ แบบดีซี-ดีซี ชนิดทิศทางเดียว (Unidirectional dc-dc buck converter) และ ไดโอดคืนกำลัง (Regenerative diode) โดยที่  $V_{Batt} = V_{DC} \leq V_{SC}$  ซึ่ง  $V_{Batt}$  คือแรงดันของแบตเตอรี่,  $V_{DC}$  คือแรงดันของดีซีลิงค์, และ  $V_{SC}$  คือแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยที่การเชื่อมต่อของระบบ แรงดันที่ต่ำกว่าของแบตเตอรี่จะถูกต่อตรงเข้ากับดีซีลิงค์ ด้วยเหตุนี้ดีซีลิงค์ จะสามารถอยู่ในสภาวะคงที่ แรงดันที่สูงกว่าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะถูกเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ผ่านวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบดีซี-ดีซี ในขณะที่แบตเตอรี่เชื่อมต่อบนขานกับตัวเก็บประจุยิ่งยวดผ่านไดโอดคืนกำลัง แสดงดังรูปที่ 3.1 และระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery จะใช้เพื่อจ่ายพลังงานให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor: BLDC Motor) ผ่านอินเวอร์เตอร์สามเฟส (three-phase inverter) [15] ในโหมดปกติของการขับเคลื่อน แบตเตอรี่จะเป็นอุปกรณ์ที่ถูกใช้เพื่อจ่ายพลังงานให้มอเตอร์เพียงอย่างเดียวในโหมดต่อมาคือสภาวะที่ยานยนต์ไฟฟ้าต้องการใช้กำลังงานสูงสุด เช่น การเร่งเพื่อแซง หรือขับขึ้นพื้นที่ลาดชัน ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะทำการจ่ายพลังงานเพื่อเสริมกับแบตเตอรี่ในการให้พลังงานแก่มอเตอร์ผ่านวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ โดยที่คอนเวอร์เตอร์จะควบคุมและรักษาระดับแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้สูงกว่าระดับแรงดันของแบตเตอรี่ ด้วยเหตุนี้ไดโอดคืนกำลัง  $D_2$  จะยังคงอยู่ในสภาวะไบอัสกลับ (reverse biased) เมื่อเข้าสู่โหมดการเบรก มอเตอร์ BLDC จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(generator) ด้วยเหตุนี้การใช้กระบวนการสวิตชิงของมอเตอร์เฟสในอินเวอร์เตอร์สามเฟส ร่วมกับหลักการเหนี่ยวนำของมอเตอร์ และรูปแบบการสวิตชิงที่เหมาะสม (Appropriate switching algorithm) ทำให้แรงดันดีซีลิงค์ด้านกลับสามารถหยุดได้ ในระหว่างกระบวนการกู้คืนกำลังขณะเบรก แรงดันดีซีลิงค์อยู่ในสภาวะบวส ไดโอดคินกำลังอยู่ในสภาวะไบอัสตรง (forward biased) ด้วยเหตุนี้พลังงานจากการเบรกจะสามารถถ่ายโอนมากักเก็บไว้ในตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้

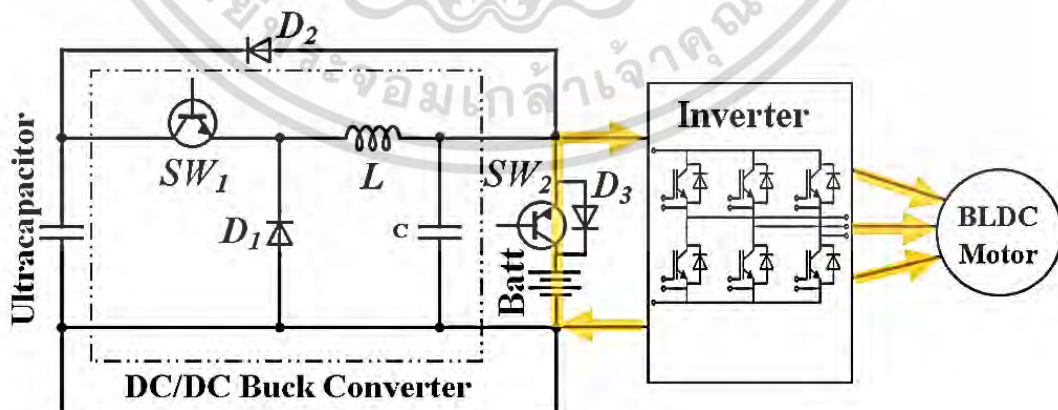
ความต้องการกำลังงานของมอเตอร์ ( $P_{motor}$ ) ขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทาง ดังนั้นการทำงานของระบบ HESS ที่นำเสนอสามารถแบ่งเป็น 4 โหมดการทำงาน ซึ่งสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 โครงสร้างระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอ

### 3.1.1 โหมดปกติ (normal mode)

ในโหมดการขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้า กำลังงานของมอเตอร์  $P_{motor}$  จะมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่า ค่ากำลังงานของแบตเตอรี่  $P_{Batt, rated}$  การไหลเวียนของพลังงานในโหมดปกติแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยในโหมดนี้ เนื่องจากแรงดัน SC มีค่าสูงกว่าแรงดันของแบตเตอรี่ ในกรณีนี้ ไดโอดคินกำลัง  $D_2$  อยู่ในสภาวะไบอัสกลับ นอกจากนี้วงจรเบรกคอนเวอร์เตอร์จะอยู่ในสภาวะปิดการใช้งาน (turned off) และ SC จะยังไม่ถูกใช้งาน ในเงื่อนไขนี้แบตเตอรี่จะเป็นอุปกรณ์ที่ถูกใช้เพื่อจ่ายพลังงานให้มอเตอร์เพียงอุปกรณ์อย่างเดียว

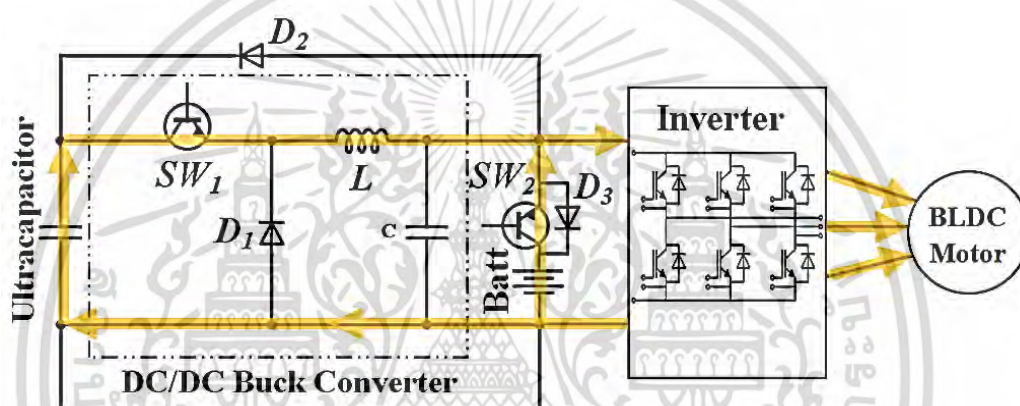


รูปที่ 3.2 การไหลของพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอในโหมดปกติ

### 3.1.2 โหมดการเร่ง (acceleration mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาวะที่ยานยนต์ไฟฟ้าต้องการใช้กำลังงานสูงสุด เช่น การเร่งเพื่อแซง หรือขับขึ้นพื้นที่ลาดชัน กำลังงานของมอเตอร์  $P_{motor}$  จะมีค่ามากกว่า เรตกำลังงานของแบตเตอรี่  $P_{Batt, rated}$  ภายใต้สถานการณ์นี้ แบตเตอรี่สามารถเข้าสู่สภาวะรอบการคายประจุแบบลึก (deep discharge cycles) ซึ่งส่งผลให้สมรรถนะในการขับขี่ของยานยนต์ลดลง ในเงื่อนไขนี้ ถ้าแรงดันของ SC มีค่ามากกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มต่ำสุด (minimum threshold) ของ SC ( $V_{SC} \geq V_{SC, min}$ ) [10] ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะทำการจ่ายพลังงานเพื่อเสริมกับแบตเตอรี่ในการให้พลังงานแก่มอเตอร์ผ่านวงจรบังคับคอนเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.3 ในกรณีถ้าแรงดันของ SC ลดลงต่ำกว่าแรงดันของแบตเตอรี่ ทำให้ในเงื่อนไขนี้ แบตเตอรี่จะเกิดการชาร์จเข้า SC โดยไม่จำเป็น ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงเครียดให้กับแบตเตอรี่ได้ ดังนั้นตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะรักษาระดับเพื่อเสริมแบตเตอรี่จนกระทั่ง แรงดันของ SC มีค่ามากกว่าแรงดันของแบตเตอรี่เท่านั้น ซึ่งสามารถปรับแต่งได้จากระบบควบคุม โดยในเงื่อนไขนี้  $D_2$  จะอยู่ในสภาวะไบอัสกลับ และพลังงานจากทั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่จะถูกใช้ในการจ่ายให้กับมอเตอร์



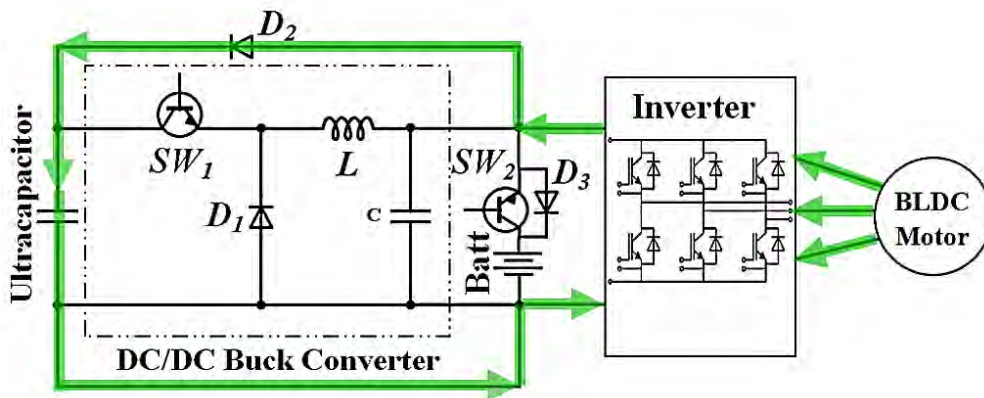
รูปที่ 3.3 การไหลของพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอนิโหมตเร่ง

### 3.1.3 โหมตการคืนกำลังขณะเบรกด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด (SC-enabled regenerative braking mode) [17], [19]

เนื่องจากวิธีการในการปรับใช้แรงดันของ SC และแบตเตอรี่ ในโหมตการคืนกำลังขณะเบรก ซึ่งแรงดันดีซีลิงค์จำเป็นต้องอยู่ในสภาวะบวส ดังนั้น  $D_2$  จะเข้าสู่สภาวะไบอัสตรง (forward biased) และพลังงานจากการเบรกจะสามารถถ่ายโอนมากักเก็บไว้ที่ SC ได้ โดยการใช้กระบวนการสวิตซ์ของมอสเฟตในอินเวอร์เตอร์สามเฟส ร่วมกับหลักการเหนี่ยวนำของมอเตอร์ และรูปแบบการสวิตซ์ซึ่งที่เหมาะสม (Appropriate switching algorithm) ของอินเวอร์เตอร์สามเฟส ทำให้แรงดันดีซีลิงค์ด้านกลับสามารถบวสได้

มอสเฟตด้าน high side ของ Full-Bridge อยู่ในสภาวะปิด และมอสเฟตฝั่ง low side จะทำการมอดูเลตสัญญาณตามความกว้างพัลส์ (pulse width modulated) [22] ซึ่งกระบวนการสวิตซ์จะขอแนะนำเสนอในหัวข้อถัดไป และข้อควรคำนึงในเงื่อนไขการทำงานในโหมตนี้คือ ระบบจะเปิดใช้งานในกรณีที่แรงดันของ SC มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันขีดเริ่มค่ามากที่สุดของ SC เท่านั้น  $V_{SC} \leq V_{SC, max}$  โดยที่  $V_{SC, max}$  คือแรงดันค่าจำกัดของ ซึ่งได้ใช้พิจารณาการตั้งไว้เพื่อความปลอดภัยในการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

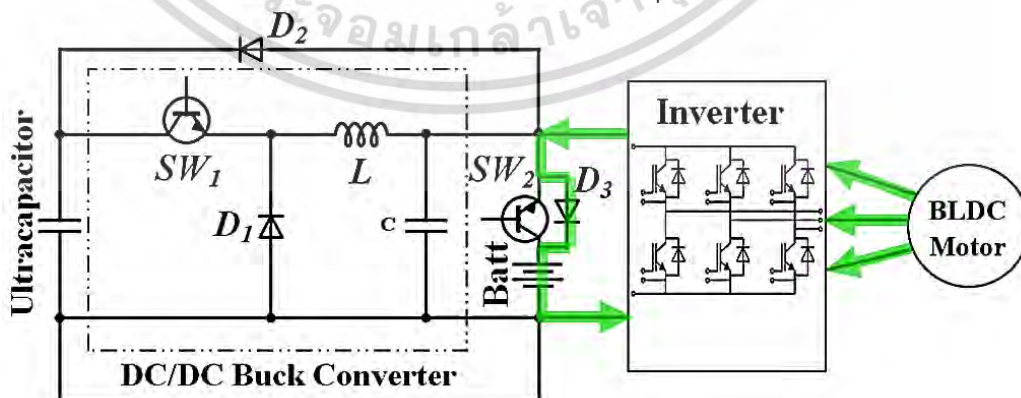


รูปที่ 3.4 การไหลของพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอในโหมดคั่นกำลังขณะเบรกด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด HSC-enabled regenerative braking mode

### 3.1.4 โหมดการคั่นกำลังขณะเบรกด้วยแบตเตอรี่ (Battery-enabled regenerative braking mode)

ในโหมดการคั่นกำลังขณะเบรกด้วยแบตเตอรี่ แรงดันของ SC มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันขีดเริ่มค่ามากที่สุดของ SC ( $V_{SC} \leq V_{SC,max}$ ) พลังงานจากการเบรกจะไม่สามารถถ่ายโอนเข้าสู่ SC ได้อีก ด้วยเหตุนี้ การคั่นกำลังขณะเบรกจะถูกเปลี่ยนมาใช้งานโดยแบตเตอรี่ ซึ่งหลักการทำงานในโหมดนี้จะคล้ายกับโหมดก่อนหน้า นั่นคือ แรงดันดีซีลิงค์จะสามารถบูสต์ จากนั้นพลังงานจากการเบรกจะถูกถ่ายโอนมาเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ผ่าน  $D_3$

เมื่อแรงดันดีซีลิงค์บูสต์ เพื่อเข้าสู่โหมดการคั่นกำลังขณะเบรกด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด ทั้ง  $D_2$  และ  $D_3$  จะอยู่ในสภาวะไบอัสตรง ในการพิจารณาไดนามิกของขั้นตอนการคั่นกำลังขณะเบรกด้วย SC และแบตเตอรี่นั้น สัดส่วนการสนับสนุนการกักเก็บพลังงานโดย SC มีค่ามากกว่าการกักเก็บพลังงานโดยแบตเตอรี่อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งในความเป็นจริงค่าคงที่ของเวลา (time constant) ของขั้นตอนการเบรกมีค่าใกล้เคียงกับค่าคงที่ของเวลาของ SC และมีค่าน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับค่าคงที่ของเวลาของแบตเตอรี่ นอกจากนี้ เนื่องจาก SC มีค่า ESR ที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ ดังนั้นพลังงานจากการเบรกส่วนมากจะสามารถถูกกักเก็บโดย SC ด้วยเหตุนี้การไบอัสตรงของ  $D_3$  จึงไม่ส่งผล และไม่ถูกนำมาพิจารณาในโหมดการคั่นกำลังขณะเบรกด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด



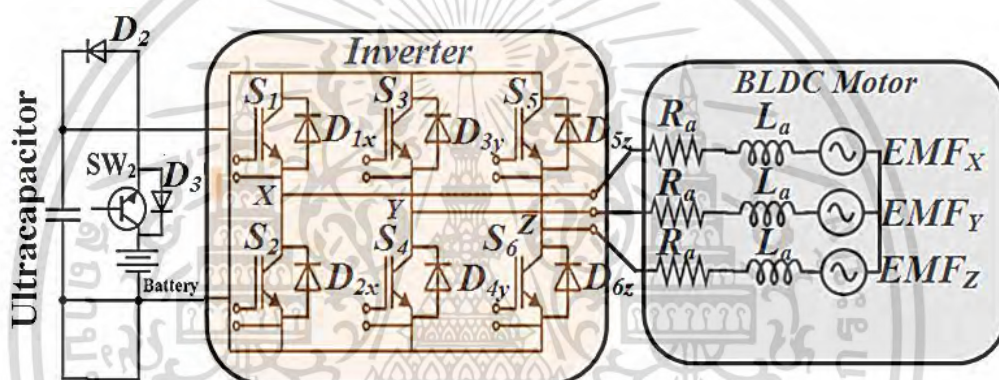
รูปที่ 3.5 การไหลของพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอในโหมดคั่นกำลังขณะเบรกด้วยแบตเตอรี่ Battery-enabled regenerative braking mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การวิเคราะห์ระบบกักเก็บกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ

### 3.2.1 การคืนพลังงานโดยใช้อินเวอร์เตอร์

วงจรมูลของอินเวอร์เตอร์, มอเตอร์ BLDC และ HESS ที่นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยที่  $R_o$  และ  $L_o$  คือค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ ซึ่ง  $EMF_x$ ,  $EMF_y$  and  $EMF_z$  คือ อาร์เมเจอร์ Back-EMFs ของเฟส X, Y และ Z ตามลำดับ เนื่องจากดีซีฟลูตี่ซิปคคอนเวอร์เตอร์ไม่ถูกเปิดใช้งานในโหมดคืนกำลังขณะเบรก จึงไม่แสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งในระหว่างโหมดคืนกำลังขณะเบรก มอเตอร์ BLDC จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และพลังงานงานจากการเบรกของยานยนต์ไฟฟ้าสามารถถ่ายโอนมาเก็บไว้ที่อุปกรณ์กักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์ได้โดยกระแสที่ไหลย้อนกลับ และเพื่อให้บรรลุฟังก์ชันการทำงานนี้ แรงดันดีซีลิงค์จะอยู่ในสภาวะบูสต์ ดังนั้นเมื่อ  $D_2$  และ/หรือ  $D_3$  จะเข้าสู่สภาวะไบอัสตรง และพลังงานก็จะสามารถถ่ายโอนมากักเก็บที่ HESS ได้นอกจากนี้ จากรูปที่ 3.6 สามารถใช้อธิบายการรูปแบบการสวิตซ์ซึ่งที่เหมาะสมของอินเวอร์เตอร์ได้

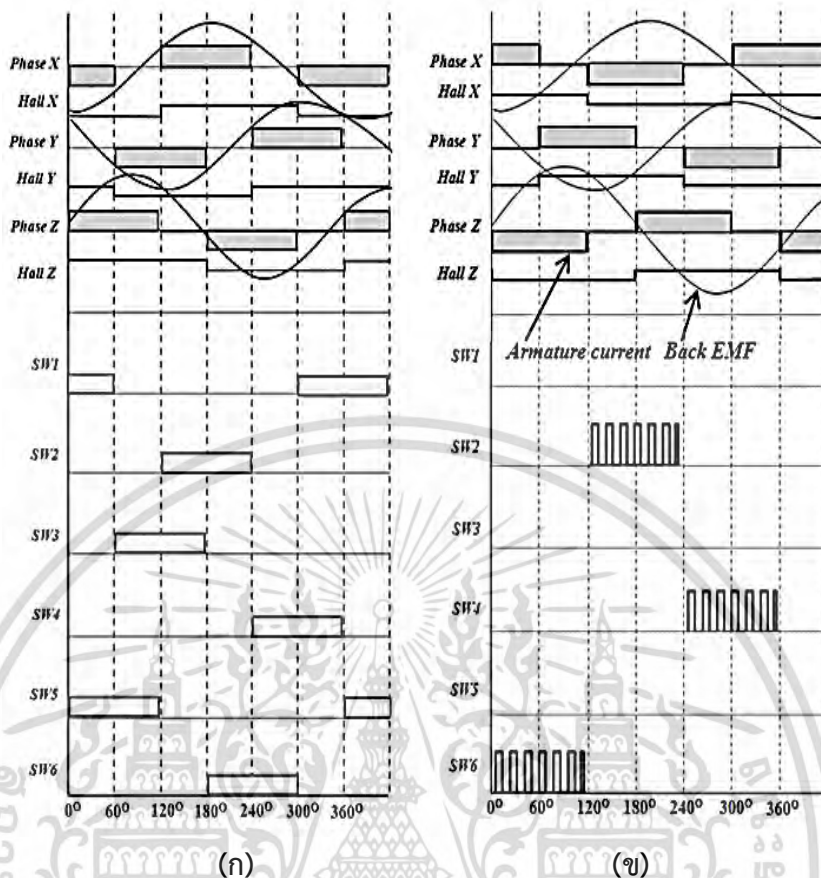


รูปที่ 3.6 วงจรมูลของอินเวอร์เตอร์สามเฟส มอเตอร์ BLDC และระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอ

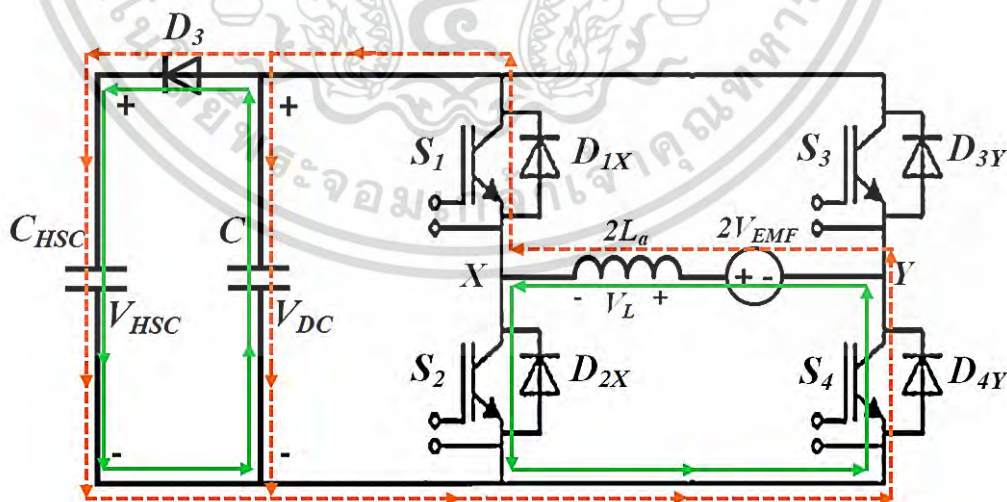
ในสภาวะปกติ สวิตซ์ทั้ง 6 ตัวในวงจรอินเวอร์เตอร์ปรับตามตำแหน่งของโรเตอร์ ที่ได้รับจาก Hall Effect sensors ในโหมดคืนกำลังขณะเบรก สวิตซ์ที่ตำแหน่ง high side ของ Full bridge อยู่ในสภาวะปิดใช้งาน และด้าน low side ของมอเตอร์ถูกควบคุมโดยสัญญาณ PWM ด้วยเทคนิคการสวิตซ์ [23] นอกจากนี้ three-phase Back-EMFs, three-phase armature currents, Hall Effect signals และรูปแบบการสวิตซ์ (switching patterns) แสดงดังรูปที่ 3.7 จากรูป ในโหมดคืนกำลังขณะเบรก จะมีสวิตซ์ทั้ง 6 ตัว ที่คอมมิวเตชันในช่วงเวลา และมีเพียงหนึ่งตัวของอินเวอร์เตอร์ที่ถูกเปิด และปิด ในระหว่างแต่ละช่วงเวลา โดยที่วงจรมูลของการคอมมิวเตชันใน 1 ช่วงเวลา ( $120^\circ - 180^\circ$ ) โหมดการคืนกำลังขณะเบรกด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด (SC-enabled regenerative braking mode) แสดงดังรูปที่ 3.7 สมมติว่า  $S_2$  เปิดในช่วง time interval  $T_{on}$  กระแสที่มีค่าสูงขึ้นในย่าน linear ใน  $2L_s$  ถึงค่าสูงสุด  $I_p = (V_{emf} \times t_{on}) / L$  ดังนั้นปริมาณพลังงานที่ตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็น

$$E = \frac{1}{2}(2L_a)I_{Peak}^2 = L_a I_{Peak}^2 \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 รูปแบบคลื่นสัญญาณของ Back-EMFs, armature currents, Hall Effect sensors, และ the switching template (ก) รูปแบบคลื่นสัญญาณในโหมดปกติ (ข) รูปแบบคลื่นสัญญาณในโหมดคืบกำลังขณะเบรก



รูปที่ 3.8 การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ในโหมดคืบกำลังขณะเบรกที่แต่ละช่วงเวลา

ในขณะที่ S2 อยู่ในสภาวะเปิดทำงาน โหลดด้านเอาต์พุตจะได้รับพลังงานผ่านตัวเก็บประจุ ซึ่งถูกเลือกให้มีขนาดใหญ่มากพอที่สามารถให้พลังงานแก่เอาต์พุตในช่วงที่ time interval  $T_{on}$  ที่แรงดันตก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เอาต์พุตเห็นข้อผิดพลาดในการพิมพ์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลง เมื่อ S2 อยู่ในสภาวะปิดทำงาน  $D_{1x}$  อยู่ในสภาวะไบอัสตรง และพลังงานจากทั้ง Back-EMFs และพลังงานที่เก็บในตัวเหนี่ยวนำจะถูกใช้ในการถ่ายโอนพลังงานให้ SC ภายใต้เงื่อนไขนี้ แรงดันฝั่งเอาต์พุตจะถูกปรับโดยการควบคุม  $S_2$  ตามเวลาในวงจรถ่วงกลับเชิงลบ (negative feedback loop) [12] ผ่านส่วนควบคุมพีไอ ถ้าในกรณีที่พลังงานทั้งหมดจากสมการที่ (1) สามารถถ่ายโอนไปที่เอาต์พุตในแต่ละช่วงคาบเวลา ( $T$ ) (สมมติให้ประสิทธิภาพการแปลงเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเหนี่ยวนำ ( $2L_s$ ) ไปโหลดภาระสามารถกำหนดได้เป็น

$$P_{Ind} = \frac{L_a \times I_{Peak}^2}{T} \quad (3.2)$$

นอกจากนี้ปริมาณของกำลังงาน PDC ที่ถ่ายโอนจากตัวเหนี่ยวนำ ( $2L_s$ ) ไปเอาต์พุต สามารถกำหนดได้จากสมการที่

$$P_{DC} = 2V_{EMF} \times \frac{I_{Peak}}{2} \times \frac{T_d}{T} \quad (3.3)$$

โดยที่  $T_r$  คือ time interval ที่ซึ่งกระแสในตัวเหนี่ยวนำจะลดลงเข้าสู่ค่าศูนย์ ด้วยเหตุนี้พลังงานรวมทั้งหมดที่ถูกส่งถ่ายไปที่โหลดภาระสามารถคำนวณได้จากสมการที่

$$P_{Total} = P_{Ind} + P_{DC} = \left( \frac{L_a \times I_{Peak}^2}{T} + 2V_{EMF} \right) \times \frac{I_{Peak}}{2} \times \frac{T_d}{T} \quad (3.4)$$

เมื่อแทน  $IP = V_{emf} \times ton LS$ , สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$P_{Total} = \frac{V_{EMF}^2 \times ton}{T \times L_a} \times (T_{on} + T_d) \quad (3.5)$$

โดยสมมติฐานว่าวงจรทำงานที่สภาวะไม่ต่อเนื่อง และด้วยเหตุนี้  $t_{on} + t_r = mT$  โดยที่  $m$  คือค่าฟังก์ชันที่น้อยกว่า 1 ดังนั้นจากสมการที่ (3.5) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$P_{Total} = \frac{V_{EMF}^2 \times T_{on}}{T \times L_a} \times (u + T) \quad (3.6)$$

สำหรับแรงดันเอาต์พุต  $V_{dc}$ , สามารถเขียนได้เป็น

$$P_{Total} = \frac{V_{EMF}^2 \times T_{on}}{T \times L_a} \times (u + T) = \frac{V_{DC}^2}{R} \quad (3.7)$$

โดยที่  $R$  คือค่าความต้านทานด้านเอาต์พุต ซึ่งอัตราส่วนการแปลงพลังงานสามารถเขียนได้จากสมการที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_{DC}}{V_{EMF}} = \sqrt{\frac{R \times T_{on} \times u}{L_a}} \quad (3.8)$$

### 3.3 การวิเคราะห์การสูญเสียของระบบ (Analysis of the system losses) [8]

ในการวิจัยนี้ การสูญเสียที่เกิดจากการนำ และการสวิตช์ (conduction losses และ switching losses) ของดีซี-ดีซีบัคคอนเวอร์เตอร์ได้ถูกนำมาพิจารณาเพื่อเปรียบเทียบการสูญเสียรวมของระบบที่นำเสนอ เทียบกับระบบกักเก็บพลังงานโครงแบบทั่วไป โดยที่การสูญเสียที่เกิดจากการนำ และการสวิตช์ ของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สามารถคำนวณได้จาก

$$P_{on,H} = I_{out}^2 \times R_{on,H} \times \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (3.9)$$

การสูญเสียที่เกิดจากการนำ (conduction losses) ของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ ของ low-side IGBT สามารถเขียนได้โดย

$$P_{on,L} = I_{out}^2 \times R_{on,L} \times \left(1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \quad (3.10)$$

โดยที่  $V_{in}$  คือแรงดันอินพุท ,  $V_{out}$  คือแรงดันเอาต์พุท  $R_{on,H}$  คือค่าความต้านทานด้าน high-side ของ IGBT  $R_{on,L}$  คือค่าความต้านทานด้าน low-side ของ IGBT

การสูญเสียที่เกิดจากการสวิตช์ (switching losses) ของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ สามารถหาได้จากสมการ

$$P_{sw,loss} = f_s \left( \frac{1}{2} V_C |I_L| (t_r + t_f) + \frac{1}{2} V_C^2 C_{oss} + Q_{charge} V_G + V_C Q_{rr} \right) \quad (3.11)$$

$I_L$  คือกระแสของตัวเหนี่ยวนำซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสของตัวเก็บประจุยิ่งยวด  $I_{sc}$ .  $C$  คือค่าความจุด้านเอาต์พุทของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ และ  $V_C$  คือแรงดันที่ตกคร่อม ความถี่สวิตช์ (The switching frequency  $f_s$ ) มีค่า 50 kHz  $t_r$  และ  $t_f$  คือช่วงขาขึ้น และขาลงของ IGBT ระหว่างช่วงเวลาการสวิตช์  $C_{oss}$  คือความจุไฟฟ้าด้านเอาต์พุทของ IGBT  $Q_{charge}$  คือเกตชาร์จ  $Q_{rr}$  คือ reverse recovery charge  $V_G$  คือแรงดันที่เกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่การสูญเสียแบบ reverse recovery ในตัวไดโอดสามารถเขียนได้จากสมการ

$$P_{Diode} = \frac{1}{2} \times V_{in} \times I_{rr} \times t_{rr} \times f_s \quad (3.12)$$

โดยที่  $I_{rr}$  คือกระแสค่าสูงสุดของตัวไดโอด reverse recovery  $t_{rr}$  คือเวลาของตัวไดโอด reverse recovery

จากการพิจารณาการสูญเสียทางไฟฟ้า (electrical losses) ของอินเวอร์เตอร์ และมอเตอร์ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$P_{Inv,Mot,loss} = P_{cons} + kP^2 \quad (3.13)$$

โดยที่  $P_{Inv,Mot,loss}$  คือการสูญเสียกำลังงานที่ระดับกำลังงาน ( $P$ )  $P_{cons}$  คือกำลังงานของการสูญเสียแบบคงที่ (power of constant losses)  $k$  คือค่าคงที่ [ $W^{-1}$ ] ซึ่ง  $k$  ได้มาจากค่าพารามิเตอร์  $P_{cons}$  ถูกกำหนดโดยการวิเคราะห์การสูญเสียของระบบของอินเวอร์เตอร์ และมอเตอร์ที่เป็นฟังก์ชันของกำลังงาน ดังนั้นกำลังงานระหว่างการเบรกสามารถคำนวณได้จาก

$$P_{brake} = \frac{\Delta E_{kit}}{t_{brake}} \quad (3.14)$$

โดยที่  $\Delta E_{kit}$  คือสัดส่วนพลังงานจลน์ที่แปลงไปสู่พลังงานไฟฟ้า  $t_{brake}$  คือการตั้งเวลาการเบรก

โดยผลรวมของการสูญเสียกำลังงานในระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ HESS ทั้งระบบได้มาจากผลรวมของการสูญเสียกำลังงานในดีซี-ดีซีบัคคอนเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์ มอเตอร์ในระหว่างการเบรกรวมถึงตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ [23]

$$P_{HESS,loss} = P_{on,H} + P_{on,L} + P_{sw,loss} + P_{Diode} + P_{Inv,Mot,loss} + P_{brake} + I_{UC}^2 R_{UC} + I_{batt}^2 \quad (3.15)$$

เมื่อได้ผลรวมของการสูญเสียกำลังงาน จะสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพโดยสมการที่ 1

$$\eta = \frac{V_{OUT} \times I_{OUT}}{(V_{OUT} \times I_{OUT}) + P_{HESS,loss}} \quad (3.16)$$

โดยที่  $V_{OUT}$  คือแรงดันเอาต์พุต  $I_{OUT}$  คือกระแสเอาต์พุต  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 แรงที่เป็นปัจจัยส่งผลในการขับเคลื่อนและการเบรก

ในงานวิจัยนี้ นำเสนอโมเดลแบบเรียบง่ายสำหรับพลังงานจลล์บนถนนสำหรับยานยนต์ (road vehicle kinematics) ที่ใช้เพื่อประเมินสภาพความต้องการแบบไดนามิกต่อการตอบสนองการยึดเกาะสำหรับระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งรูปแบบนี้แสดงถึงแรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนของยานยนต์ แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยทั่วไปแล้วแรงเหล่านี้สามารถจำแนกได้เป็น 4 ส่วนหลักๆ ซึ่งจะขอแนะนำดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 แรงต้านหรือแรงเสียดทานการหมุนของยางรถยนต์ (Rolling Resistance loss)

คือ การสูญเสียพลังงานบริเวณยางรถยนต์ ในขณะที่เคลื่อนที่ สามารถกำหนดได้จากสมการ

$$F_{Rr} = K_{Rr} \cdot m g \cos \theta \quad (3.14)$$

โดยที่  $K_r$  คือค่าสัมประสิทธิ์ แรงเสียดทานการหมุน,  $m$  คือน้ำหนักรวมของยานยนต์ (กก.),  $\theta$  คือมุมความชัน (องศา) และ  $g$  คือค่าคงที่ (gravitational constant:  $m/s^2$ ).

#### 3.4.2 แรงต้านของอากาศ (Aerodynamics resistance losses)

คือแรงที่อากาศต่อต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างกระแสลมกับตัวรถ ( $F_A$ ) แรงต้านของอากาศ สามารถกำหนดได้จากสมการ

$$F_A = \frac{1}{2} \rho C_d A_f v^2 \quad (3.15)$$

โดยที่  $\rho$  คือความหนาแน่นอากาศ (กก./เมตร<sup>3</sup>),  $C_d$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรูปทรงรถยนต์ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดการส่งผลของค่า Drag จากแอร์โรไดนามิกส์ ในทางทฤษฎีแล้ว มีค่า  $C_d$  เท่ากับ 1 แต่ความจริงแล้วจะมีผลกระทบบางอย่างของลมที่จะเพิ่มให้ค่าเป็น  $C_d$  เท่ากับ 1.2 รถยนต์ส่วนใหญ่จะมีค่า  $C_d$  ประมาณ 0.30,  $A_f$  พื้นที่ส่วนหน้าของตัวรถ ( $m^2$ ) และ  $v$  คือความเร็วของยานยนต์ ( $m/s^2$ )

#### 3.4.3 แรงจากความชันพื้นถนน (Road gradient force)

ในกรณีของการขับรถในถนนที่สูงชัน, แรงดึงดูดหรือแรงโน้มถ่วง จะส่งผลต่อพฤติกรรมของรถ ซึ่งแรงจากความชันพื้นถนนสามารถกำหนดได้จากสมการ

$$F_g = m g \sin \theta \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 แรงชั่วขณะ (Transient force: $F_T$ )

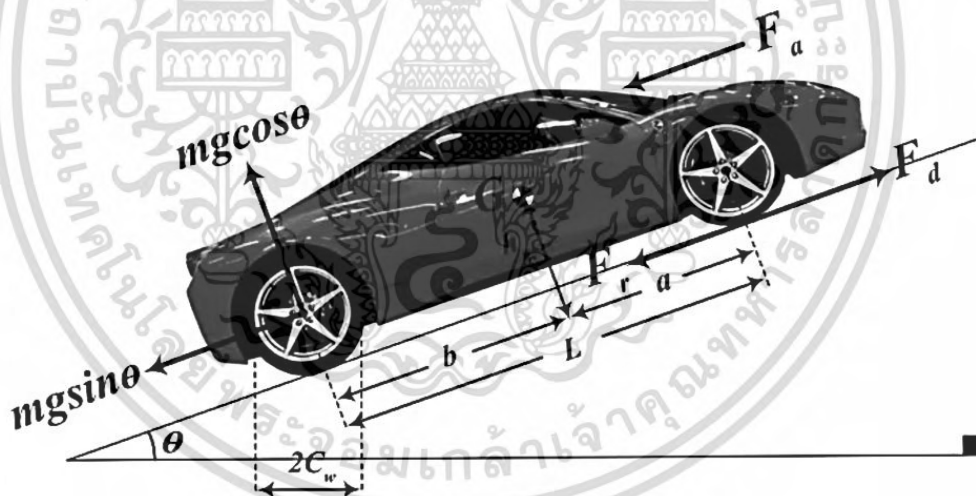
คือแรงที่ต้องการเพื่อการเร่ง และชะลอของยานยนต์ และสามารถเขียนได้เป็น  $m \frac{dv}{dt}$  โดยที่ความต้องการแรงทั้งหมดที่ส่วนล้อของยานยนต์สามารถเขียนได้เป็น

$$F_T = F_{Rr} + F_A + F_g + m \frac{dv}{dt} \quad (3.17)$$

เมื่อแทน (3.14)-(3.16) ใน (3.17), จะได้

$$F_T = K_{Rr}mg\cos\theta + \frac{1}{2}\rho C_d A_f v^2 + mg\sin\theta + m \frac{dv}{dt} \quad (3.18)$$

จากสมการที่ (3.18)  $F_T$  คือแรงที่จ่ายโดยมอเตอร์เพื่อเคลื่อนที่ยานยนต์ สมการที่ (3.18) สามารถใช้เพื่อหาแรงเบรกที่ต้องการใช้ในการหยุดรถในระยะทางที่กำหนดได้โดย drive cycle. ความเร่ง (acceleration) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลง (หรืออนุพันธ์เวลา) ของความเร็ว เป็นปริมาณเวกเตอร์ที่มีหน่วยเป็น ความยาว/เวลา<sup>2</sup> ในหน่วยเอสไอกำหนดให้หน่วยเป็น เมตร/วินาที<sup>2</sup> ความเร่งโน้มถ่วง (Gravitational acceleration) มีทิศเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก ความเร่งโน้มถ่วงที่ผิวโลกมีค่าแตกต่างกันตามตำแหน่งภูมิศาสตร์

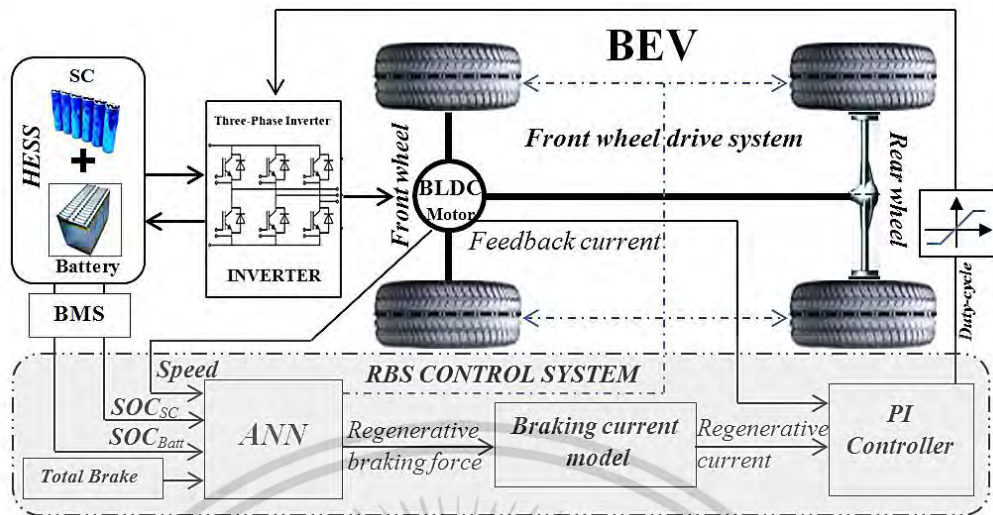


รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน [16]

### 3.5 การออกแบบการควบคุมของระบบกักเก็บกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ

โครงสร้างโดยรวมทั้งหมดของระบบกักเก็บกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.10 โดยในส่วนของระบบควบคุมที่นำเสนอประกอบไปด้วย การกระจายแรงเบรก (braking force distribution) , โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks : ANN), และ ตัวควบคุมพีไอ (PID controller) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของส่วนระบบควบคุมที่นำเสนอ ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 โครงสร้างของระบบควบคุมของระบบกู้คืนกำลังขณะเบรกที่นำเสน่อ

### 3.5.1 การกระจายแรงเบรก (Braking force distribution) [13]

ในขณะที่เข้าสู่โหมดเบรก พลังงานจลน์ (kinetic energy) ของยานยนต์ไฟฟ้า จะถูกถ่ายโอนไปที่อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน ซึ่งในบางสถานการณ์ของการเบรก อุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฮบริดจ์จะมีค่าสูงสุด และจะไม่สามารถรับพลังงานจากมอเตอร์ได้อีก ซึ่งเป็นอีกข้อจำกัดของสมรรถนะการกู้คืนกำลัง นอกจากนี้การจัดการพลังงานรวมถึงแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้า และระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดอื่นๆ ดังนั้นการมีส่วนร่วมของการเสียดทานการเบรกทำให้ส่งผลต่อการบรรลุวัตถุประสงค์การเบรก ด้วยเหตุนี้แรงเบรกรวมของยานยนต์จึงประกอบไปด้วยแรงเบรกด้วยล้อหน้า และล้อหลัง (rear and front braking forces) ตามสมการ

$$F_{vehicle} = F_f + F_r \quad (3.19)$$

โดยที่  $F_f$  คือการรวมกันของแรงเชิงกล และแรงคืนกำลังของล้อหน้า ส่วน  $F_r$  จะประกอบด้วยแรงเชิงกลของล้อหลังเพียงอย่างเดียว ซึ่งแรงที่กล่าวสามารถเขียนจากสมการ

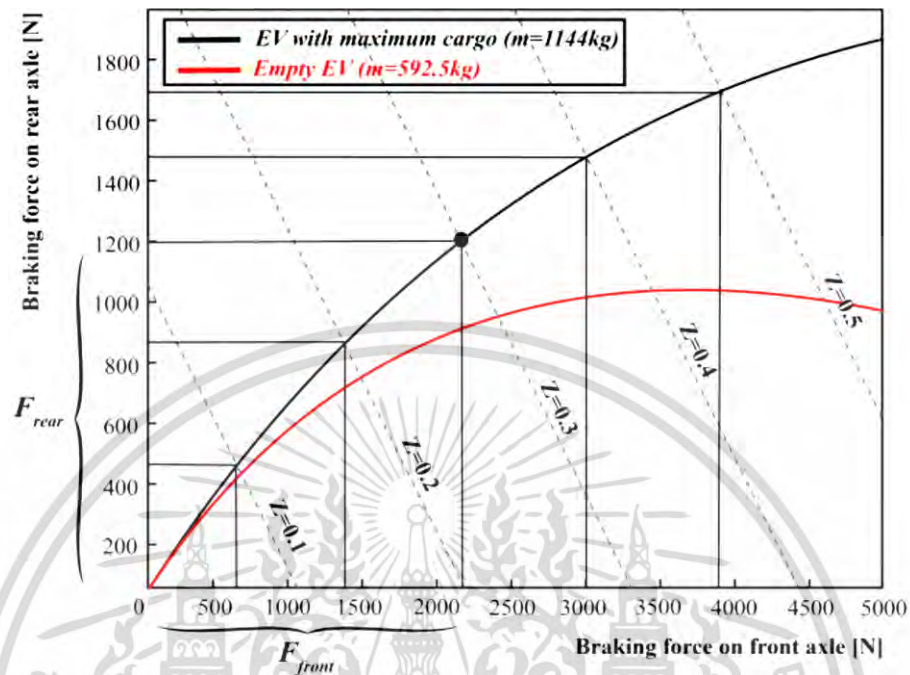
$$F_f = \phi \frac{mg(C_r + wh_v)}{L} \quad (3.20)$$

$$F_r = \phi \frac{mg(C_f + wh_v)}{L} \quad (3.21)$$

จากสมการที่ (3.20) และ (3.21),  $\phi$  คือ สัมประสิทธิ์ภาวะการยึดเกาะ  $m$  คือ น้ำหนักของยานยนต์,  $g$  คือค่าคงที่แรงโน้มถ่วง (gravitational constant)  $b$  คือระยะระหว่างจุดกึ่งกลางของตัวรถถึงแกนล้อหลัง  $a$  คือระยะระหว่างจุดกึ่งกลางของตัวรถถึงแกนล้อหน้า,  $h_v$  คือความสูงของตัวรถวัดจากจุดกึ่งกลาง และ  $L$  คือระยะห่างระหว่างแกนล้อหน้าและแกนล้อหลังของยานยนต์ไฟฟ้า ( $L = a + b$ ). นอกจากนี้  $w$  กำหนดให้เป็น  $\frac{\alpha_{vehicle}}{g}$  โดยที่  $\alpha_{vehicle}$  คือการเร่งของยานยนต์

เมื่อแก้สมการ (3.20) และ (3.21) จะได้เป็น  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมยานยนต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{vehicle} = F_f + F_r = \emptyset mg \quad (3.22)$$



รูปที่ 3.11 การกระจายแรงเบรกระหว่างล้อหน้า และล้อหลังสำหรับการศึกษาในยานยนต์ไฟฟ้า

จากกราฟการกระจายแรงเบรกในอุดมคติ (ideal braking force distribution curve [27]) แรงเบรกสูงสุดที่ทำให้ล้อหน้า และล้อหลังสามารถล็อกได้พร้อมกันในทุกๆค่าสภาวะสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ สามารถเขียนได้โดย

$$F_r = \frac{1}{2} \left[ \frac{mg}{h_v} \sqrt{v^2 + \frac{4h_v L}{mg} F_f} - \left( \frac{mg C_r}{h_v} + 2F_f \right) \right] \quad (3.23)$$

จากสมการที่ (3.21) และ (3.22) คือผลรวมของความต้อการแรงเบรกที่ล้อหน้า และล้อหลังของยานยนต์ โดยที่กราฟการกระจายแรงเบรกในอุดมคติสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 3.11 จากกราฟแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าน้ำหนักของรถส่งผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการเบรกของยานยนต์ไฟฟ้า โดยในงานวิจัยนี้น้ำหนักรวมของยานยนต์ไฟฟ้า และ HESS อยู่ที่ 1105 กก. รวมถึงพารามิเตอร์อื่นแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้า และเงื่อนไขของพื้นถนน

Parameter	Definition	value
$m$	Mass of the BEV	600 kg
$\theta$	Slope angle	0 degree
$g$	Gravitational constant	$9.81 \text{ m/s}^2$
$\rho$	Air density	$1.22 \text{ kg/m}^3$
$A_f$	Frontal area of the BEV	$2.42 \text{ m}^2$
$C_w$	Wheel radius	0.40 m
$h_v$	Height of the vehicle centroid	0.5 m
$L$	Distance between the front and rear axles	2.45 m
$K_{Rr}$	Rolling resistance coefficient	0.012
$C_f$	Centroid of BEV to the front axle centerline	1.20 m
$C_r$	Centroid of BEV to the rear axle centerline	1.25 m

### 3.6 The ANN controller

หลักการ และกลไกการควบคุมของระบบที่นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 3.10 เมื่อแป้นเบรกทำงานตามด้วยขนาด หรือจำนวนของการสัมผัสเบรก ความต้องการแรงเบรกสามารถได้รับจากสมการที่ (3.23) โดยที่ค่าของแรงเบรกล้อหลัง และล้อหน้าของยานยนต์ไฟฟ้าสามารถคำนวณบนพื้นฐานของกราฟการกระจายแรงเบรกในอุดมคติ แสดงดังรูปที่ 3.11 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของยานยนต์ เช่น ความเร็ว สถานะประจุของแบตเตอรี่ (Battery State-of-Charge (SOC)) รวมถึงส่วนควบคุมเสริมอื่นๆ เช่น ฟัซซีลอจิก fuzzy logic และ look-up table ที่ใช้โดยทั่วไปในการกำหนดค่าของแรงเบรกคินกำลัง และ แรงเบรกเชิงกลในส่วนล้อหน้า อย่างไรก็ตาม ในกรณีของยานยนต์ไฟฟ้าที่ประกอบด้วยระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ ซึ่งสถานะประจุของทั้งแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดจำเป็นต้องนำเข้าสู่กระบวนการคำนวณ จึงส่งผลให้เกิดความซับซ้อนในการดำเนินการออกแบบระบบ นอกจากนี้ ในระบบการเบรกขั้นสูง เช่น ระบบการเบรกอิเล็กทรอนิกส์(Electronic Braking System : EBS) หรือ การควบคุมแรงเบรกของรถขณะที่เข้าโค้ง Cornering Brake Control (CBC) แรงเบรกจะต้องสามารถกระจายระหว่างล้อของยานยนต์เพื่อลดความเสี่ยงต่อการลื่นไถล และความไม่แน่นอนระหว่างการขับขี่ ซึ่งจากความซับซ้อนทางไดนามิกของระบบดังกล่าวไม่สามารถจัดการได้โดยใช้ส่วนควบคุมที่ได้กล่าวไปข้างต้นได้

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks: ANN) บนพื้นฐานส่วนควบคุม ได้ถูกนำเสนอเพื่อกระจายแรงเบรกระหว่างล้อหน้า และล้อหลังของยานยนต์ไฟฟ้า ANNs คือเครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณขั้นสูงซึ่งอยู่ในรูปแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ หรือทางคอมพิวเตอร์สำหรับการประมวลผลข้อมูลด้วยการคำนวณแบบคอนเนชันนิสต์ (connectionist) ซึ่งประกอบไปด้วยเซลล์ประสาท (neurons) ซึ่งสามารถกำหนดความสัมพันธ์รูปแบบระหว่าง อินพุต และเอาต์พุต [37], [38]. นอกจากนี้ Multilayer Perceptron (MLP) และ Radial Basis Function (RBF) เป็นอีกสองโครงสร้างที่ใช้ใน ANNs

ประสิทธิภาพของ ANN จะขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบกระบวนการ และขั้นตอนทำงาน ลำดับแรก กรณีที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่ ANN จำเป็นต้องประมวลผล จะถูกเตรียมไว้ในส่วนข้อมูลฝึกฝน (training dataset) ลำดับต่อมา โครงสร้างของ ANN ซึ่งประกอบด้วย ชั้น จำนวนของ hidden layers และ จำนวนของ neurons ในแต่ละเลเยอร์จำเป็นต้องถูกเลือกมาให้สำหรับแอปพลิเคชัน ขั้นตอนคือการฝึกฝน ANN (training ANN) โดยใช้ชุดข้อมูลที่ได้รวบรวมไว้ (collected datasets) ขั้นตอนสุดท้าย ANN ที่ได้รับการฝึกฝนแล้ว (trained ANN) จะต้องทำการประเมิน และแก้ไขข้อมูลให้ถูกต้องโดยใช้ชุดข้อมูลอื่นๆ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องโดยรวมอีกครั้ง [26]

จากการจำลองผล แสดงให้เห็น ข้อมูลที่ถูกป้อน (feed-forward) จำนวนสี่เลเยอร์ ให้ ANN เพื่อให้ได้ชุดข้อมูลที่มีประสิทธิภาพของ ซึ่งด้านอินพุตประกอบด้วย สถานะประจุของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ความเร็วของยานยนต์ และจำนวนการสัมผัสแป้นเบรก จากนั้น 5 นิวรอนเลเยอร์ จะถูกประมวลผล โดยที่เอาต์พุตของเพื่อนำไปใช้งานของ ANN จะประกอบไปด้วย แรงเบรกเชิงกลของล้อหน้า และล้อหลัง รวมถึงแรงเบรกคั่นกำลังของล้อหน้า ซึ่งใช้ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid function) ในการประมวลผลสำหรับนิวรอน ในเลเยอร์ฮิดเดน (hidden layers)

$$f(u) = \frac{1}{1+e^{-u/t}} \quad (3.24)$$

เช่นเดียวกับฟังก์ชันการถ่ายโอนเชิงเส้น (linear transfer function) ถูกประยุกต์ใช้สำหรับนิวรอนในเอาต์พุตเลเยอร์ของ ANN โดยโครงสร้างเครือข่าย ANN ที่นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 3.12 โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการสัมผัสแป้นเบรก The relationship between the brake strength (pedal depression), แรงเบรกล้อหน้า และล้อหลังสามารถคำนวณได้โดยใช้กราฟการกระจายแรงเบรกในอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 อย่างไรก็ตาม ชุดข้อมูลการเทรน (training dataset) ควรมีข้อมูลเกี่ยวกับสัดส่วนของแรงเบรกคั่นกำลัง และแรงเบรกเชิงกลมากพอสำหรับระบบการปฏิบัติการที่แตกต่างกัน

ในการสร้างชุดข้อมูลการเทรน จะถูกดำเนินการด้วยการจำลองที่หลากหลายในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยการประยุกต์ใช้ค่าที่แตกต่างกันของสถานะประจุ (SOC) ของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ความเร็วของยานยนต์ และจำนวนการสัมผัสแป้นเบรกซึ่งถูกกำหนดขึ้นโดยการเทรนรอบการขับขี่ (training drive cycle) ซึ่งการกำหนด drive cycle เป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมากสำหรับความเพียงพอในการจำลองผลในสถานการณ์การเบรก [27]-[29]

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้รอบการขับขี่แบบ LAFTP-72 และ INRETS route1 โดยรอบการขับขี่ที่เลือก ใช้เวลา 50.99% และ 70% ตามลำดับ จากเวลาในการขับขี่ทั้งหมด ในเงื่อนไขการเบรก และ/หรือชะลอ ที่สถานการณ์การเบรกเกิดขึ้นที่ความเร็ว และจำนวนในการสัมผัสเบรกที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้จำนวนชุดข้อมูลการเทรน (Training dataset) ที่ได้รับจึงมีจำนวนที่มากพอในการประมวลผล ซึ่งรายละเอียดของการเทรนรอบขับซี (training drive cycle) แสดงดังตารางที่ 3.2 โดยที่แรงเบรกจะคำนวณโดยใช้เกณฑ์ 3 ข้อคือ 1) ยานยนต์จะชะลอ หรือหยุดในระยะทาง และเวลาที่กำหนดโดยรอบขับซี 2) การคืนกำลังค่าสูงสุดที่สามารถบรรลุได้ 3) สถานะประจุของแบตเตอรี่ และตัวเก็บยิ่งยวดรักษาระดับที่ปลอดภัย (safe margins) โดยที่เทคนิคแบบ back propagation ร่วมด้วยวิธีการแบบ Levenberg-Marquardt ถูกใช้ในการเทรน ANN [26] และอีกหนึ่งเกณฑ์สำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของ ANN คือเทคนิคการ Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนระหว่างการคาดการณ์ และค่าจริงด้านเอาท์พุท สามารถกำหนดได้จากสมการ

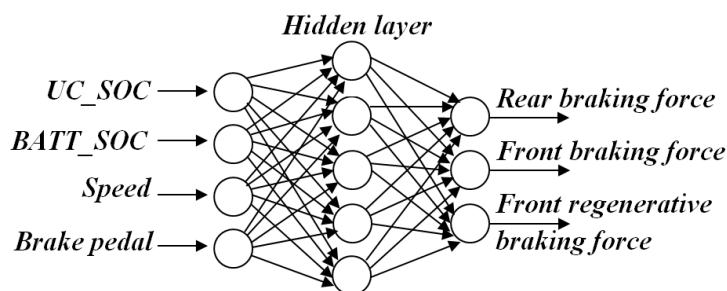
$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_n [F(n) - F'(n)]}{\sum_n F'(n)^2}} \quad (3.25)$$

โดยที่  $F(n)$  และ  $F'(n)$  คือการประเมิน และค่าตามเป้าหมายของเอาท์พุทตามลำดับ และ  $n$  คือ จำนวนของจุดข้อมูล (data points) ในขั้นตอนการเทรน จะใช้รอบการขับซีจำนวน 319 แบบ ที่แตกต่างกัน ซึ่งถูกจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่าสถานะประจุ ซึ่งค่า NRMSE ที่คำนวณได้อยู่ที่ 0.016 สำหรับเอาท์พุท (Regenerative-braking) โดยที่สมรรถนะโดยรวมของ ANN ควรประเมินโดยใช้สถานการณ์การเบรกอื่นที่ยังไม่ถูกใช้ เทรนในชุดการเทรน (Training stage) ร่วมด้วย ด้วยเหตุนี้ ANN จะถูกปรับปรุงและประเมินความถูกต้องโดยใช้รอบการขับซีแบบอื่น (UG209 Car02) ซึ่งมี 45 กรณีในการขับซีที่แตกต่างกันถูกจำลอง และประมวลผล โดยที่การเลือกรอบขับซีแบบ UG209 Car02 เนื่องจากมีสถานการณ์การเบรกจำนวนมาก และเพียงพอในการใช้ประมวลผล ดังนั้นประสิทธิภาพของ ANN สามารถได้รับการประเมินความถูกต้องได้ โดยในกรณีนี้สามารถคำนวณค่า NRMSE ได้ 0.114 สำหรับเอาท์พุทเดียวกัน

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของรอบขับซีเทรนนิ่ง (training drive cycle)

Parameter	Value	Unit
Cycle name	LA FTP-72	-
Distance	10996.78	m
Total time	1265	s
% of accelerating time	41.78	%
% of decelerating time	31.19	%
% of braking time	19.80	%
% of cruising time	18.05	%
Average speed	52.9	km/h
Maximum speed	79.22	Km/h
Average positive acceleration	0.429	m/s <sup>2</sup>
Average negative acceleration	-0.464	m/s <sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของ ANN

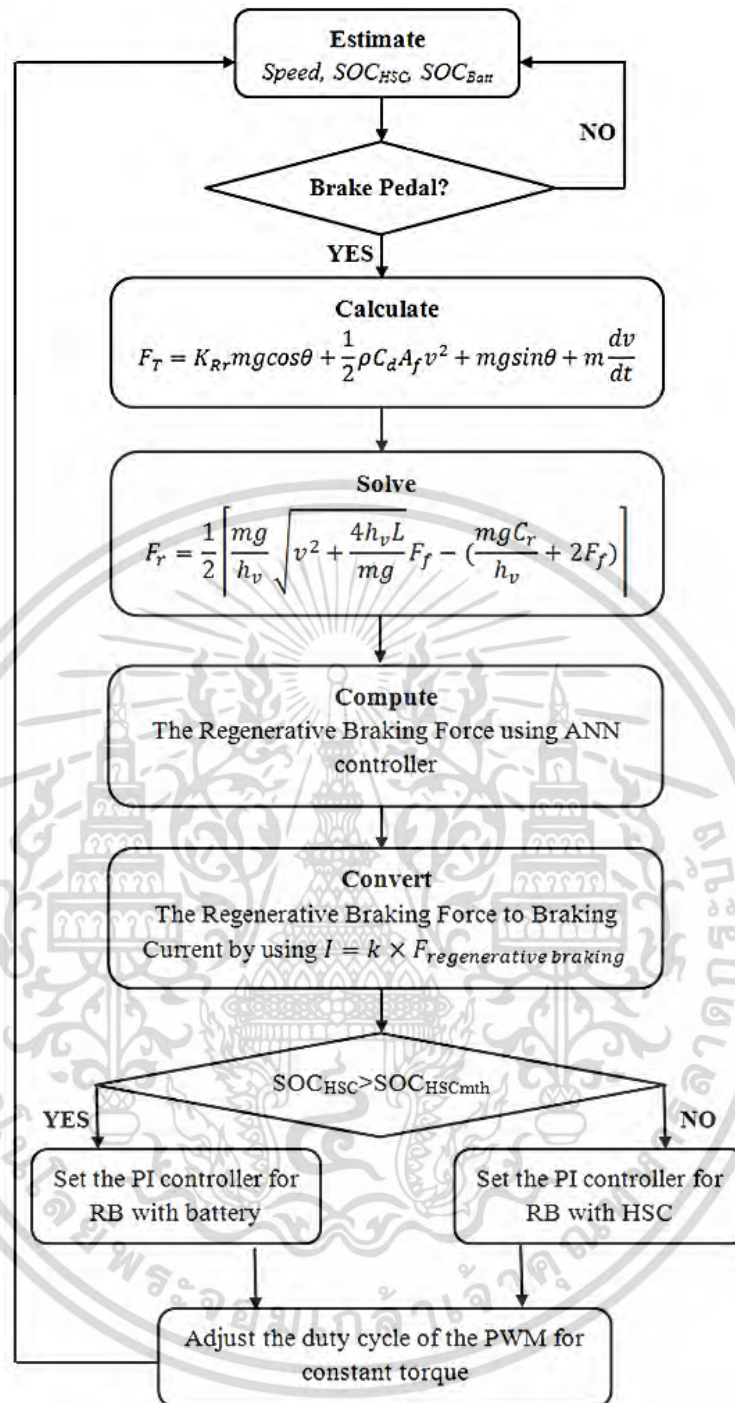
### 3) The PI controller [16]

หลังจากการกระจายแรงเบรกดำเนินการสำเร็จโดย ANN แรงเบรกก็นกำลังของล้อหน้าจะ ถูกแปลงเป็นกระแสการเบรก (braking current) โดยใช้ (21):

$$I = k \times F_{regenerative\ braking} \quad (3.26)$$

เมื่อกระแสจุดตั้งค่าถูกคำนวณ ตัวควบคุมพีไอจะใช้เพื่อปรับแรงบิดการเบรก (braking torque) โดยการปรับดิ้วถี่ซิกเคลของรูปแบบอัลกอริธึม PWM ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2 ด้วยเหตุนี้ วิธีที่ได้นำเสนอสามารถบรรลุค่าแรงบิดคงที่สำหรับการเบรกก็นกำลังเพื่อวัตถุประสงค์ด้านความปลอดภัย

สำหรับขั้นตอน และกระบวนการทั้งหมดของระบบ RBS ที่นำเสนอแสดงดังผังงานที่ 3.13 ซึ่งจากผังงานแสดงให้เห็นว่าการคำนวณความสัมพันธ์ของ  $F_{braking}$ ,  $F_{rear}$  และ  $F_{front}$  สามารถใส่เพื่อประมวลผลได้ง่ายใน ANN



รูปที่ 3.13 ผังแสดงขั้นตอนการทำงานของระบบกู้คืนกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ

โดยทั่วไป ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บกำลังขณะเบรกที่นำเสนอขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเร็วของยานยนต์ สถานะประจุของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด รายละเอียดของรอบการขับขี่ เป็นต้น โดยที่ค่าประสิทธิภาพสามารถคำนวณได้โดยสมการ (22):

$$\% \mu = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta E_{UC} + \sum_{i=1}^n E_{Batt}}{\sum_{i=1}^n \Delta E_{Kit}} \times 100 \quad (3.27)$$

จากสมการที่ 3.27 n คือจำนวนขั้นตอนการทำงานในการชะลอหรือเบรกของยานยนต์ในรอบการขับขี่ นอกจากนี้  $\Delta E_{UC}$  คือการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุยิ่งยวดทั้งก่อน และหลัง การเบรก ซึ่งสามารถแสดงได้จากสมการ

$$\Delta E_{UC} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.28)$$

โดยที่ C คือค่าความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ในหน่วยฟารัด (Farad) และ  $\Delta E_{battery}$  ในหน่วยจูล (Joules) คือกำลังงานที่สะสมในแบตเตอรี่ระหว่างการเบรก ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta E_{Batt} = \int_{t_1}^{t_2} (V_{Batt} i_{Batt} - R(t) i_{batt}^2) dt \quad (3.29)$$

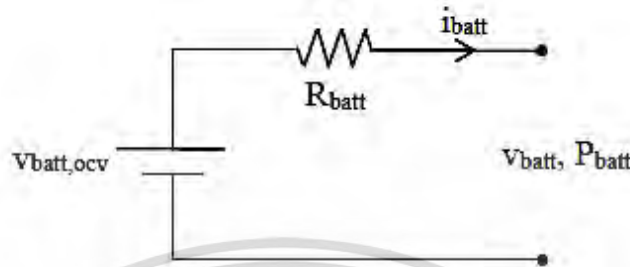
โดยที่ R ค่าความต้านทานในการเติมประจุของแบตเตอรี่  $V_{battery}$  และ  $i_{battery}$  คือแรงดัน และกระแสของแบตเตอรี่ ตามลำดับ นอกจากนี้  $t_1$  และ  $t_2$  คือการเริ่มต้น และสิ้นสุดแบบชั่วขณะของกระบวนการเบรกตามลำดับ ลำดับสุดท้าย  $\Delta E_{Kit}$  คือการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์ในหน่วยจูลของยานยนต์ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta E_{Kit} = \frac{1}{2} m(v_2^2 - v_1^2) \quad (3.30)$$

โดยที่ m คือน้ำหนักของยานยนต์  $v_1$  และ  $v_2$  คือความเร็วของยานยนต์ก่อน และหลังการเบรก

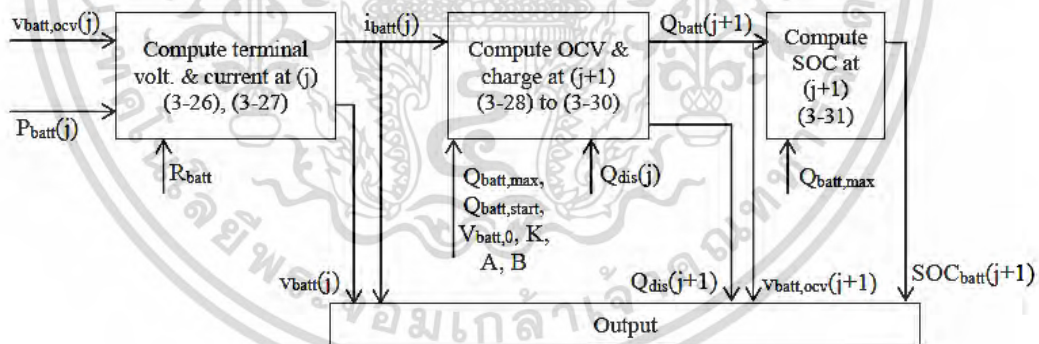
### 3.8 Battery Model

โมเดลของแบตเตอรี่ประกอบด้วยแบตเตอรี่แบบวงจรเปิดแรงดัน open circuit voltage (OCV)  $v_{batt,ocv}$  ที่ความต้านทานอนุกรมภายใน (internal resistance) แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 โมเดลของแบตเตอรี่

อินพุทของโมเดลแบตเตอรี่ คือกำลังงานที่ต้องการของแบตเตอรี่ (battery power demanded  $P_{batt(j)}$ ) และแบตเตอรี่แบบวงจรเปิดแรงดัน (OCV)  $v_{batt,ocv(j)}$  ที่ขณะนั้น ที่จำเป็นในการเริ่มการชาร์จในแบตเตอรี่  $Q_{batt,start}$  และ  $Q_{batt,max}$  คือค่าสูงสุดที่สามารถชาร์จได้ด้านเอาต์พุตคือแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ terminal voltage  $v_{batt(j)}$  และ  $i_{batt(j)}$  กระแสของแบตเตอรี่ที่ไหลขณะนั้น  $Q_{batt(j+1)}$  คือการชาร์จที่เหลือในขณะทันทีทันใด  $i_{batt(j)}$  คือกระแสหลังจากการคายประจุ และ  $v_{batt,ocv(j+1)}$  คือแบตเตอรี่แบบวงจรเปิดแรงดันช่วงถัดไป รูปที่ 3-15 แสดงบล็อกไดอะแกรมของโมเดลแบตเตอรี่



รูปที่ 3.15 บล็อกไดอะแกรมสำหรับโมเดลแบตเตอรี่

โดยที่รูปแบบถูกอธิบายในรายละเอียด บนพื้นฐานของรูปที่ 3-14 กระแสแบตเตอรี่ที่ต้องการสามารถคำนวณได้จากความต้องการกำลังงาน

$$i_{batt}(j) = \frac{P_{batt}(j)}{v_{batt}(j)} = \frac{P_{batt}(j)}{v_{batt}(j) - R_{batt}i_{batt}(j)} \quad (3.31)$$

จัดรูปสมการ ได้เป็น

$$R_{batt}i_{batt}^2 - v_{batt,ocv}(j)i_{batt}(j) + P_{batt}(j) = 0 \quad (3.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{batt}(j) = \frac{v_{batt,ocv}(j) - \sqrt{v_{batt,ocv}(j)^2 - 4R_{batt}P_{batt}(j)}}{2R_{batt}} \quad (3.33)$$

ต่อมาแรงดันแบตเตอรี่แบบทันทีทันใดคำนวณได้โดย

$$v_{batt}(j) = v_{batt,ocv}(j) - R_{batt}i_{batt}(j) \quad (3.34)$$

ถัดมาในส่วนของ OCV  $v_{batt,ocv}(j)$ , ซึ่งเปลี่ยนแปลงโดยการเติมประจุ และการคายประจุถูกคำนวณ ซึ่งเป็นพื้นฐานการโมเดลโดย [63] ซึ่งเป็นโมเดลที่ง่ายในการใช้งาน และเป็นวิธีที่ใช้แยกพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ (Tremblay's methods) A, B, K, and  $V_{batt}$  จากกราฟคายประจุ (discharge curve)

โดยที่การอัปเดตโมเดลแบตเตอรี่บนพื้นฐานของ Tremblay สรุปได้คือ ลำดับแรกของแบตเตอรี่คายประจุทั้งหมดเนื่องจากเริ่มการจำลอง  $Q_{dis}(j+1)$  ในการคายประจุถัดไป  $i_{batt}(j)$  สามารถคำนวณได้ หลังจากนั้นการเติมประจุที่เหลือในแบตเตอรี่  $Q_{batt}(j+1)$  ถูกคำนวณต่อไป

$$Q_{dis}(j+1) = \int_0^j i_{batt}(j) dj = Q_{dis}(j) + i_{batt}(j)\Delta j \quad (3.35)$$

$$Q_{batt}(j+1) = Q_{batt,start} - Q_{dis}(j+1) \quad (3.36)$$

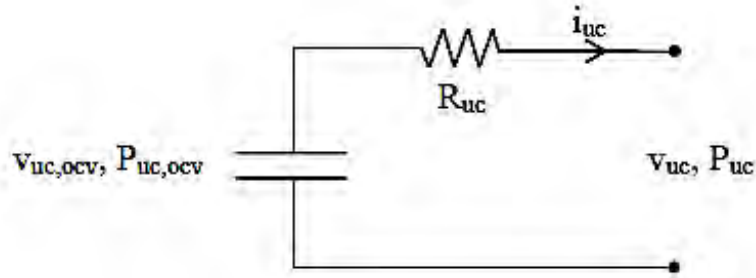
$$v_{batt,ocv}(j+1) = V_{batt,0} - K \frac{Q_{batt,max}}{Q_{batt}(j+1)} + Ae^{-B(Q_{batt,max}-Q_b)} \quad (3.37)$$

โมเดลของแบตเตอรี่จะถูกอัปเดตผ่านช่วงเวลา  $v_{batt}(j)$ ,  $i_{batt}(j)$ ,  $Q_{batt}(j+1)$  และ  $v_{batt,ocv}(j+1)$  ได้ถูกคำนวณสถานะประจุ (SOC) ของแบตเตอรี่สามารถคำนวณได้โดย

$$SOC_{batt}(j) = \frac{Q_{batt}(j)}{Q_{batt,max}} \quad (3.38)$$

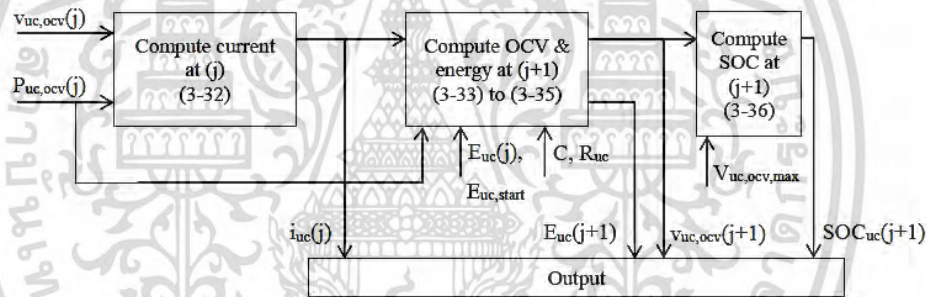
### 3.9 Supercapacitor Model

โมเดลของตัวเก็บประจุยิ่งยวดประกอบด้วยตัวเก็บประจุแบบวงจรเปิดแรงดัน OCV  $v_{uc,ocv}$  ที่ค่าความต้านทานอนุกรมภายใน (internal resistance) [64] ซึ่งคล้ายกันกับในกรณีของโมเดลแบตเตอรี่ในหัวข้อก่อนหน้า



รูปที่ 3.16 โมเดลตัวเก็บประจุยิ่งยวด

อินพุทของโมเดลตัวเก็บประจุยิ่งยวด คือกำลังงานที่ต้องการของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor power demanded  $P_{SC(j)}$ ) และตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบวงจรเปิดแรงดัน (OCV)  $v_{SC,ocv(j)}$  ที่ขณะนั้น ที่จำเป็นในการเริ่มการชาร์จในตัวเก็บประจุยิ่งยวด  $Q_{SC,start}$  และ  $Q_{batt,max}$  คือค่าสูงสุดที่สามารถชาร์จได้ด้านเอาต์พุต  $i_{SC(j)}$  กระแสของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ไหลขณะนั้น  $Q_{SC(j+1)}$  คือการชาร์จที่เหลือในขณะทันทีทันใด  $i_{SC(j)}$  คือกระแสหลังจากการคายประจุ และ  $v_{SC,ocv(j+1)}$  คือตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบวงจรเปิดแรงดันช่วงถัดไป รูปที่ 3.17 แสดงบล็อกไดอะแกรมของโมเดลตัวเก็บประจุยิ่งยวด



รูปที่ 3.17 บล็อกไดอะแกรมสำหรับโมเดลตัวเก็บประจุยิ่งยวด

จากความต้องการกำลังงาน กระแสของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ต้องการสามารถคำนวณได้จาก

$$i_{uc}(j) = \frac{P_{uc,ocv}(j)}{v_{uc,ocv}(j)} \quad (3.39)$$

จากโมเดลแบตเตอรี่ก่อนหน้านี้ ค่าความต้านทานภายในถูกรวมเข้าไปในโมเดล แต่ในโมเดลนี้ ค่าความต้านทานตัวเก็บประจุยิ่งยวดภายในถูกละทิ้งไป แต่จะถูกใส่เข้าไปในโมเดลคอนเวอร์เตอร์ จากนั้น OCV  $v_{uc,ocv(j+1)}$ , ซึ่งเปลี่ยนแปลงโดยการเติมประจุ และคายประจุถูกคำนวณ โดยที่พลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด  $E_{uc(j)}$  สามารถได้รับโดย

$$E_{uc}(j) = 0.5Cv_{uc,ocv}(j) \quad (3.40)$$

เมื่อพลังงานในตัวเก็บประจุยิ่งยวดถูกคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{uc}(j+1) = - \int_0^j P_{uc,ouv}(j) dj = E_{uc}(j) - P_{uc,ouv}(j) \Delta j \quad (3.41)$$

โดยที่  $E_{uc}(1) = E_{uc,start}$  สุดท้าย  $v_{uc,ocv(j+1)}$  คำนวณได้จาก

$$v_{uc,ocv}(j+1) = \sqrt{\frac{2E_{uc}(j+1)}{C}} \quad (3.44)$$

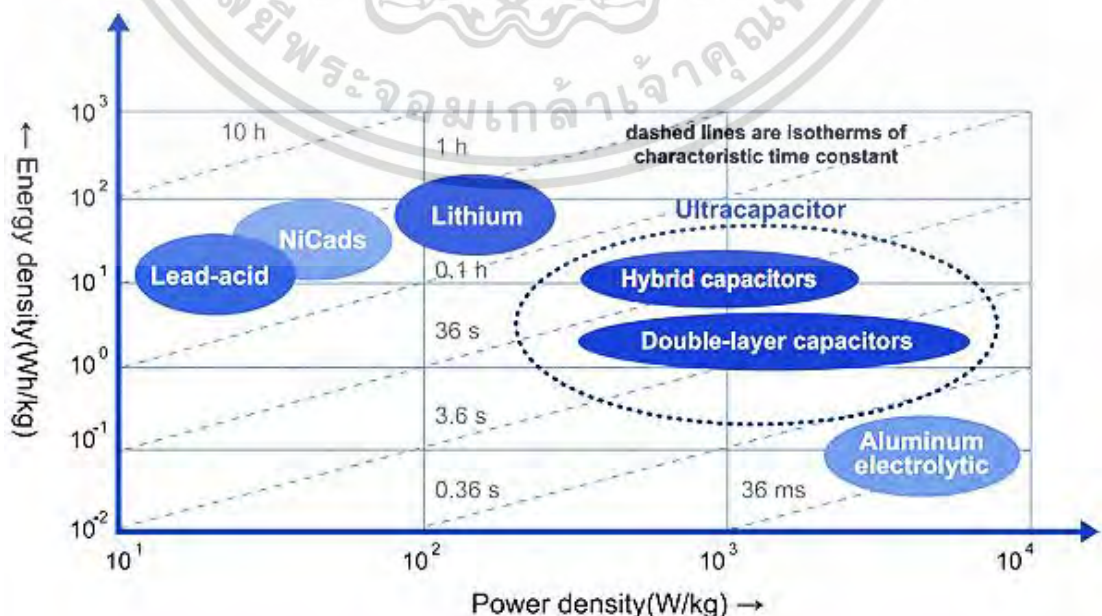
ซึ่งโมเดลของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะทำการอัปเดตผ่านช่วงเวลาแบบทันทีทันใด  $i_{uc(j)}$ ,  $E_{uc(j+1)}$ , และ  $v_{uc,ocv(j+1)}$  จะถูกคำนวณ ซึ่งสถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถคำนวณได้โดยใช้

$$SOC_{uc}(j) = \frac{Q_{uc}(j)}{Q_{us,max}} = \frac{C_{uc,ocv}(j)}{CV_{uc,max}} = \frac{v_{uc,ocv}(j)}{V_{uc,max}} \quad (3.45)$$

### 3.10 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด Supercapacitor

ในปัจจุบันเทคโนโลยีได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นกว่าในอดีตอย่างมาก ผู้คนมีความต้องการอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (Energy storage) ที่มากยิ่งขึ้น นวัตกรรมเทคโนโลยีจึงเป็นส่วนสำคัญในการประดิษฐ์อุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากโครงสร้างที่ได้เปรียบของวัสดุนาโน (Nano materials) ในด้านพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface to volume) ที่สูงกว่าวัสดุทั่วไป (Bulk materials) เป็นอย่างมาก จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุปกรณ์ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ ที่มาแทนที่อุปกรณ์เก็บพลังงานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันนั่นคือ แบตเตอรี่ (Battery) และตัวเก็บประจุ (Capacitor)

อุปกรณ์ที่ใช้กักเก็บพลังงานไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบซึ่งสามารถจำแนกตามความสามารถในการเก็บพลังงานจากกราฟของราโกเนดังรูปที่ 3.18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 3.18** กราฟของรากโณเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกำลังงานและความหนาแน่นพลังงานของตัวเก็บพลังงานชนิดต่างๆ [1]

การเก็บพลังงานไฟฟ้าโดยทั่วไป ใช้แบตเตอรี่ในการเก็บประจุพลังงานไฟฟ้า ซึ่งแบตเตอรี่อาศัยปฏิกิริยาเคมี ซึ่งถึงแม้จะเก็บประจุไฟฟ้าได้ แต่มีข้อเสีย เช่น อายุการใช้งานของแบตเตอรี่นั้นค่อนข้างสั้นมาก มีการสูญเสียพลังงานในรูปแบบของความร้อน การประจุไฟฟ้าใช้เวลานานเนื่องจากอาศัยปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจากปัญหาเหล่านี้ ทำให้มีการศึกษาการเก็บพลังงานไฟฟ้าอย่างหลากหลายรูปแบบ โดยหนึ่งในนั้นคือตัวเก็บประจูงยิ่งยวด

ตัวเก็บประจูงยิ่งยวดมีหลักการคล้ายกับแบตเตอรี่ แต่ไม่อาศัยปฏิกิริยาเคมี ตัวเก็บประจูงยิ่งยวดประกอบด้วยประเภทที่ 1 ตัวเก็บประจูงยิ่งยวดแบบไฟฟ้าสองชั้น (Electric double layer capacitors; EDLC) ซึ่งอาศัยหลักการทางไฟฟ้าสถิตย์ ให้ค่าความจุไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังที่สูง (High power density) โดยขั้วไฟฟ้ามักทำจากวัสดุคาร์บอน (Carbon-based materials) และประเภทที่ 2 ตัวเก็บประจูงยิ่งยวดแบบซูโดคาปาซิเตอร์ (Pseudocapacitor) มีหลักการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่ คืออาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical หรือ Redox reaction) ขั้วไฟฟ้าทำได้จากทั้งโลหะออกไซด์ (Metal oxide) ซึ่งจะให้ความจุจำเพาะ และความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับซูเปอร์คาปาซิเตอร์แบบ EDLC

ดังนั้น ตัวเก็บประจูงยิ่งยวดแบบผสม ซึ่งรวมข้อดีของตัวเก็บประจูงยิ่งยวดชนิด EDLC และซูโดคาปาซิเตอร์เข้าด้วยกัน ทำให้ได้ตัวเก็บประจูงยิ่งยวดที่มีทั้งค่าความหนาแน่นกำลังและความหนาแน่นพลังงานที่สูง โดยในวัสดุคาร์บอน มีการนำท่อนาโนคาร์บอนและกราฟีนมาใช้อย่างแพร่หลายในการทำขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจูงยิ่งยวด เนื่องจากมีพื้นผิวสูงและนำไฟฟ้าได้ดี อย่างไรก็ตาม ได้มีรายงานว่าความจุของ EDLC นั้น จะมีข้อจำกัดตามพื้นที่ผิวและรูพรุนของวัสดุคาร์บอน ในเร็ว ๆ นี้ จึงได้มีการศึกษาว่าการดัดแปลงสมบัติทางเคมีและอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุคาร์บอนด้วยการเจือด้วยธาตุอื่นๆ เช่น ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน โบรอน และฟอสฟอรัส เป็นต้น เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่จะเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าได้

ในส่วนของวัสดุโลหะออกไซด์นั้น แมงกานีสออกไซด์ เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจในการนำมาศึกษาเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจูงยิ่งยวดเป็นอย่างมาก เนื่องจากให้ค่าความหนาแน่นพลังงานที่สูง ราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ แมงกานีสออกไซด์ยังสามารถควบคุมเป็นรูปร่างต่างๆได้ง่าย ด้วยเทคนิคการเคลือบไฟฟ้าเคมี และเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยค่าความจุไฟฟ้าที่ต่ำ ค่าความต้านทานที่สูงของแมงกานีสออกไซด์ ทำให้วัสดุชนิดนี้ถูกจำกัดการใช้งาน

เพื่อที่จะแก้ปัญหาเหล่านี้ จึงได้มีการเสนอการใช้วัสดุไฮบริดระหว่างวัสดุคาร์บอน และวัสดุโลหะออกไซด์ เช่น วัสดุนาโนทิวส์ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes; CNTs) และแมงกานีสออกไซด์ ( $MnO_2$ ) เช่น CNT ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ  $MnO_2$  ฟิล์มบางคอมโพสิตของ CNT/ $MnO_2$  ผลึกนาโนของ  $MnO_2$  ในผิวและในโพรงของ CNT หรือ ลวด  $MnO_2$  บน CNT เป็นต้น ถึงแม้ว่าจะมีการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างนาโนของกราฟีนและแมงกานีสออกไซด์อยู่เป็นจำนวนมาก แต่ก็ยังมีความท้าทายในหาโครงสร้างที่ดีที่สุดของกราฟีนและแมงกานีสออกไซด์ นอกจากนี้วิธีของตัวอย่างที่กล่าวมาข้างต้นนั้น พบว่าเป็นวิธีที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางเคมี ที่ซับซ้อนและใช้เวลานาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเมื่อเร็ว ๆ นี้ ทางคณะผู้วิจัย สามารถค้นพบโครงสร้างของ CNT/MnO<sub>2</sub> โดยเป็นโครงสร้างไฮบริดของ CNT และ MnO<sub>2</sub> nanosheet ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยวิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้าเคมี ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตามนาโนซีท ที่สังเคราะห์ได้นั้น ยังมีขนาดที่ใหญ่และหนาอยู่ จึงเป็นสิ่งที่ท้าทายในการที่จะทำให้นาโนซีท มีขนาดเล็กและบางลง ซึ่งจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่สูงขึ้นด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

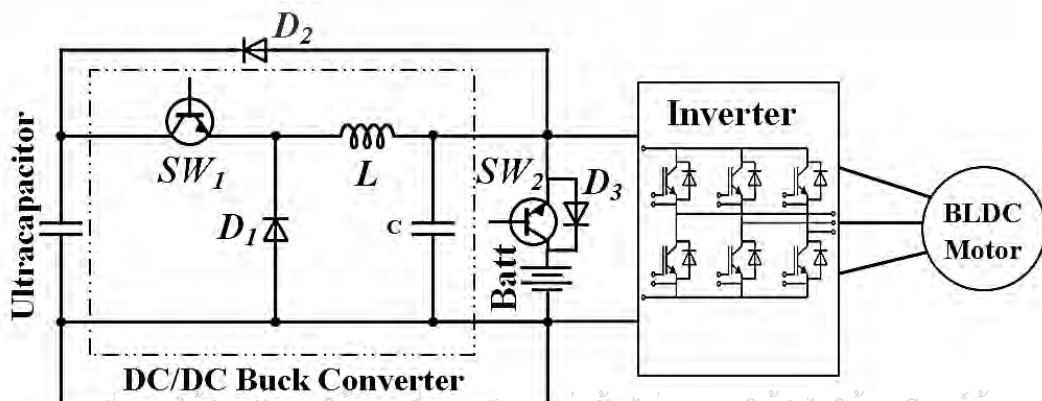
## บทที่ 4

# การออกแบบทดสอบระบบกักเก็บกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการสร้าง และการออกแบบทดสอบระบบกักเก็บกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเริ่มจากออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงานสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า พารามิเตอร์ตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้ในระบบ จากนั้นทำการออกแบบระบบ HESS โครงสร้างแบบ SC/Battery ที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุยิ่งยวด, แบตเตอรี่, วงจรลดทอนระดับแรงดัน แบบดีซี-ดีซี ชนิดทิศทางเดียว (Unidirectional dc-dc buck converter) มอเตอร์ BLDC วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส และ ไดโอดคืนกำลัง (Regenerative diode) รวมไปถึงกลไกการควบคุมระบบคืนกำลังขณะเบรก (Regenerative braking system : RBS control mechanism) และทำการทดสอบตัวควบคุมพีไอ (PI controller) ด้วยสัญญาณอินพุตรูปพัลส์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณบนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks : ANN) เพื่อเป็นการตรวจสอบการทำงานของส่วนควบคุมก่อนนำไปใช้งานในระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า

### 4.1 โครงสร้างระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์โครงสร้างแบบ SC/Battery ที่นำเสนอ

ระบบ HESS โครงสร้างแบบ SC/Battery ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุยิ่งยวด, แบตเตอรี่, วงจรลดทอนระดับแรงดัน/บัสคอนเวอร์เตอร์ แบบดีซี-ดีซี ชนิดทิศทางเดียว (Unidirectional dc-dc buck converter) และ ไดโอดคืนกำลัง (Regenerative diode) โดยที่  $V_{Batt} = V_{DC} \leq V_{SC}$  ซึ่ง  $V_{Batt}$  คือแรงดันของแบตเตอรี่,  $V_{DC}$  คือแรงดันของดีซีลิงค์, และ  $V_{SC}$  คือแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยที่การเชื่อมต่อของระบบ แรงดันที่ต่ำกว่าของแบตเตอรี่จะถูกต่อตรงเข้ากับดีซีลิงค์ ด้วยเหตุนี้ดีซีลิงค์ จะสามารถอยู่ในสภาวะคงที่ แรงดันที่สูงกว่าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะถูกเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ผ่านวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบดีซี-ดีซี ในขณะที่แบตเตอรี่เชื่อมต่อกับขานานกับตัวเก็บประจุยิ่งยวดผ่านไดโอดคืนกำลัง แสดงดังรูปที่ 2. และ ระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery จะใช้เพื่อจ่ายพลังงานให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor: BLDC Motor) ผ่านอินเวอร์เตอร์สามเฟส (three-phase inverter)



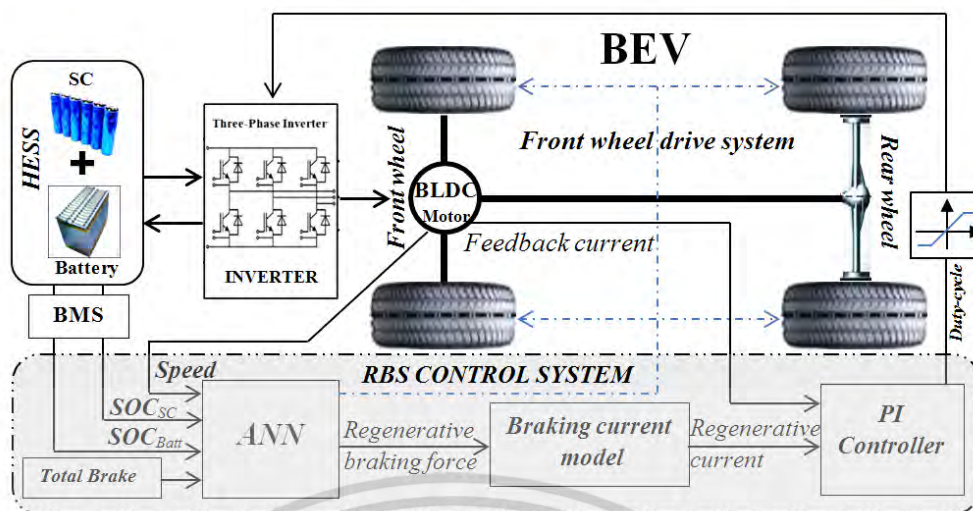
### รูปที่ 4.1 Structure of the proposed HESS

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์สำหรับการจำลอง และทดสอบระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์โครงสร้างแบบ SC/Battery ที่นำเสนอ

Specifics	Simulation	Experimental
Battery	Lithium-ion Battery pack from ADVISOR 12 Volt 20Ah 3 packs in series (720 Wh, 2.59 MJ)	Lithium-ion Battery pack 36 Volt, 20 Ah (720 Wh, 2.59 MJ)
(SC)	Supercapacitor module Maxwell Ultra Capacitor BoostCap 2.7V 120 Farad 18 cell in series (48 volt, 2.18 Wh)	SC module-Hybrid supercapacitor 2.7V 120 Farad 18 cell in series (48 volt, 2.18 Wh)
Motor	Three-Phase BLDC Motor, 5 kW from ADVISOR	Three-Phase BLDC Motor, 5 kW from LapVolt series
Measurement Instrument	Data Acquisition and Control Interface 9063	
Circuit components	Regenerative braking diode $D_2$	DS100-1100L Brown Boveri
	Mosfets	IRP3127PF
	Current sensor	CLSM200L

### 4.2 โครงสร้างระบบควบคุมระบบกักเก็บกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ

โครงสร้างโดยรวมทั้งหมดของระบบกักเก็บกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยในส่วนของระบบควบคุมที่นำเสนอประกอบไปด้วย การกระจายแรงเบรก (braking force distribution) , โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks : ANN), และ ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของส่วนระบบควบคุมที่นำเสนอ ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.2 โครงสร้างระบบควบคุมระบบกักเก็บกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้า และเงื่อนไขพื้นถนน

Parameter	Definition	value
$m$	Mass of the BEV	600 kg
$\theta$	Slope angle	0 degree
$g$	Gravitational constant	$9.81 \text{ m/s}^2$
$\rho$	Air density	$1.22 \text{ kg/m}^3$
$A_f$	Frontal area of the BEV	$2.42 \text{ m}^2$
$C_w$	Wheel radius	0.40 m
$h_v$	Height of the vehicle centroid	0.5 m
$L$	Distance between the front and rear axles	2.45 m
$K_{Rr}$	Rolling resistance coefficient	0.012
$C_f$	Centroid of BEV to the front axle centerline	1.20 m
$C_r$	Centroid of BEV to the rear axle centerline	1.25 m

สำหรับการออกแบบในการเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ได้พิจารณาองค์ประกอบที่ส่งผลกระทบต่อการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วย ความต้องการระยะในการขับขี่ต่อการเติมประจุ 1 ครั้ง ขนาดของรถ รวมถึงพื้นที่สำหรับวางอุปกรณ์เพื่อความสมดุลทางน้ำหนักที่เหมาะสม ในกรณีอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักมาก เช่น มอเตอร์และแบตเตอรี่ ซึ่งมีผลต่อการกระจายตัวของน้ำหนักยานยนต์ จึงสามารถส่งผลกระทบต่อพลศาสตร์ของยานยนต์ ความสามารถในการควบคุมยานยนต์ และความปลอดภัยในการขับขี่ [12-15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการออกแบบ และการพิจารณาในการเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัย ที่ใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ชนิด BLDC ขนาด 5 kW โดยที่ขนาดน้ำหนักของยานยนต์อยู่ช่วง 500-1,000 กก. ที่ความต้องการความเร็วในการวิ่งเฉลี่ยที่ 30-45 km/h ซึ่งแบ่งเป็นการพิจารณาขนาดมอเตอร์ รวมถึงสัดส่วนของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดดังนี้

### 4.3 มอเตอร์

ในการพิจารณาเลือกชนิดมอเตอร์ที่ใช้ จะต้องมีการวางแผนเรื่องการจัดหาพื้นที่สำหรับวางมอเตอร์เพื่อสมดุลทางน้ำหนักที่เหมาะสม รวมถึงเลือกมอเตอร์ที่มี น้ำหนักเบา ขนาดเล็ก สร้างความร้อนต่ำที่สุดที่ และราคาถูก ซึ่งจากการประยุกต์ใช้การขับเคลื่อนมอเตอร์ไร้แปรงถ่านทั้งในยานยนต์ไฟฟ้าและในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [12] โดยมีเหตุผลหลักคือการมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ไม่ก่อให้เกิดประกายไฟ และการบำรุงดูแลรักษาง่าย แม้ว่าคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบนี้มีราคาแพงกว่าคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน แต่ก็มีราคาลดลงตามช่วงเวลา เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

โดยในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้มอเตอร์ชนิด BLDC ขนาด 5 kW เนื่องจากมีกำลังและมีประสิทธิภาพต่อน้ำหนักสูงกว่าเมื่อเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่น เช่นในกรณีเทียบกับมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (Induction motor) มอเตอร์ชนิด BLDC ขนาด 5 kW ที่มีน้ำหนัก 11.5 kg ซึ่งเบากว่ามอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำขนาด 5.5 kW ซึ่งมีน้ำหนัก 62.5 kg ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงเลือกมอเตอร์ชนิด BLDC ที่เบากว่า ขนาดเล็กกว่า และเหมาะสมกว่าในการติดตั้งสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่มีน้ำหนักในช่วง 500-1000 kg และเหมาะสมกับความต้องการความเร็วในการวิ่งเฉลี่ยที่ 30-45 km/h โดยรายละเอียดของมอเตอร์ชนิด BLDC ที่ใช้ในการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 4.3

### ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC Motor)

Parameter	Value	Unit
Power rating	5	kW
Voltage rating	36-48	V
Current rating	100	A
Rated speed	3500	rpm
Rated torque	10	Nm
Peak torque	25	Nm
Stator Resistance [ $R_S$ ]	1.46	$\Omega$
Rotor Resistance [ $R_R$ ]	1.017	$\Omega$
Stator Inductance [ $L_S$ ]	0.362	H
Rotor Inductance [ $L_R$ ]	0.363	H
Mutual Inductance [ $L_M$ ]	0.102	H
Rotor inertia	0.48	$\text{kg}\cdot\text{cm}^2$
Inertia coefficient [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ]	0.00004	J
Weight	11.2	kg

#### 4.4 แบตเตอรี่

การเลือกใช้แบตเตอรี่ มีลักษณะในการพิจารณาลักษณะคล้ายกันกับในกรณีของมอเตอร์ คือ จำเป็นต้องพิจารณาถึงข้อจำกัดในเรื่องพื้นที่ ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ การเดินสายไฟภายใน รวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์ประจุไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ เป็นต้น นอกจากนี้เนื่องจากแบตเตอรี่มีน้ำหนักมาก จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงตำแหน่งการจัดวางให้ได้สมดุลน้ำหนักที่เหมาะสม สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ อุปกรณ์กักพลังงานไฮบริดจันั้น ในกรณีเลือกใช้มอเตอร์ ขนาด 5 kW สำหรับขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก ควรเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาดในช่วง 36-48 volt, 30 Ah ในการจ่ายพลังงานให้เพียงพอในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ที่ความต้องการระยะทางในการขับขี่ในช่วง 100-180 km ต่อการเติมประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง [15],[19]

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้เลือกแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนเนื่องจาก ความหนาแน่นพลังงานที่มากกว่า ใช้ระยะเวลาในการประจุน้อยกว่า ราคาถูกกว่า รวมถึงอัตราส่วนค่าใช้จ่ายต่อพลังงานที่เก็บได้มีค่าต่ำกว่า เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมโพลิเมอร์ (Lithium Polymer) นอกจากนี้ยังมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นกำลังงานที่สูงกว่า และน้ำหนักที่เบาอย่างมากเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด [6], [11] ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้ในยานยนต์ขนาดเล็กที่มีพื้นที่จำกัด โดยงานวิจัยได้เลือกใช้แบตเตอรี่ชนิด ลิเทียมไอออน ขนาด 36 volt, 20 Ah ความหนาแน่นพลังงานที่ 720 Wh เพื่อใช้ในทดสอบสำหรับ ยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ชนิด BLDC ขนาด 5 kW ที่มีน้ำหนักในช่วง 500-1000 kg. และความต้องการความเร็วในการวิ่งเฉลี่ยที่ 30-45 km/h ซึ่งเหตุผลในการเลือกใช้พิกัด กระแสของแบตเตอรี่ที่ 20 Ah เพื่อต้องการประเมินสมรรถนะในการช่วยเสริมพลังงานของตัวเก็บ ประจุที่ยังขาดในโหมดการเร่ง ในกรณีที่แบตเตอรี่ถึงค่ากระแสสูงสุดในการจ่ายให้มอเตอร์ โดย พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

Parameter	Min	Typ	Max	Units
Voltage output	32	36	54.6	V
Capacity (@ 25°C)		20		Ah
Energy		720		Wh
Discharging current (continuous)		25	30	A
Charging current (continuous)		15	18	A
Charging voltage			54.6	V
Width		145 (5.7)		mm (in)
Height		225 (8.8)		mm (in)
Length		155 (6.1)		mm (in)
Weight		8.6 (18.5)		kg (lb)
Discharge temperature range	-20		40	°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ขนาด 36 volt, 20 Ah

#### 4.5 การออกแบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด

สำหรับการพิจารณาการออกแบบ ในการเลือกชนิดและขนาดของ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อทำการไฮบริดจ์กับแบตเตอรี่นั้น ต้องพิจารณาในเรื่องสัดส่วนพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ เพื่อให้เหมาะสมในการจัดสรรพลังงานของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานทั้งสองชนิดในการจ่ายและรับพลังงานโหมดการทำงานต่างๆ ซึ่งสัดส่วนพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ไม่ควรต่ำกว่า 1 % ซึ่งในการเลือกขนาดตัวเก็บประจุยิ่งยวดควรเลือกให้เหมาะสมกับแรงดันของแบตเตอรี่ หรือตามโครงสร้างการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์ ซึ่งตามการพิจารณาในเรื่องสัดส่วนพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่นั้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดควรมีค่าแรงดันและค่าความจุไฟฟ้าสูง เพื่อใช้รองรับการช่วยเสริมกับแบตเตอรี่ในการจ่าย และรับพลังงานจากการเบรกที่เหมาะสม แต่เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีค่าแรงดัน และค่าความจุไฟฟ้าสูง จะมีราคาสูงขึ้นไปมากตามไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกขนาดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีค่าแรงดัน และค่าความจุไฟฟ้าในระดับที่ลดลงมา แต่เพียงพอเพื่อใช้ในการทดสอบเพื่อประเมินสมรรถนะของระบบที่นำเสนอในช่วงระยะเวลาการขับขี่สั้นๆ รวมถึงประเมินแนวโน้มของระยะทางในการขับขี่เมื่อเทียบกับระบบแบตเตอรี่อย่างเดียวได้

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาด 2.7 V 120 F จำนวน 18 เซลล์ ต่อแบบอนุกรม ทำให้ได้แรงดันรวมที่ 48 V โดยมีค่าความหนาแน่นพลังงานอยู่ที่ 2.18 Wh เพื่อใช้ไฮบริดจ์ร่วมกับแบตเตอรี่ขนาด 36 V 20 Ah ซึ่งทำให้สัดส่วนพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่นั้นอยู่ที่ 0.3 % ซึ่งเพียงพอเพื่อการประเมินสมรรถนะของระบบที่นำเสนอได้ในช่วงการขับขี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะสั้น (1 cycle) รวมถึงสามารถใช้ทดสอบเพื่อประเมินแนวโน้มของระยะทางในการขับที่เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้แบตเตอรี่อย่างเดียวได้ โดยพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่เลือกใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 4.5

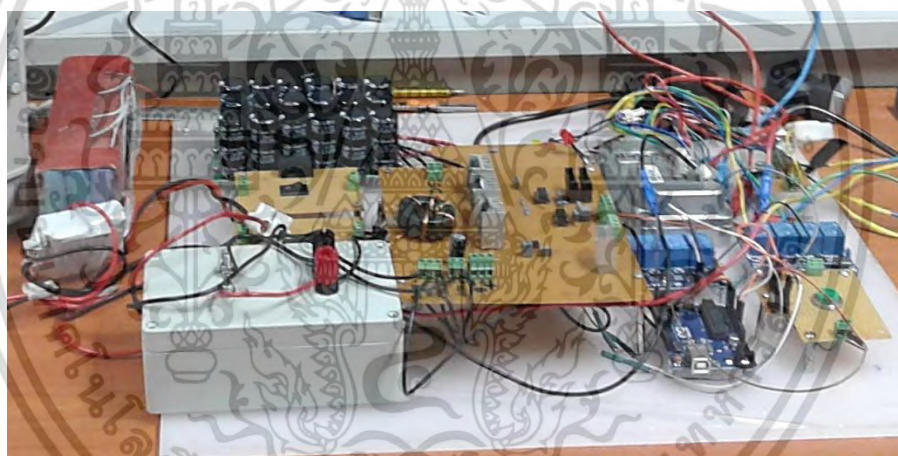
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแต่ละยี่ห้อ

Parameter	Rating		
	Spec in research	Green cap	Green cap
Product	Spec in research	Green cap	Green cap
Rated Voltage/Cell	2.7 V	2.5 V	2.7 V
Minimum Capacitance/Cell	120 F	500 F	1700 F
Voltage/pack (6pcs)	15-16 V	15 V	15-16 V
Capacity/pack (6pcs)	16-20 F	83.3 F	288.3 F
Type	EDLC	EDLC	EDLC
Maximum ESR	<2.1m $\Omega$	<3.8m $\Omega$	10m $\Omega$
Typical Specific Energy	4.82 Wh/kg	5.79 Wh/kg	3.03 Wh/kg
Typical Stored Energy	2.01 Wh	2.43 Wh	10.33 Wh
Operating temperature range	-40 ° C ~ 60 ° C	-40 ° C ~ 60 ° C	-40 ~ 70°C
Maximum Current	67.5	214 A	571 A
Leakage Current at 25°C	0.27 mA in 72hrs	<1.08mA in 72hrs	<1.32mA in 72hrs
Weight	21 g	70g	5 kg/6pcs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด 2.7 V 120 F 18 ต่อแบบอนุกรม

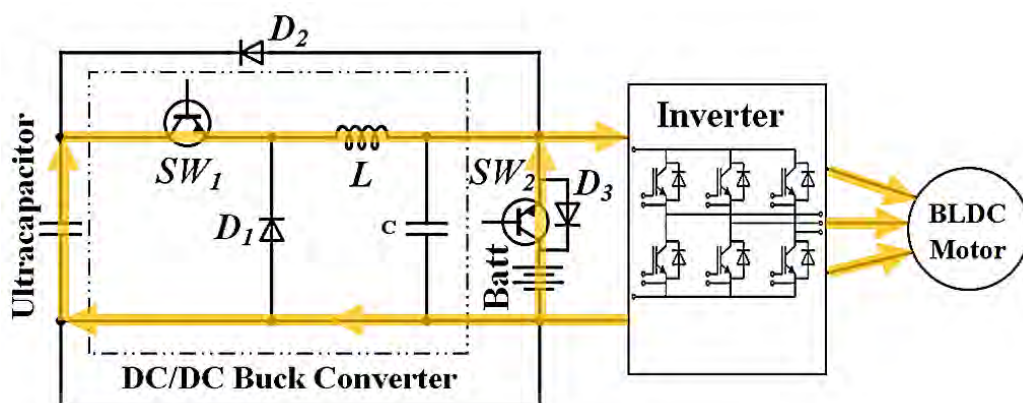


รูปที่ 4.5 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ที่ติดตั้งในระบบ HESS

#### 4.6 การออกแบบวงจรลดทอนระดับแรงดัน (DC/DC Buck Converter)

วงจรถอดทอนระดับแรงดัน/บัคคอนเวอร์เตอร์ แบบดีซีทูดีซี ชนิดทิศทางเดียว (unidirectional buck DC/DC converter) แสดงดังรูปที่ 4.6 บัคคอนเวอร์เตอร์ทำงานเมื่อมีการถ่ายโอนพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปที่ซีลิ่งค์โดยการควบคุม PWM เพื่อช่วยเสริมพลังงานพร้อมกับแบตเตอรี่ในระหว่างการเร่งของยานยนต์ไฟฟ้า หรือในกรณียานยนต์เข้าสู่ช่วงความเร็วสูงในการพิจารณาจบบัคคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งในการวิเคราะห์มีสองช่วงเวลาการทำงาน คือในกรณี SW สวิตช์เปิด และปิดใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

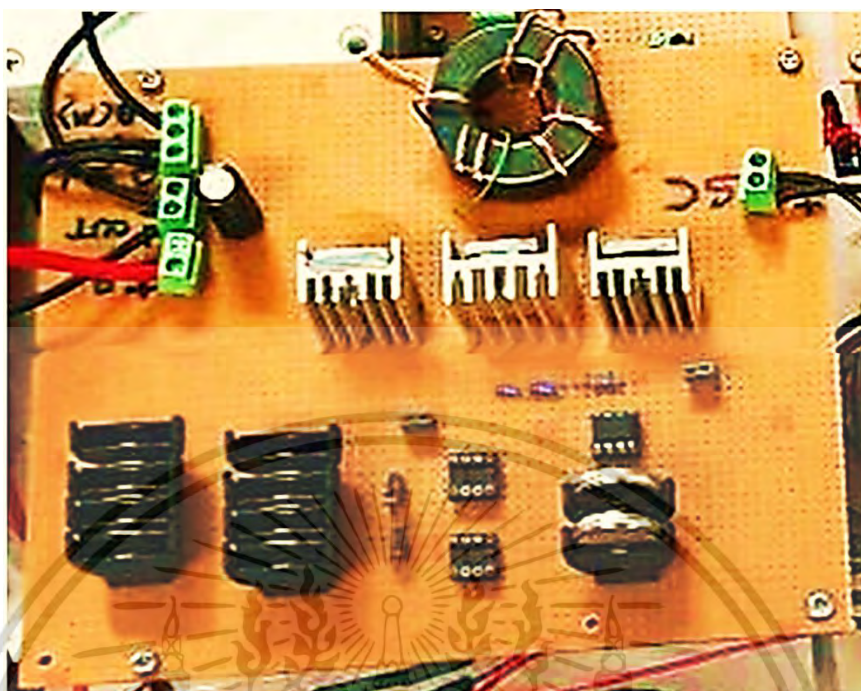


รูปที่ 4.6 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ของระบบ HESS ที่นำเสนอในโหมดเร่ง

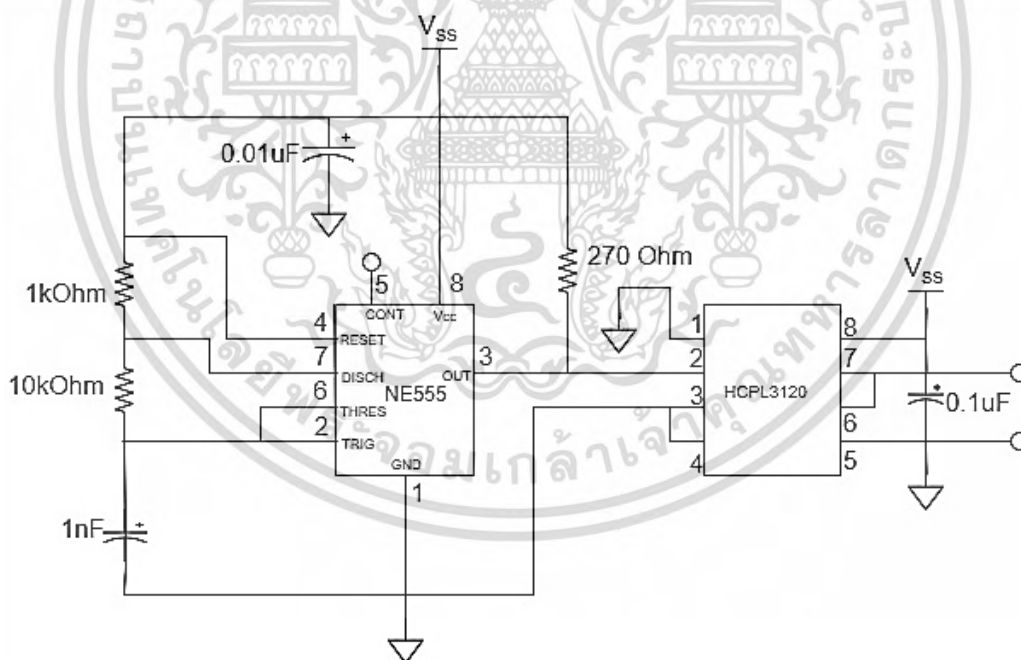
ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์

Parameter	Symbol	Value	Unit
Input Voltage	$V_{in}$	48	V
Output Voltage	$V_{out}$	24	V
Output Current	$I_{out}$	23.6	A
Working frequency		300	kHz
Inductor winding resistance	$R_L$	10	m $\Omega$
Switch on resistance	$R_{sw}$	5.9	m $\Omega$
Body diode resistance	$R_D$	12.4	m $\Omega$
Mosfet output capacitance	$C_{oss}$	1860	pF
Gate voltage	$V_g$	30	V
Reverse recovery charge	$Q_{rr}$	2	$\mu$ C
Conversion efficiency		87	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



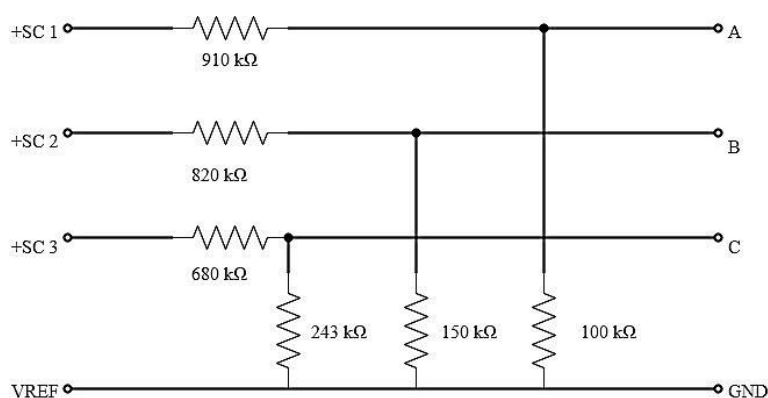
รูปที่ 4.7 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HESS ที่นำเสนอ



รูปที่ 4.8 วงจรสร้างสัญญาณขับมอสเฟต (MOSFET) โดย  $V_{SS}$  ของ IC NE555P เท่ากับ 6V

5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 วงจรแบ่งแรงดัน(Voltage divider circuit)

## 4.7 อินเวอร์เตอร์สามเฟส

การทำงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ประกอบไปด้วยสวิตช์ทั้งหมด 6 ตัว โดยที่มีส่วนควบคุมการทำงานของสวิตช์ทั้ง 6 ตัว โดยสวิตช์ที่ใช้ในวงจรจะเป็นมอสเฟต หรือ ไอจีบีที ขึ้นอยู่กับการออกแบบพิกัดแรงดัน และความเร็วในการสวิตช์ ในการเลือกใช้ IGBT ได้ออกแบบแรงดันที่ 800 V ทนกระแสสูงสุดที่ 10 A แต่ขนาดที่ต้องการไม่มีจึงได้เปลี่ยนเป็นเบอร์ IRG4PH40VD ซึ่งสามารถทนแรงดันได้ถึง 1200 และสามารถทนกระแสได้ถึง 47 A และมีความเร็วในการสวิตช์ที่สูง dc V

จากรูปที่ 1 แสดงแบบแผนผังการทำงานของ 3 เฟส เชื่อมต่อ bldc มอเตอร์แบบสตาร์ ซึ่งอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ใช้เพื่อจ่ายแรงดันให้ขดลวด bldc มอเตอร์ โดยที่มอสเฟต (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors : MOSFET) ใช้เพื่อโมเดล VSI 3 เฟส ในโปรแกรม Simulink สำหรับโมเดลในการจำลองผล อินเวอร์เตอร์สามเฟส แสดงดังรูปที่ 4.10

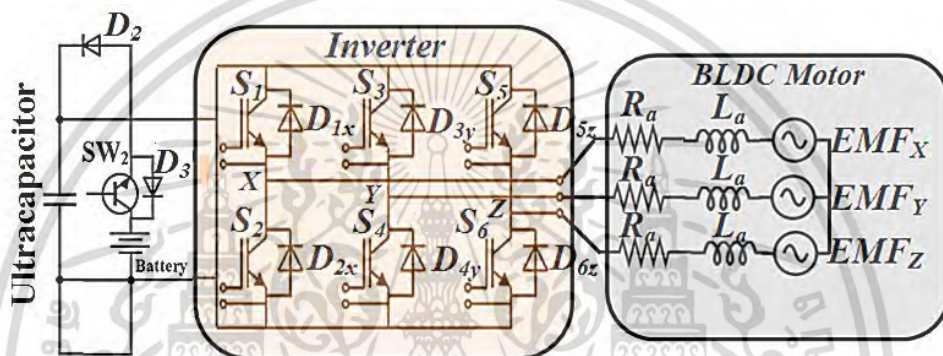
โดยที่แรงดันเวกเตอร์ของ VSI ได้กำหนดบนพื้นฐานของตำแหน่งสัญญาณฮอลล์เซนเซอร์ เซนเซอร์ Hall Effect จะทำการตรวจจับตำแหน่งของ permanent rotor ของมอเตอร์ BLDC ในการจำลองสัญญาณฮอลล์เอฟเฟคของมอเตอร์ bldc นี้ได้ดำเนินการโดย embedded Matlab code ตามองศาการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งรูปแบบการสวิตช์ของมอสเฟตในอินเวอร์เตอร์สามเฟส และสัญญาณฮอลล์เอฟเฟค แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สัญญาณ Hall Effect และสถานการณ์สวิตช์อินเวอร์เตอร์ของมอเตอร์ BLDC

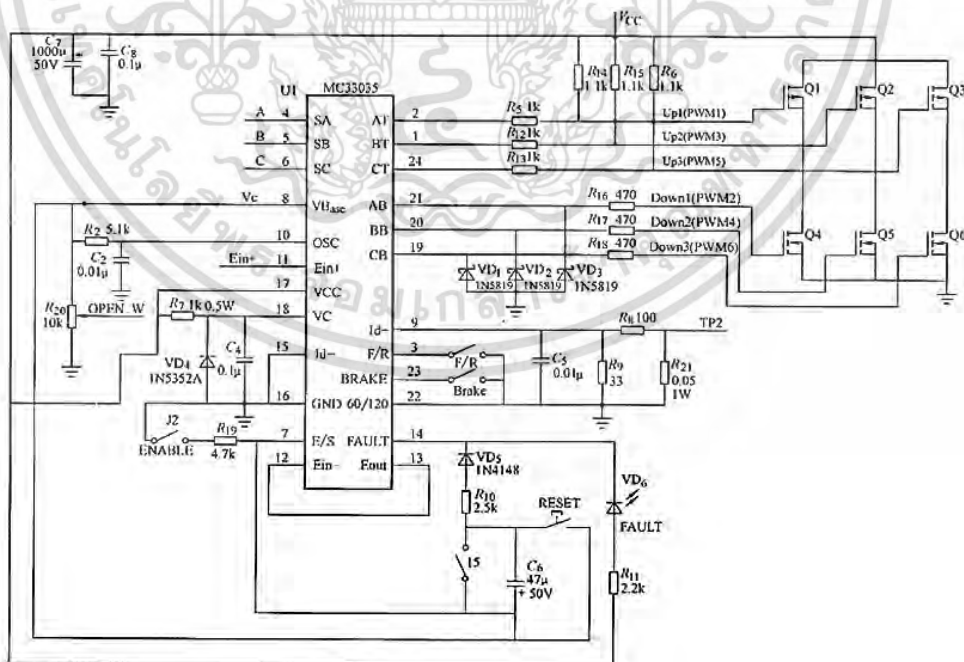
degree	Hall A	Hall B	Hall C	Inverter switches status					
				S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
0-60	0	1	0	On	Off	Off	Off	Off	On
60-120	1	1	0	On	Off	Off	On	Off	Off
120-180	1	0	0	Off	Off	Off	On	On	Off
180-240	1	0	1	Off	On	On	Off	On	Off
240-300	0	0	1	Off	On	On	Off	Off	Off
300-360	0	1	1	Off	Off	On	Off	Off	On

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ PWM ที่มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์ (Pulse) ที่มีความถี่ที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ไซเคิลได้ สัญญาณ PWM เกิดจากการนำระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุต มาเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปฟันเลื่อยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้หลังจากการเปรียบเทียบกันระหว่าง 2 สัญญาณ จะเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ไซเคิลแปรผันตามระดับของสัญญาณอินพุต (UIN) การทำงานของวงจรขับ จะสร้างสัญญาณ PWM จำนวน 6 สัญญาณที่จะปรับขนาดของแรงดันตามการปรับความถี่เพื่อสร้างสัญญาณ 3 เฟส โดยการบวกเพิ่มฮาร์มอนิกส์ที่ 3 เข้าไปด้วยทำให้แรงดันขาออกของสัญญาณ 3 เฟส มีขนาดเท่ากับแรงดันสูงสุดของแรงดันขาเข้า สัญญาณ PWM ทั้ง 6 สัญญาณจะถูกนำไปขับ IGBT จำนวน 6 ตัว เพื่อป้องกันการทำงานในเฟสเดียวกัน(Shoot Through) ในช่วงเวลาที่ IGBT ในเฟสเดียวกันหยุดทำงานทั้งสองตัวเราเรียกว่า Dead Time

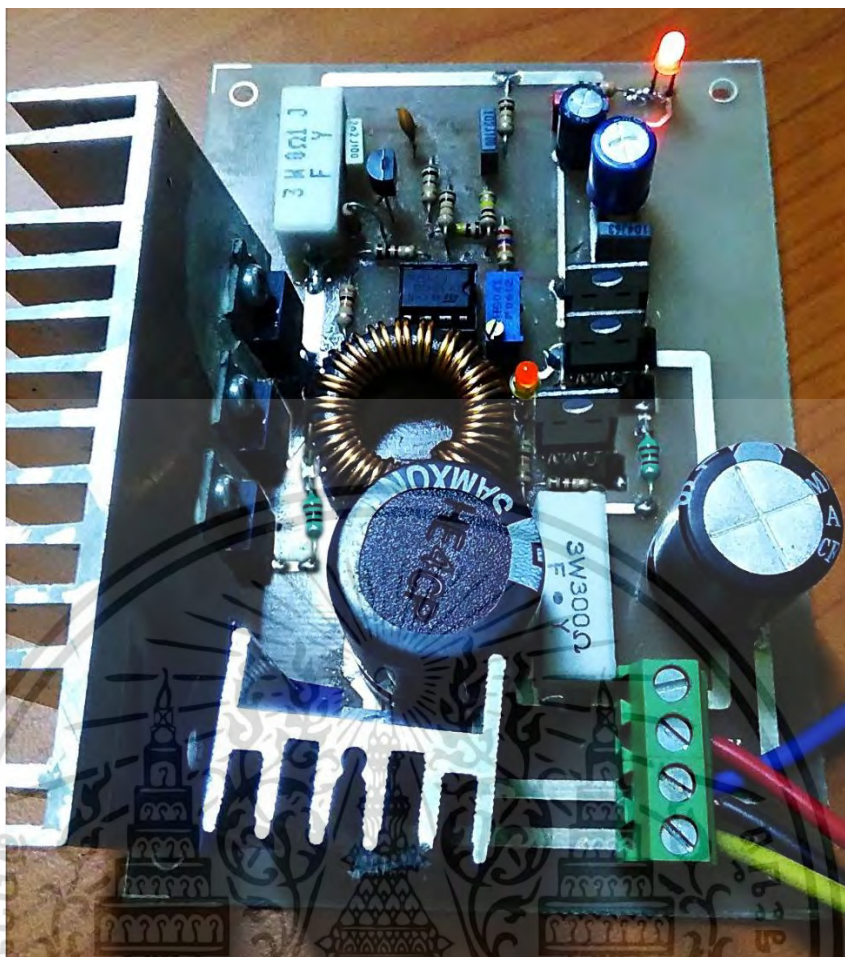


รูปที่ 4.10 วงจรในการจำลองผลอินเวอร์เตอร์สามเฟส

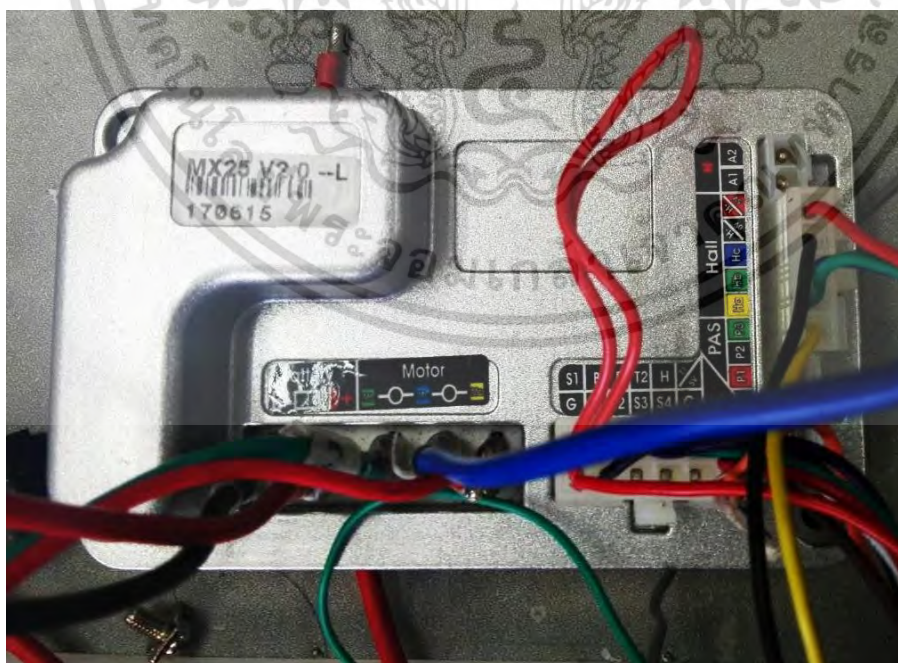


รูปที่ 4.11 วงจรควบคุมมอเตอร์ BLDC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 วงจรควบคุมมอเตอร์ BLDC ที่ออกแบบ

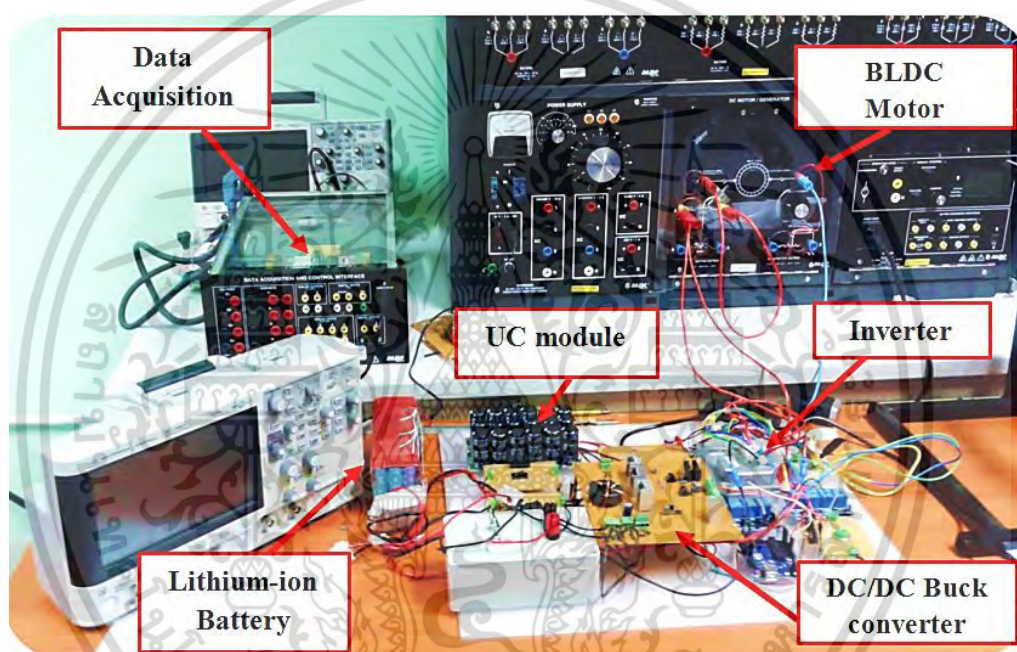


รูปที่ 4.13 วงจรควบคุมมอเตอร์ BLDC ยี่ห้อโกลเด้นมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

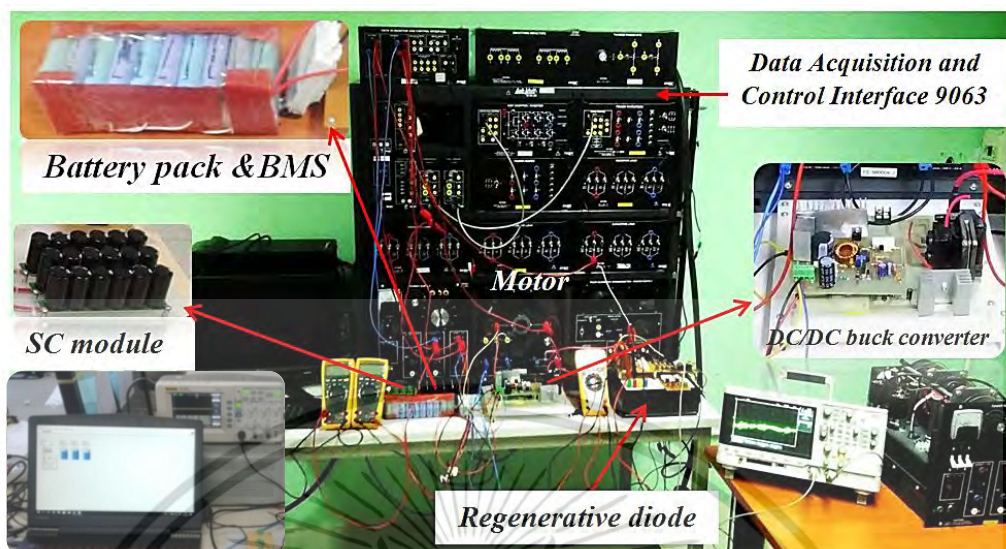
## 4.8 การทดสอบอุปกรณ์

ในขั้นตอนการทดสอบอุปกรณ์ โดยใช้ชุดเครื่องมือวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย เครื่อง Data Acquisition and Control Interface 9063 สำหรับวัดคุณสมบัติกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า, เครื่อง SMU Generator Expander HP 41501B, เครื่อง HP 4284A Precision LCR Meter, เครื่อง Low Leakage Switch HP E5050A และ Agilent technologies DSO-X-3034A โดยส่งงานผ่านคอมพิวเตอร์ควบคุมการวัด ดังรูปที่ 4.14 ถึง 4.15 โดยในรูปที่ 4.16 เป็นเครื่อง Data Acquisition and Control Interface 9063 รูปที่ Tektronix DPO2024 200 MHz Digital Phosphor Oscilloscope และเครื่อง Function generator Storage Oscilloscope และรูปที่ 3.40 เป็นเครื่อง Agilent B1500A Device Analyzer สำหรับควบคุมชุดเครื่องมือการทดสอบ



รูปที่ 4.14 ระบบ HESS ร่วมกับ RBS ที่นำเสนอ และชุดเครื่องมือการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ชุดการทดสอบระบบแบบแบตเตอรี่อย่างเดียวร่วมกับ RBS



รูปที่ 4.15 ทดสอบการขับเคลื่อนโดยใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักพลังงานเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 เครื่องวัด และเก็บบันทึกข้อมูล  
Data Acquisition and Control Interface 9063



รูปที่ 4.17 Tektronix DPO2024 200 MHz Digital Phosphor Oscilloscope  
และ Function generator Storage Oscilloscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

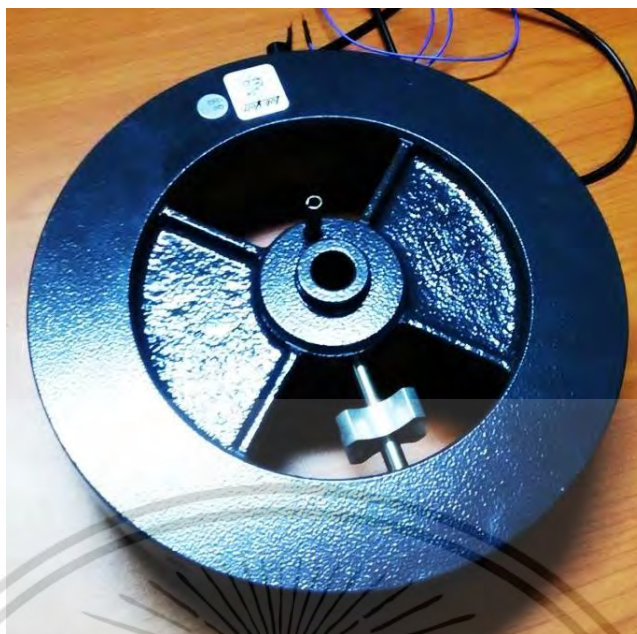


รูปที่ 4.18 มอเตอร์ BLDC 5 kW



รูปที่ 4.19 DAQ Card NI 6024E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



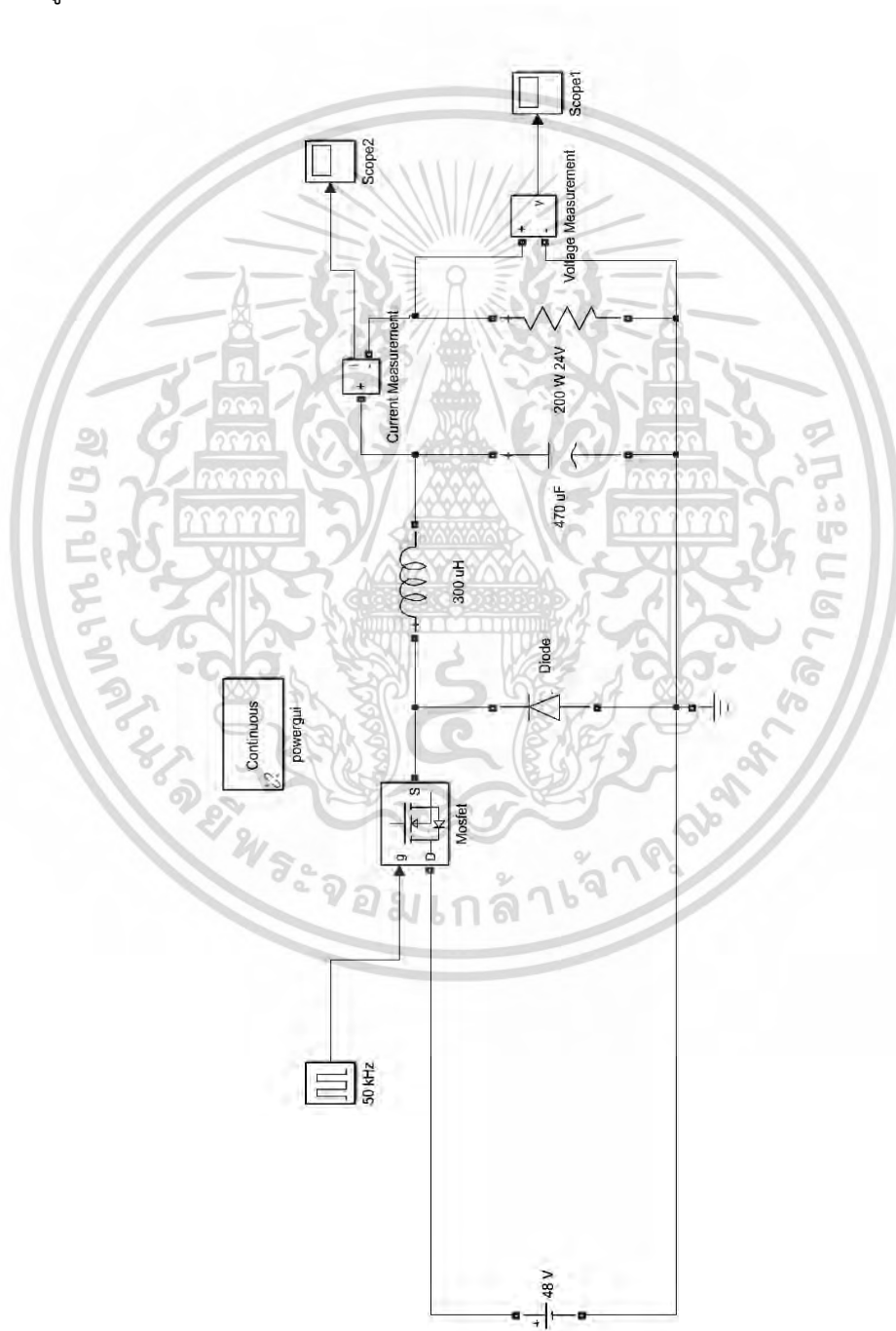
รูปที่ 4.20 Fly wheel ขนาด 7 กก.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

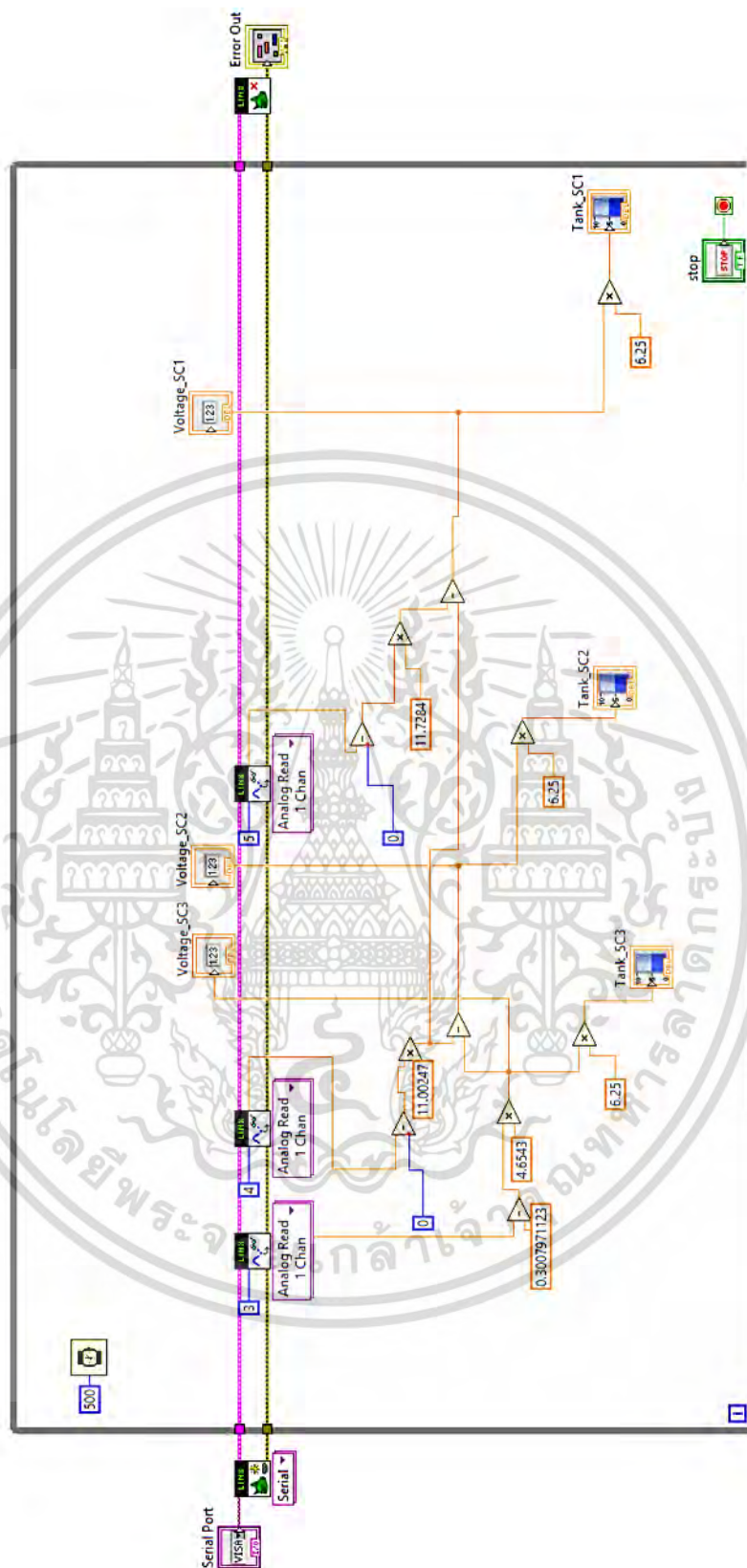
## 4.9 การออกแบบการจำลองผล

ในการออกแบบจำลองผลเพื่อใช้เปรียบเทียบกับ การทดสอบระบบกึ่งตัวนำกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery ที่นำเสนอ กับระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery ที่ไม่ใช้ระบบกึ่งตัวนำกำลังขณะเบรก และระบบที่ใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพียงอย่างเดียว โดยจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และใช้โปรแกรม LabView เพื่อใช้ในการแสดงข้อมูลสถานการณ์เต็ม และคายประจุออกทางหน้าจอ โดยการออกแบบการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.22



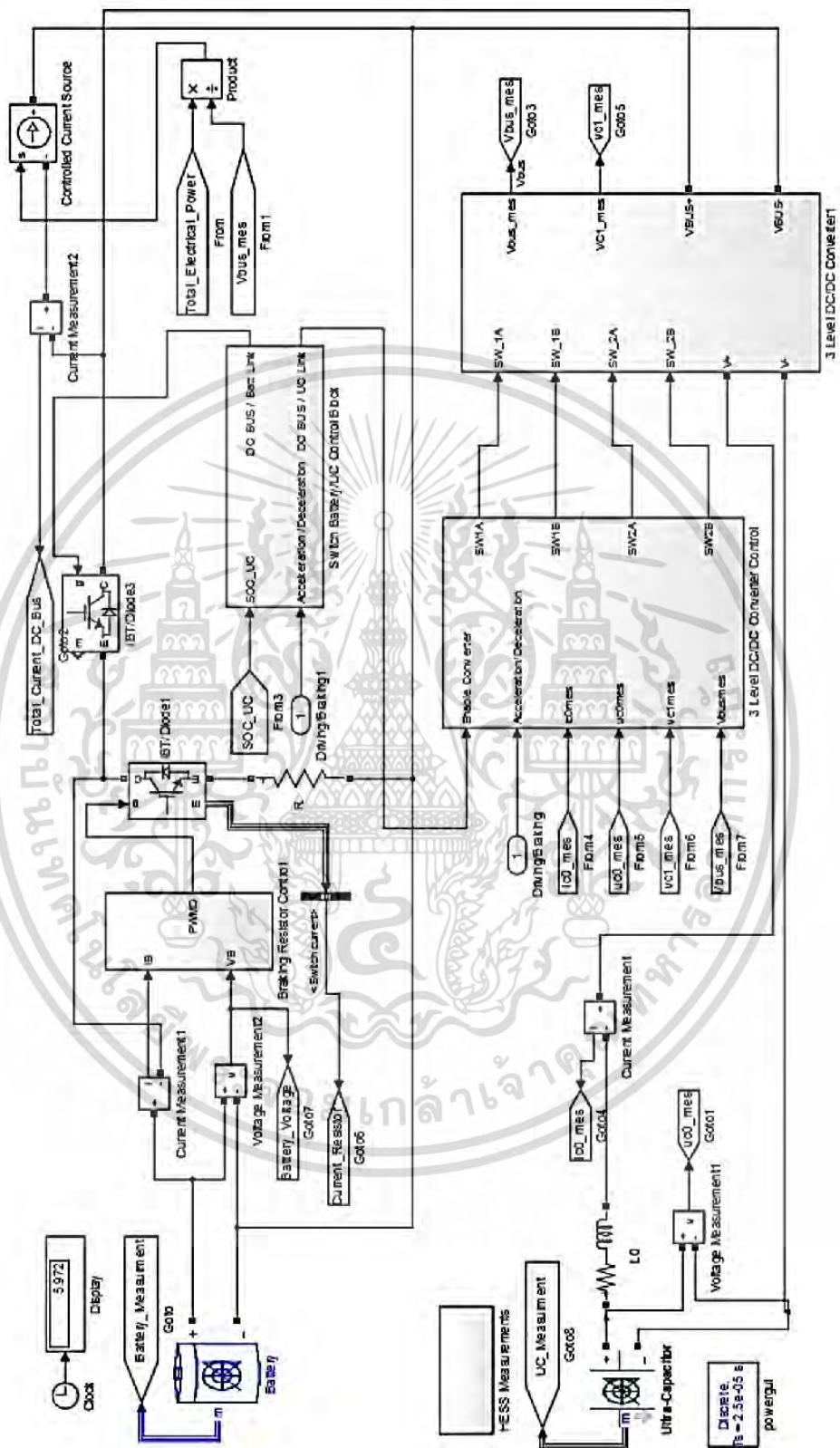
รูปที่ 4.22 ออกแบบจำลองวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



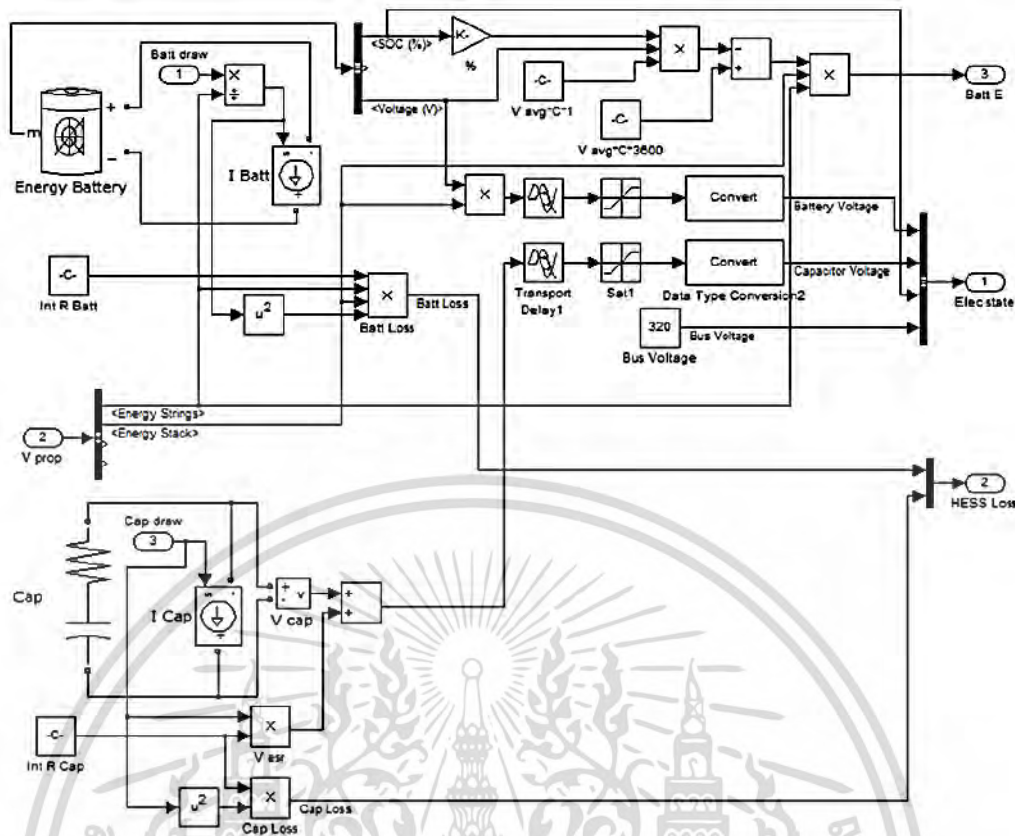
รูปที่ 4.23 ออกแบบจำลองในโปรแกรม LABVIEW เพื่อดูสถานะประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

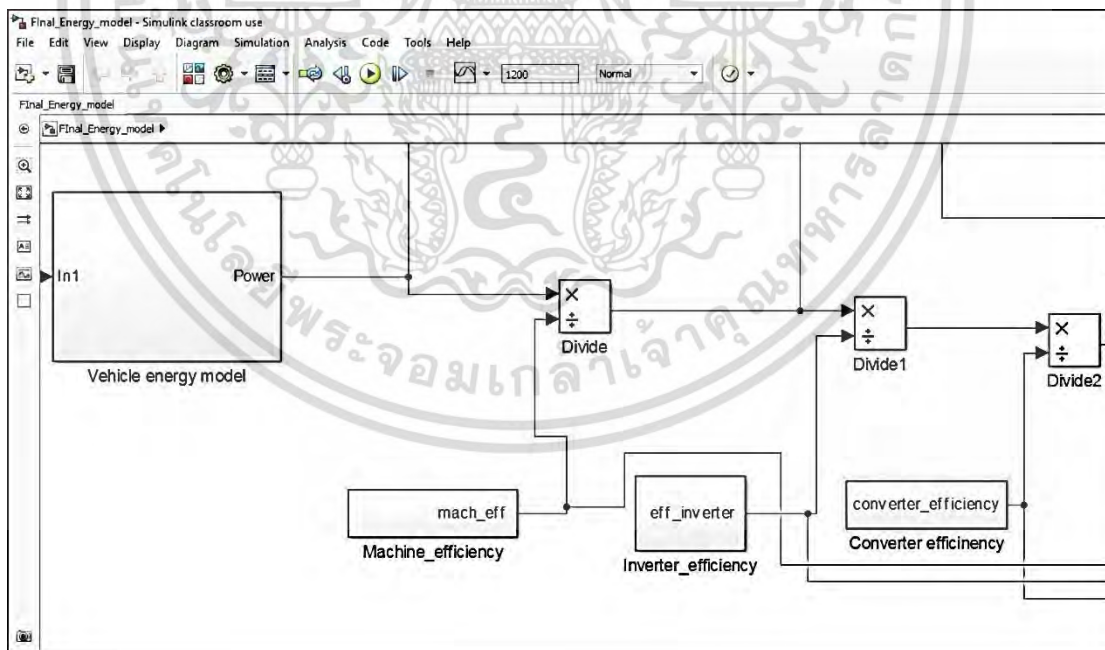


รูปที่ 4.24 ออกแบบจำลองระบบ HESS SC/Battery

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

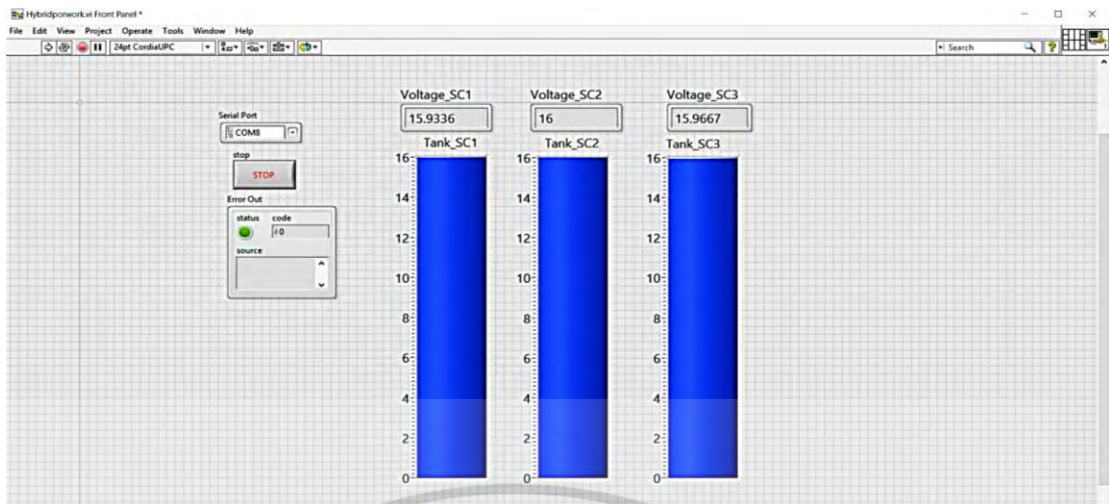


รูปที่ 4.25 ออกแบบจำลองระบบควบคุม PI ของระบบ HESS แบบ SC/Battery

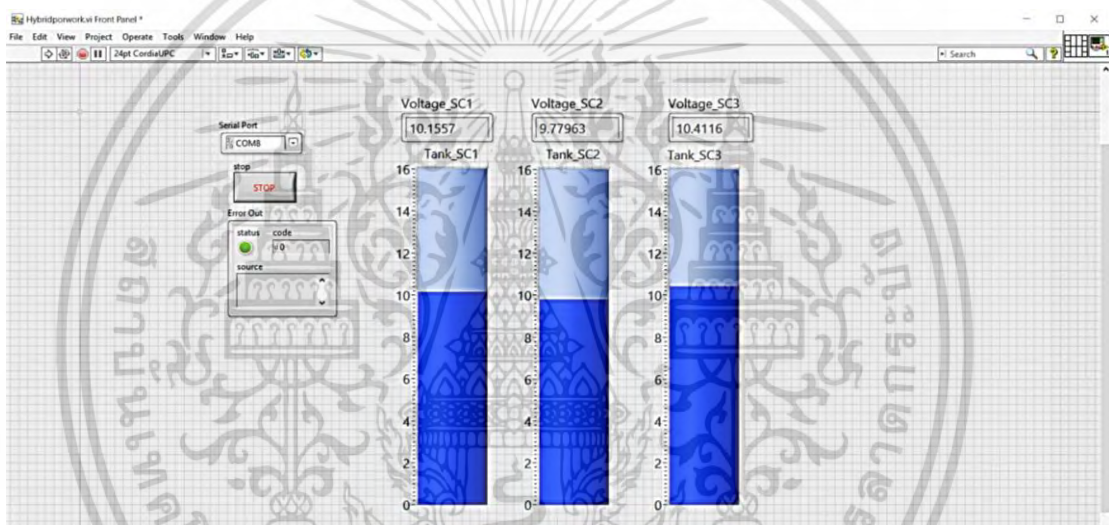


รูปที่ 4.26 โมเดลสำหรับจำลองหาค่าประสิทธิภาพของระบบ HESS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แท่งแสดงระดับแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแต่ละชุดขณะชาร์ตเต็ม



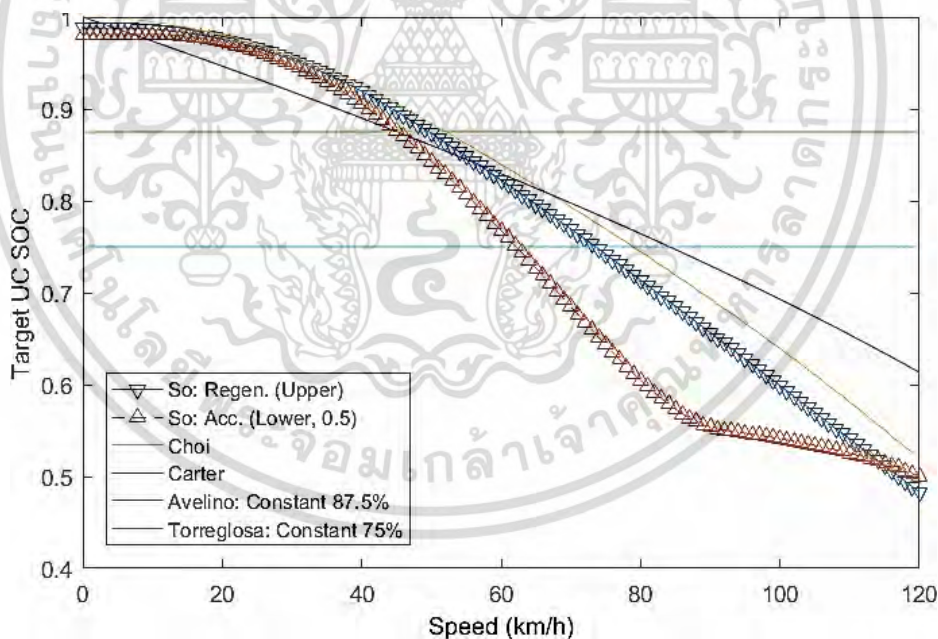
รูปที่ 4.28 แท่งแสดงระดับแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแต่ละชุดขณะการคืนกำลังขณะเบรก

จากการทดสอบการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยการวัดระดับแรงดันของตัวเก็บประจุแต่ละชุดด้วยโปรแกรม LABVIEW พบว่าเมื่อทำการชาร์ตพลังงานให้ตัวเก็บประจุจนเต็มระดับแรงดันในแท่งแต่ละชุดตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นดังนี้ ชุดที่ 1 15.93 V ชุดที่ 2 16 V ชุดที่ 3 15.96 V ซึ่งพบว่ามีความต่างเล็กน้อยเนื่องจากความคลาดเคลื่อนจากการปรับตำแหน่งอ้างอิงแรงดันดังรูปที่ 3.27 และเมื่อทำการเร่งความเร็วมอเตอร์ระดับแรงดันตัวเก็บประจุลดลงจนมีค่าดังนี้ ชุดที่ 1 10.15 V ชุดที่ 2 9.77 V ชุดที่ 3 10.41 V และคงที่ดังรูปที่ 3.28 โดยใช้เวลาในการลดลง 20 วินาทีนับจากเริ่มกดคันเร่งมอเตอร์ แสดงว่าตัวเมื่อแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเต็มพิกัด 48 โวลต์และต่อเข้ากับระบบการจัดการการกักเก็บพลังงานตัวเก็บประจุสามารถจ่ายพลังงานให้กับระบบได้เมื่อแรงดันของตัวเก็บประจุมากกว่า 30.34 V หรือรูปแบบของวงจรนี้ สามารถดึงพลังงานจากตัวเก็บประจุได้ 36.78 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองผลระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอ จะเริ่มจากการจำลองเพื่อเปรียบเทียบระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอกับระบบอื่น[4] ลำดับต่อมาเป็นการจำลองเพื่อเปรียบเทียบระบบการจัดสรรพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ กับกฎการจัดสรรพลังงานพื้นฐานแบบอื่น [18] จากนั้นเป็นการจำลองผลระบบรวมทั้งหมดจากระบบการขับขี่ของยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอว่าสามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการได้ สุดท้ายเป็นการจำลองผลรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ (battery cycle life) เพื่อแสดงการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ที่นำเสนอเปรียบเทียบกับ ระบบที่ใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพียงอย่างเดียว

โมเดลและอัลกอริทึมก่อนการอินทิเกรท ซึ่งแสดงวิธีการจำลองโดยการประมวลผลแบบย้อนกลับ พร้อมแยกส่วนอัลกอริทึมของ EMS และ PMS โมเดล และรอบการขับขี่ (drive cycle) อีกหนึ่งข้อมูลของรอบการขับขี่  $v(j)$  และ  $\theta(j)$  ได้ถูกใส่เข้าไปในโมเดลยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อคำนวณกำลังงานรวมที่ต้องการทั้งหมด EMS สร้างระดับพลังงานของ SC บนพื้นฐานของความเร็วยานยนต์ที่จะบรรลุกำลังงานที่เพียงพอในการเร่ง และเพียงพอสำหรับการกักเก็บพลังงานจากการเบรกคืนกำลัง ต่อมาข้อมูลเหล่านี้จะถูกใส่เข้าไปในระบบการจัดการพลังงาน PMS, ซึ่งใช้ตัดสินใจในการจัดสรรพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ ซึ่งได้ทำงานตามระดับกำลังงานของ SC และ การจำกัดพลังงานของแบตเตอรี่ เมื่อการจัดสรรพลังงานได้ถูกกำหนด โมเดลของ SC และ แบตเตอรี่ จะทำการอัปเดตเพื่อประเมินการสูญเสีย แล้วรอบการทำงานนี้จะถูกวนซ้ำสำหรับรอบขับขี่ภายหลัง



รูปที่ 4.29 สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เทียบกับความเร็ว

จากรูปที่ 4.29 แสดงแถบสถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยที่สามเหลี่ยมแบบง่าย แสดงค่า upper limit และเส้นสามเหลี่ยมแบบคว่ำค่า lower limit ในการเปรียบเทียบทำโดยใช้ระบบงานอื่น โดยที่อัลกอริทึมของระบบอื่นจะถูกใส่เข้าไปรูปแบบของยานยนต์นี้ ซึ่งอัลกอริทึมของระบบอื่น เช่น กลุ่มระดับกำลังงานของตัวเก็บประจุคงที่ หรือ กลุ่มความเร็วไม่อิสระระดับกำลังงานของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่ [13] ใช้หลักการของระดับพลังงานตัวเก็บประจุที่ขึ้นกับความเร็ว [20] เส้นสีส้มและลากขึ้นเหนือค่าจำกัดสูงกว่าที่ความเร็วมากกว่า 45 km/h. ที่ต่ำกว่า 45 km/h ลักษณะกราฟอยู่ในหรือใกล้แถบ อย่างไรก็ตามวิธีการคำนวณดังกล่าวมีข้อแตกต่างจากระบบที่นำเสนอ โดยที่ระบบที่นำเสนอสามารถให้ผลที่เป็นไปได้มากกว่า เนื่องจาก [15] ใช้ค่าการชะลอสูงสุดในการคาดการณ์พลังงานที่คืนกลับล่วงหน้าจากการเบรกคืบกำลัง อย่างไรก็ตามเรทการชะลอสูงสุดไม่สอดคล้องสำหรับกรณีค่าต่ำสุดในการคืนพลังงาน เป็นเพราะการเบรกเชิงกลแบบเสียดทานถูกใช้งานที่เรทการชะลอสูง โดยที่กรณีสถานการณ์ที่ค่าต่ำที่สุดถูกสรุปไว้ นอกจากนี้วิธีดังกล่าวได้เสนอการชาร์จพลังงานจากการเบรกคืบกำลังทั้งหมดเข้าสู่ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งในขั้นของระบบก็เก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอ การชะลอแบบแรงบิดคงที่ ซึ่งสามารถคืนกำลังงานจากการเบรกได้เกือบทั้งหมดผ่านทั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่

ในส่วนของ [14] ยังได้ใช้หลักการของกราฟพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดขึ้นกับความเร็ว [25] เส้นสามเหลี่ยม ซึ่งค่าตกลงมาต่ำกว่า และสูงกว่าแถบอ้างอิง ซึ่งการคำนวณบนพื้นฐานการตั้งสมมติฐานว่าพลังงานจลน์ทั้งหมดจะคืนกลับเข้าสู่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดซึ่งคล้ายกับในกรณีของ [15] ซึ่งพลังงานจลน์ทั้งหมดไม่สามารถนำกลับคืนมาทั้งหมด เนื่องจากบางส่วนจะสูญเสียไปจากการเบรกเชิงกล และบางส่วนสูญเสียไปโดย electrical losses หรือ mechanical losses ซึ่งในทางตรงกันข้ามระบบก็คืนกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่นำเสนอ ซึ่งพิจารณาจากสถานการณ์เบรกในหลายเงื่อนไข พร้อมรอบการขับขี่เสมือนจริง

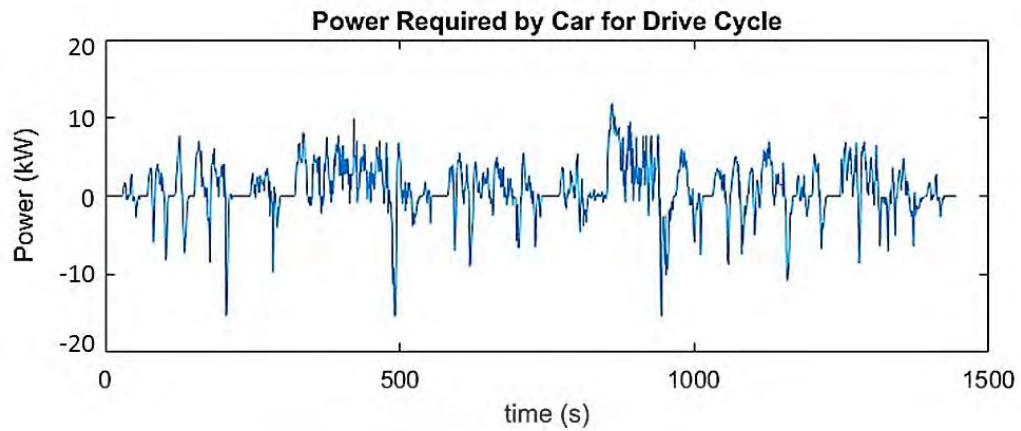
#### 4.10 รอบการขับขี่ (Drive Cycles)

ยานยนต์ไฟฟ้าได้ถูกจำลองผ่านสามรอบการขับขี่ โดยใช้ รอบการขับขี่แบบ INRETS Route1 และแบบ LAFTP-72 ซึ่งการจำลองถูกแบ่งเป็นสามส่วนหลักๆ เพื่อเปรียบเทียบเชิงวิเคราะห์ผลตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยแบ่งเป็นวัตถุประสงค์การกักเก็บพลังงานอย่างเพียงพอของตัวเก็บประจุยิ่งยวด การใช้การจัดสรรพลังงานโดยใช้ HESS และ EMS (Battery only)

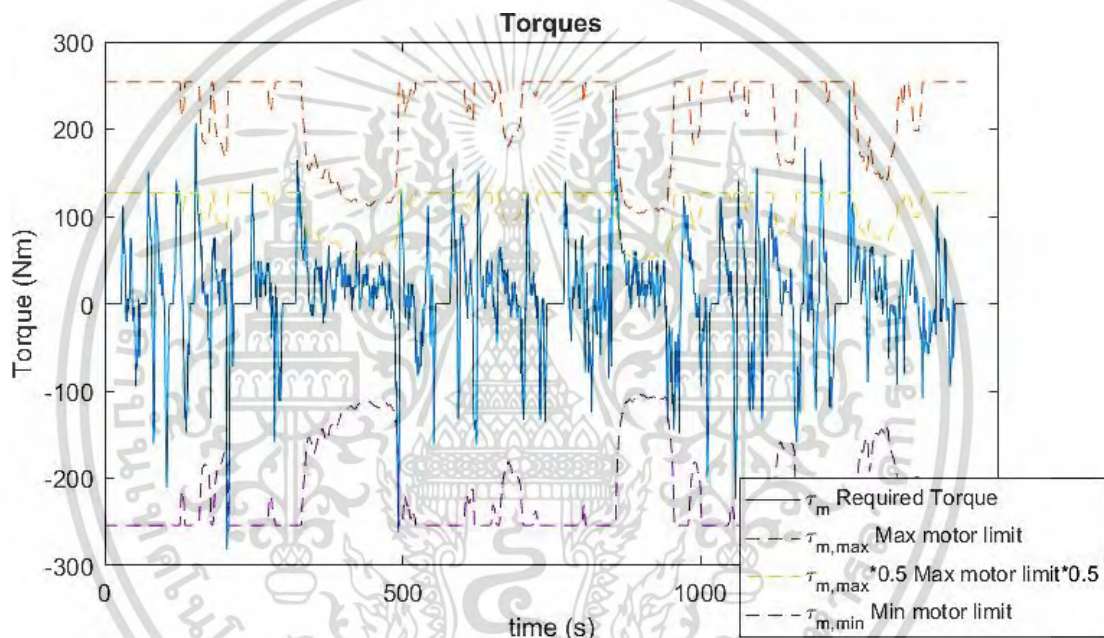
##### 4.10.1 LAFTP-72 Drive Cycle

จากการระบุอัลกอริธึมแรงบิดการเบรก (brake torque) และ แรงบิดการเร่ง ในกรณีการขับขี่ที่แรงบิดการเบรกที่มากที่สุดที่ความเร็วมากกว่า 60 km/h เพื่อหยุดรถ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีสถานะไม่เพียงพอ และไม่สามารถดูดซับพลังงานได้สมบูรณ์ และในกรณีที่ขับขี่ที่การเร่งสูงกว่าอัตราส่วนแรงบิดการเร่ง (acceleration torque ratio) ที่ 0.5 ซึ่งอาจทำให้มีพลังงานไม่เพียงพอในการใช้ความเร็วต่อเนื่อง

ดังนั้นรอบการขับขี่แบบ LAFTP-72 (รูปที่ 4.30) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้มีบางอัลกอริธึมที่ออกแบบไม่สอดคล้องในบางสถานการณ์ แต่ยังสามารถทนต่อการขับขี่ที่เป็นอุปสรรคต่อไปได้

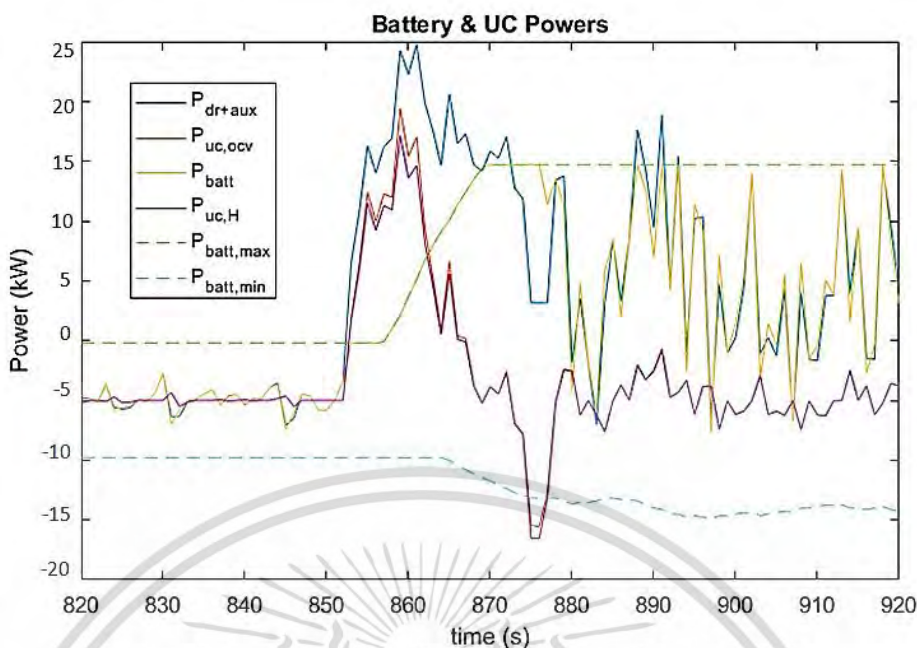


รูปที่ 4.30 ความต้องการพลังงานในรอบการขับขี่แบบ LAFTP-72



รูปที่ 4.31 แรงบิดของยานยนต์ในรอบการขับขี่แบบ LAFTP-72

จากรูป 4.31 แสดงโปรไฟล์แรงบิดสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ขับขี่โดยใช้รอบการขับขี่แบบ LA92 drive cycle บางส่วนของความต้องการแรงบิดมีค่ามากกว่า 0.5 ของข้อจำกัดของมอเตอร์ ซึ่งหมายถึงยานยนต์ที่การเร่งที่มากกว่าค่าอัตราส่วนแรงบิดการเร่งที่ออกแบบ  $T_{acc} \text{ ratio} = 0.5$ , แม้เพียงช่วงระยะสั้นๆ



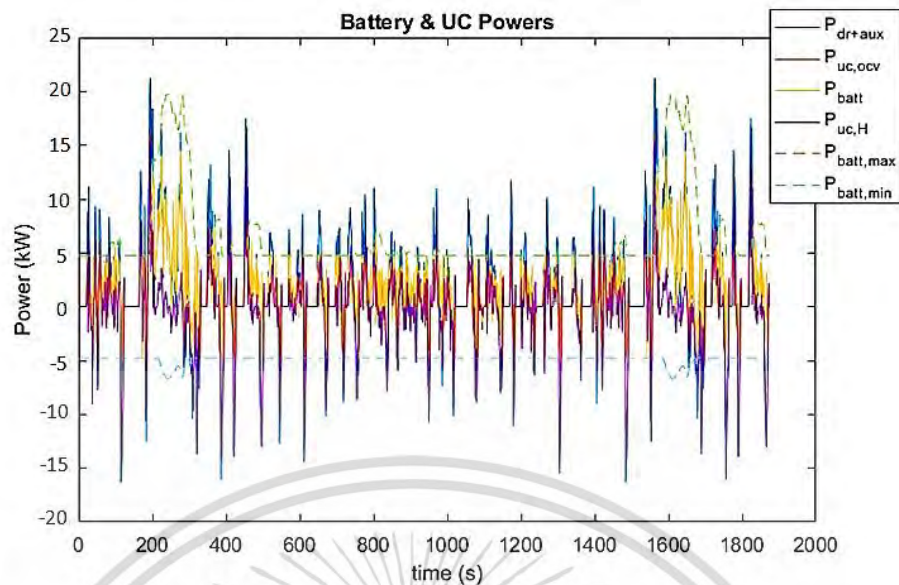
รูปที่ 4.32 การกระจายกำลังงานของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ที่ 820-920s.

จากรูปที่ 4.32 แสดงโปรไฟล์ของกำลังงาน และการแบ่งพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ โดยใช้เทคนิค และวิธีการจัดการพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ ที่ความต้องการกำลังงานที่เกินกว่าค่าจำกัดของแบตเตอรี่ ( $P_{batt,max}$ ) กำลังงานของแบตเตอรี่จะถูกตัดที่ค่าสูงสุดของแบตเตอรี่  $P_{batt,max}$  โดยที่กำลังงานส่วนเกินจะถูกจัดการโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่ง  $P_{uc,ocv}$  สำหรับคอนเวอร์เตอร์ด้านกำลังงานต่ำ และ  $P_{uc,H}$  สำหรับ คอนเวอร์เตอร์ด้านกำลังงานสูง

#### 4.10.2 รอบการขับขี่แบบ INRETS Route1 (INRETS Route1 Drive Cycle)

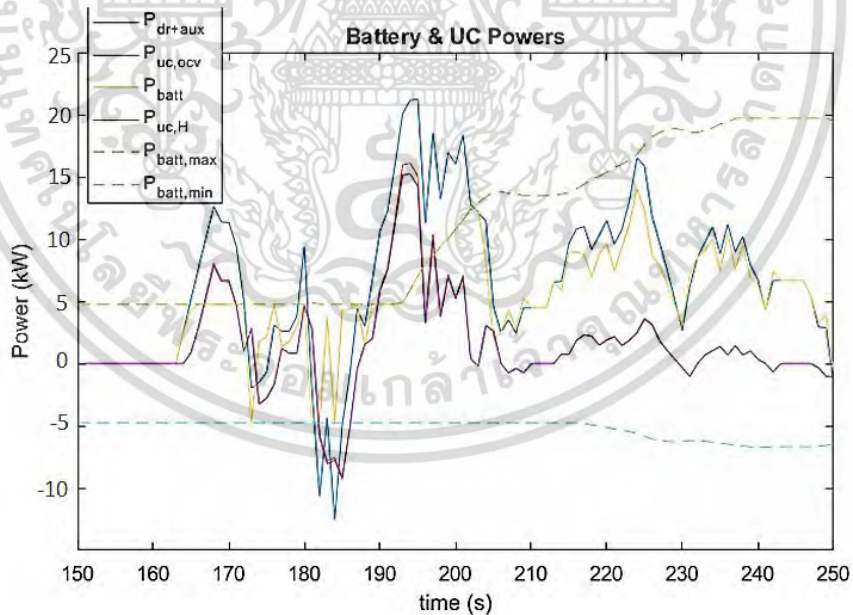
สำหรับการประเมินเทคนิค และวิธีการจัดการพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอ ได้สาธิตในรอบการขับขี่แบบ LAFTP-72 ซึ่งรอบการขับขี่แบบ LAFTP-72 ยังได้แสดงให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอ สามารถทนต่อรอบการขับขี่ที่เป็นอุปสรรคได้แม้ไม่ได้ถูกออกแบบมาใช้กับรอบการขับขี่นี้โดยเฉพาะ อีกทั้งแสดงค่าจำกัดของแบตเตอรี่ที่ขึ้นกับความเร็ว

จากรูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ของโปรไฟล์กำลังงาน และการจัดสรรพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่โดยใช้เทคนิค และวิธีการจัดการพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ที่นำเสนอ และ รูปที่ 4.33 แสดงค่าสถานะประจุที่แตกต่างกัน



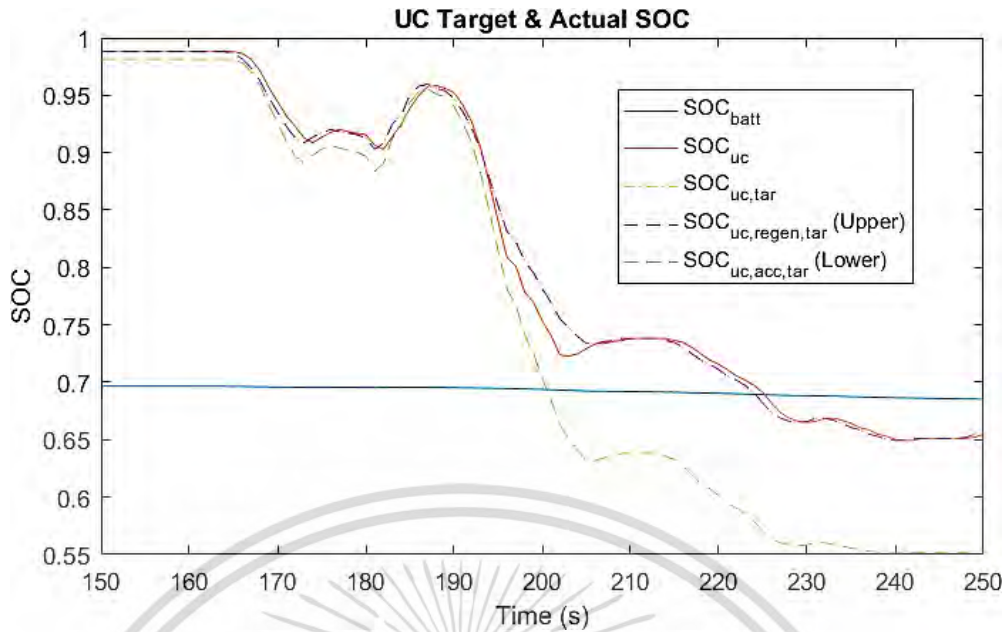
รูปที่ 4.33 การกระจายกำลังงานของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ที่รอบการขับขี่แบบ INRETS Route1

ที่รอบการขับขี่แบบชั่วขณะของ INRETS Route1 ทำถูกขยายส่วนให้เห็นระหว่างช่วงเวลาที่ 150s และ 250 s ได้แสดงดังรูปที่ 5-16 และ 5-17 โดยที่มีความต้องการพลังงานสูง



รูปที่ 4.34 การกระจายกำลังงานของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ที่รอบการขับขี่แบบ INRETS Route1 ที่ช่วงเวลา 150-250 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ที่รอบการขับขี่แบบ INRETS Route1 ในช่วงเวลา 150-250 วินาที

คล้ายกันกับการจำลองโดยรอบการขับขี่แบบ INRETS route1 จากรูปที่ 4.34 แสดงกำลังงานของแบตเตอรี่จะถูกตัดที่ค่าค่าสูงสุดของแบตเตอรี่  $P_{batt,max}$  ที่ประมาณ 200s โดยกำลังงานที่เกินมาจะถูกจัดการโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวด จากรูปที่ 4.37 กราฟสถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (เส้นสีแดง) จะเบี่ยงจากกลุ่มสถานะประจุ (SOC) ใกล้ตำแหน่ง 200s ที่เกินค่าจำกัดของแบตเตอรี่  $P_{batt,max}$  เนื่องจากอัลกอริทึมของลำดับชั้นการป้องกันเกินค่าจำกัดของแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะจ่ายพลังงานปริมาณมาก เป็นผลให้สถานะประจุลดต่ำลง พารามิเตอร์ของรอบการขับขี่แบบ INRETS route1 และ LAFTP-72 แสดงดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ของรอบการขับขี่แบบ INRETS route1

Parameter	Value	Unit
Cycle name	INRETS route1	-
Distance	8069.57 m	m
Total time	900	s
% of accelerating time	12.79	%
% of decelerating time	42.79	%
% of braking time	30.24	%
% of cruising time	6.19	%
Average speed	31.7	km/h
Maximum speed	64.48	km/h
Average negative acceleration	-0.663	m/s <sup>2</sup>

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ของรอบการขับขี่แบบ LAFTP-72

Parameter	Value	Unit
Cycle name	LA FTP-72	-
Distance	10996.78	m
Total time	1265	s
% of accelerating time	41.78	%
% of decelerating time	31.19	%
% of braking time	19.80	%
% of cruising time	18.05	%
Average speed	50.9	km/h
Maximum speed	70.22	km/h
Average positive acceleration	0.429	m/s <sup>2</sup>
Average negative acceleration	-0.464	m/s <sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.11 อายุรอบการใช้งานของแบตเตอรี่

ตารางที่ 4.10 ผลการจำลองอายุรอบใช้งาน (cycle life) เปรียบเทียบระหว่าง SC/battery และ Battery-only

Type	Parameter	LAFTP-72	INRETS Route1
SC/battery	Days	4,035	3,260
	Avg. of C-rate	0.25	0.32
	Loss (%)	17.9	20.2
Battery-only	Days	2,962	2,558
	Avg. of C-rate	0.35	0.45
	Loss (%)	25.1	29.2
Battery Cycle Life Extension (%)		36.22 %	27.44

จากการจำลองโดยใช้โมเดลสำหรับประเมินอายุการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงานแบบ SC/battery และ Battery-only [30], [31] ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานทั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ การสูญเสียของระบบ [8] รวมถึงข้อมูลในรอบการขับขี่

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ในระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ เทียบกับระบบที่ใช้แบตเตอรี่อย่างเดียว โดยที่อายุการใช้งานสามารถวัดได้จากค่าปริมาณการสูญเสียของระบบ โดยการเปรียบเทียบในรอบการขับขี่แบบ LAFTP-72 และ INRETS Route1 เมื่อคำนวณจากจำนวนวันในการใช้งาน อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ในระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ มีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น 36.22% และ 27.44 เมื่อเทียบกับแบบแบตเตอรี่อย่างเดียว จากผลดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นแนวโน้มด้านความคุ้มค่าในการขับขี่ในระยะยาวของระบบ HESS ได้

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ระบบกักเก็บกำลังขณะเบรกที่นำเสนอได้ทำการจำลอง และทดสอบ โดยใช้รอบการขับขี่แบบ INRETS route1 เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบกักเก็บกำลังขณะเบรก ซึ่งมีระยะทางของรอบการขับขี่อยู่ที่ 8069.18 เมตร ใช้เวลาขับขี่ทั้งหมดต่อหนึ่งรอบที่ 900 วินาที ยานยนต์ใช้ความเร็วสูงสุดที่ 64.48 กม./ชม. และใช้เวลา 42.79% ของเวลาขับขี่ต่อหนึ่งรอบในการชะลอ โดยที่อุปกรณ์ทั้งหมดของยานยนต์ไฟฟ้าประกอบด้วยมอเตอร์ BLDC แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด เป็นต้น ซึ่งถูกโมเดลโดยกราฟเปรียบเทียบ (look-up tables) และประสิทธิภาพของแผนที่บนพื้นฐานการทดสอบเชิงประจักษ์ รวมถึงค่าซีพ เป็นต้น การโมเดลโดยใช้ความเร็วที่ต้องการสำหรับอินพุท และกำหนดกำลังงาน ความเร็ว และแรงบิดของระบบขับเคลื่อนเพื่อตอบสนองความเร็วของยานยนต์ โดยที่พารามิเตอร์โดยรวมของระบบที่ใช้สำหรับจำลอง และการทดสอบผล แสดงในตารางที่ 4.1 นอกจากนี้พารามิเตอร์ในการทำงานของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด แสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5

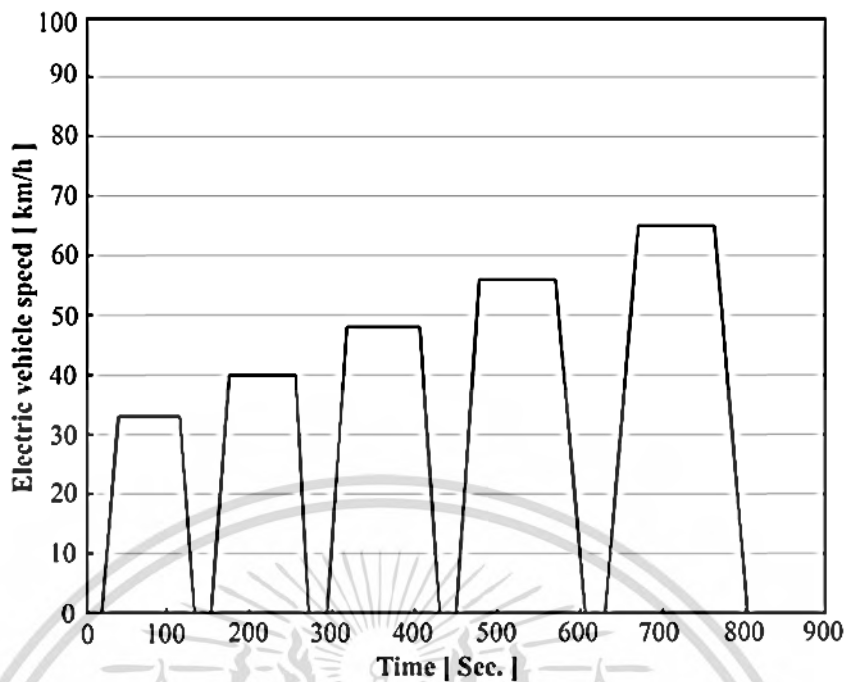
#### 5.1 รูปแบบที่ใช้ในการจำลอง และทดสอบระบบ HESS

จากรูปที่ 5.1 ก และ 5.1 ข แสดงกราฟความเร็วรอบการขับขี่ (drive-cycle speed curve) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองผลและการทดสอบ จากกราฟ เริ่มที่ยานยนต์เริ่มเร่งจากหยุดนิ่ง และเริ่มเข้าสู่ความเร็วคงที่ หลังจากนั้นจะชะลอแล้วหยุดนิ่ง กระบวนการขับขี่นี้จะทำซ้ำกันอีก 2-4 รอบที่ความเร็วคงที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้สภาพแวดล้อมการขับขี่เสมือนจริงจึงสามารถประมวลผลได้ ซึ่งโหมดการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์ HESS ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3.3 และเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้า (VEH\_SMCAR) ใน (3.23) ผลคือพฤติกรรมการขับขี่ และแรงเบรกของยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

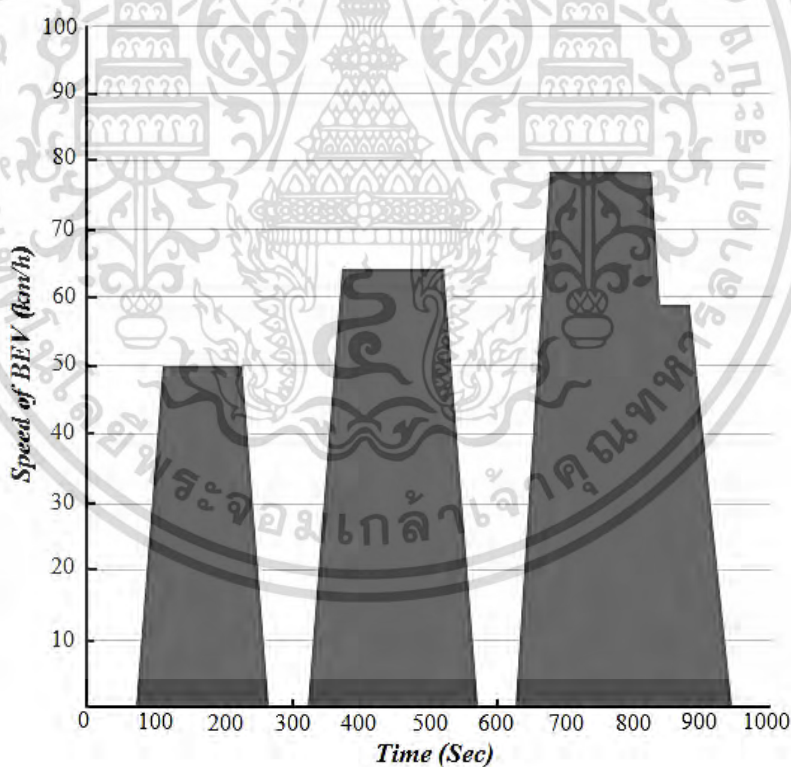
$$F_{vehicle} = 1144 \frac{dv}{dt} + 0.042v^2 + 101 \quad (5.1)$$

ตัวอย่างเช่น เมื่อค่าเฉลี่ยอัตราเร่งเชิงลบ (average negative acceleration) ของยานยนต์ไฟฟ้าอยู่ที่  $0.373 \text{ m/s}^2$  และความเร็วของยานยนต์อยู่ที่  $9 \text{ m/s}$ , แรงเบรกที่ต้องการจะอยู่ที่  $-293.15 \text{ N}$ , ซึ่งสามารถแปลงเป็นแรงบิดแรงเบรกได้โดยใช้

$$T = F_d \times C_w \quad (5.2)$$

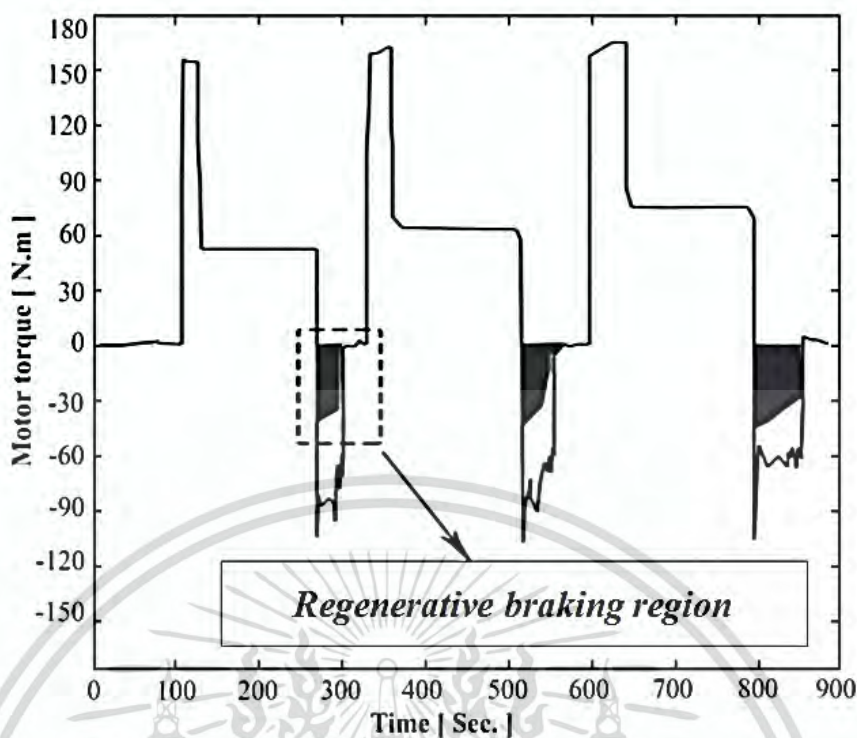


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

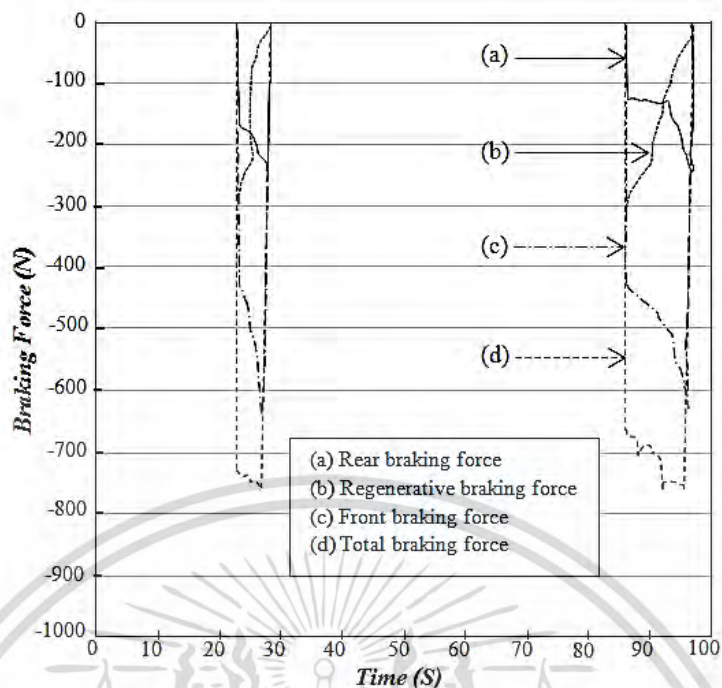


(ค)

รูปที่ 5.1 การจำลองความเร็วและแรงบิดของระบบกู้คืนกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ (ก) กราฟจำลองความเร็วของรอบการขับแบบ LA FTP-72 (ข) กราฟจำลองความเร็วของรอบการขับแบบ INRETS route1 (ค) แรงมอเตอร์ของการคืนกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ

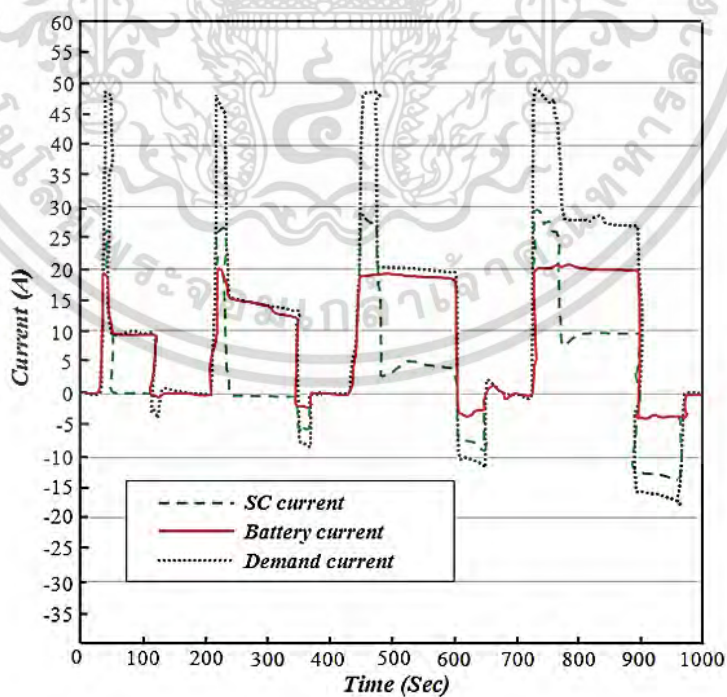
จากรูป 5.2 แสดงกราฟแรงบิดมอเตอร์เจนเนอเรเตอร์ (motor-generator torque curve) ของยานยนต์ไฟฟ้า โดยในขณะที่เข้าสู่การเร่งของยานยนต์ไฟฟ้า ความต้องการแรงบิดของมอเตอร์จะมีค่าประมาณ 154 N.m ซึ่งพื้นที่ที่ถูกแรเงาแสดงถึงส่วนที่เป็นยานการเบรกคืนกำลังที่ซึ่งพลังงานถูกถ่ายโอนเข้าสู่อุปกรณ์เก็บพลังงานไฮบริดจ์ (HESS) จากกราฟแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วคงที่เพิ่มขึ้น ค่าแรงบิดการเบรกคืนกำลังก็มีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของส่วนควบคุมแบบ ANN ที่นำเสนอดี แต่โดยทั่วไปแล้วเป็นการยากที่จะบรรลุวัตถุประสงค์การเบรกคืนกำลังในขณะที่ยานยนต์ใช้ความเร็วที่ต่ำ เนื่องจากแรงดันที่ได้จากการเจนเนอเรเตอร์ของมอเตอร์/เจนเนอเรเตอร์ค่อนข้างต่ำ ถ้าในกรณีที่การเบรกเชิงกลไม่ตอบสนองภายใต้สถานการณ์นี้ ยานยนต์ไฟฟ้าจะไม่สามารถหยุดได้ตามพื้นที่ที่กำหนดได้ ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้ว่าส่วนควบคุมแบบ ANN จะทำการลดแรงบิดการเบรกคืนกำลังที่ความเร็วของยานยนต์ลดลงเพื่อเป็นการรับรองความน่าเชื่อถือในการทำงานของระบบการเบรก นอกจากนี้การกระจายแรงเบรกระหว่างล้อหน้า และล้อหลัง รวมถึงการแบ่งระหว่างแรงเชิงกล และแรงคืนกำลัง สามารถทำให้สามารถตอบสนองแบบ real-time โดยส่วนควบคุมแบบ ANN ดังแสดงดังรูปที่ 5.2 (ก) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าแรงเบรกของล้อหลังที่ค่าน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับแรงเบรกของล้อหน้า นอกจากนี้สัดส่วนของการเบรกคืนกำลังจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเร็วคงที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



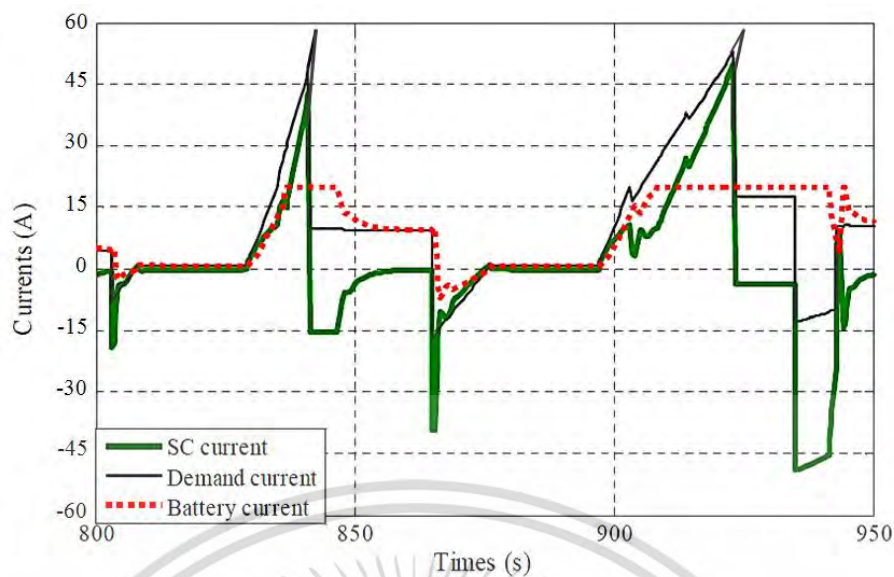
รูป 5.2 แสดงกราฟแรงบิดมอเตอร์เจนเนอเรเตอร์ (motor-generator torque curve) ของ ยานยนต์ไฟฟ้า

## 5.2 การจำลอง และทดสอบกระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบตเตอรี่ และมอเตอร์ใน โหมดการเร่ง



(ก)

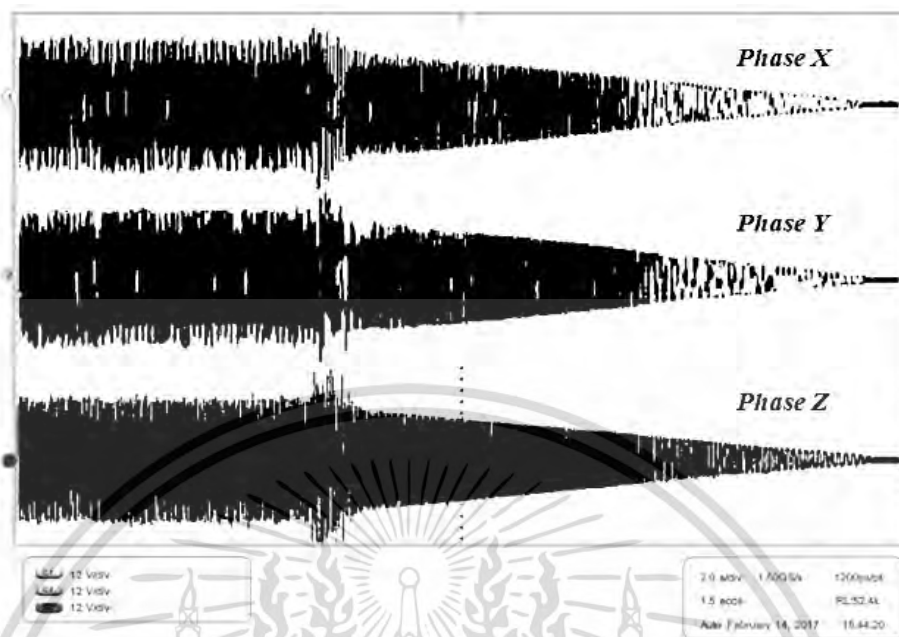
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



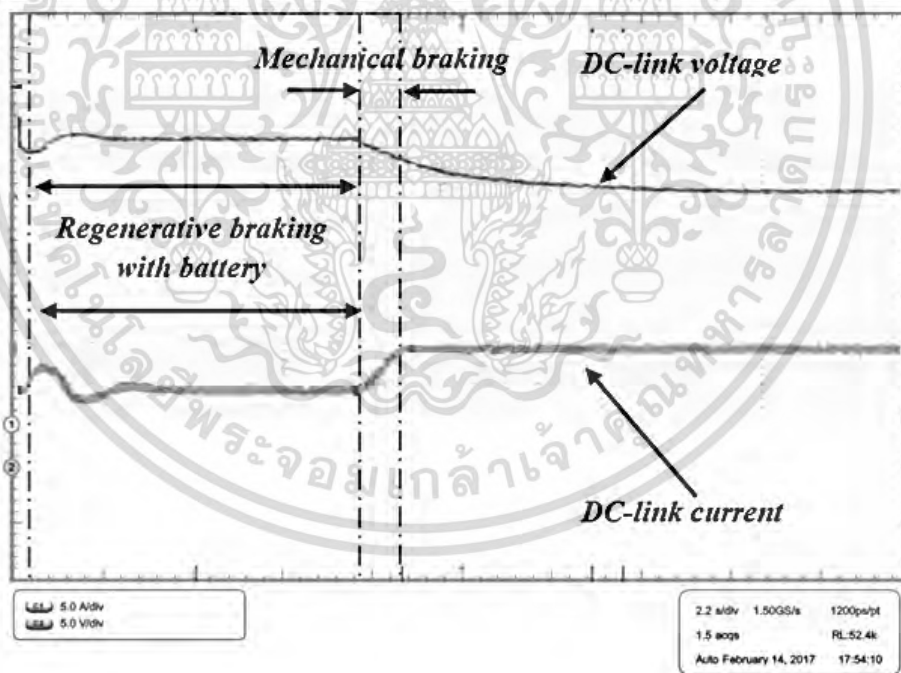
(ข)

รูปที่ 5.3 กระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบตเตอรี่ และมอเตอร์ในโหมดการเร่ง ก. ผลจากการทดสอบ ข. ผลจากการจำลอง

ในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้าเข้าสู่โหมดเร่ง แสดงดังรูปที่ 5.2 จากรูปแสดงแรงบิดสูงแบบชั่วขณะ (high transient torque) ที่เป็นการต้องการของมอเตอร์ไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้กระแสที่มีค่าสูงมากแบบชั่วขณะนี้อาจถูกดึงมาจากส่วนของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน ซึ่งสามารถทำให้ส่งผลอย่างมากต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ จากรูป 5.3 (ข) แสดงผลการทดสอบในช่วงที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดช่วยเสริมพลังงานพร้อมกับแบตเตอรี่ในระหว่างการเร่งของยานยนต์ไฟฟ้า และยานยนต์เข้าสู่ช่วงความเร็วสูง โดยในขณะอัตราการคายประจุของแบตเตอรี่ถึงค่าสูงสุดที่ 20 A ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะให้กระแสที่ต้องการที่เหลือนำมาควบคุม PWM ในวงจรตีซึบค้อนเวอร์เตอร์ (DC/DC buck converter) นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่ากระแสการเบรคค่าสูงจะถูกกักเก็บโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งไม่เพียงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการเบรค (เนื่องจากมีค่าความต้านทานอนุกรมภายใน (ESR) ต่ำ และมีความหนาแน่นกำลังงานสูง : high power density) แต่ช่วยรักษาแบตเตอรี่จากกระแสชาร์จสูงอีกด้วย ในกรณีที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดไม่สามารถอัดประจุจากการเบรคคืนกำลังได้เพิ่มอีกเนื่องจากถึงค่าสูงสุดที่ตั้งไว้ ระบบการเบรคคืนกำลังที่นำเสนอจำทำการปรับแรงดันตีซึบค้อนเวอร์เตอร์เพื่อเปลี่ยนการเบรคคืนกำลังมาใช้แบตเตอรี่ได้ ถึงแม้ว่าส่วนควบคุม ANN จะนำหน้าที่ของการเบรคคืนกำลังภายใต้เงื่อนไขนี้ กระแสการชาร์จของแบตเตอรี่จะรักษาค่าต่ำกว่าค่าความปลอดภัยขีดเริ่ม (โดยทั่วไปที่เรท C ของแบตเตอรี่) จากรูป 5.3 (ข) แสดงผลการทดสอบในช่วงที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดช่วยเสริมพลังงานพร้อมกับแบตเตอรี่ในระหว่างการเร่งของยานยนต์ไฟฟ้า และยานยนต์เข้าสู่ช่วงความเร็วสูง โดยในขณะอัตราการคายประจุของแบตเตอรี่ถึงค่าสูงสุดที่ 20 A ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะให้กระแสที่ต้องการที่เหลือ

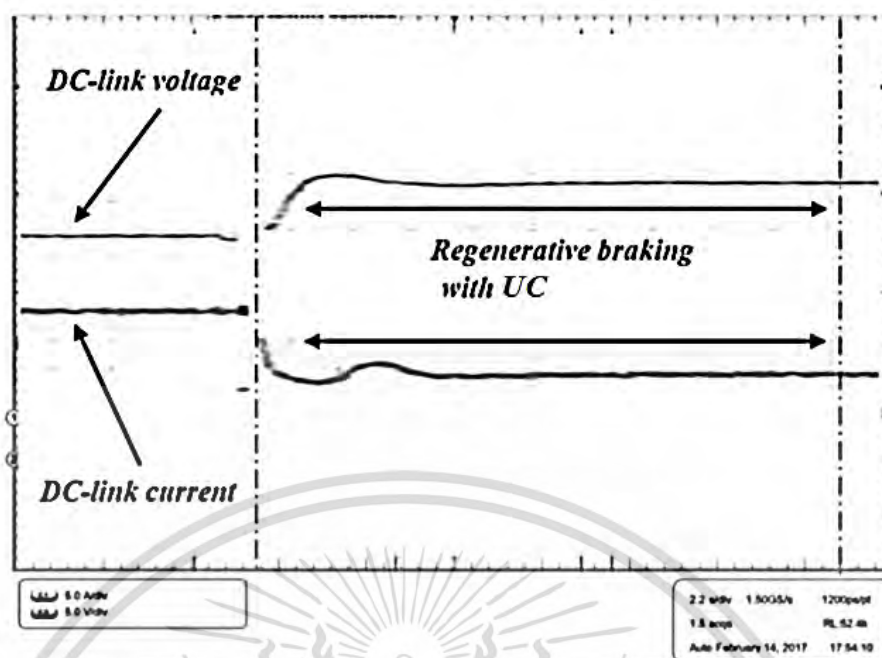


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

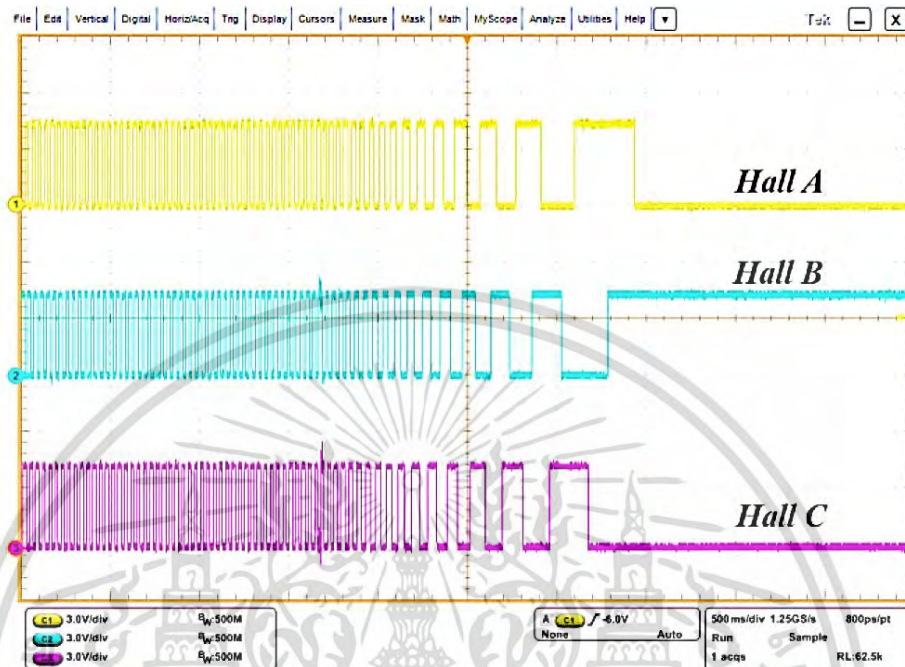
รูปที่ 5.4 ผลการทดลองระบบกู้คืนกำลังขณะเบรกที่ (ก) Three-phase Back-EMFs ของขดลวดสเตเตอร์ระหว่างโหมดปกติ และโหมดคืนกำลังขณะเบรก (ข) แรงดัน และกระแสของดีซีลิงค์ระหว่างโหมดปกติ และโหมดคืนกำลังขณะเบรก (ค) กระแสของตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบตเตอรี่ และดีซีลิงค์ระหว่างโหมดปกติ และโหมดคืนกำลังขณะเบรก

### 5.3 กระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบตเตอรี่ และมอเตอร์ในโหมดการเร่ง

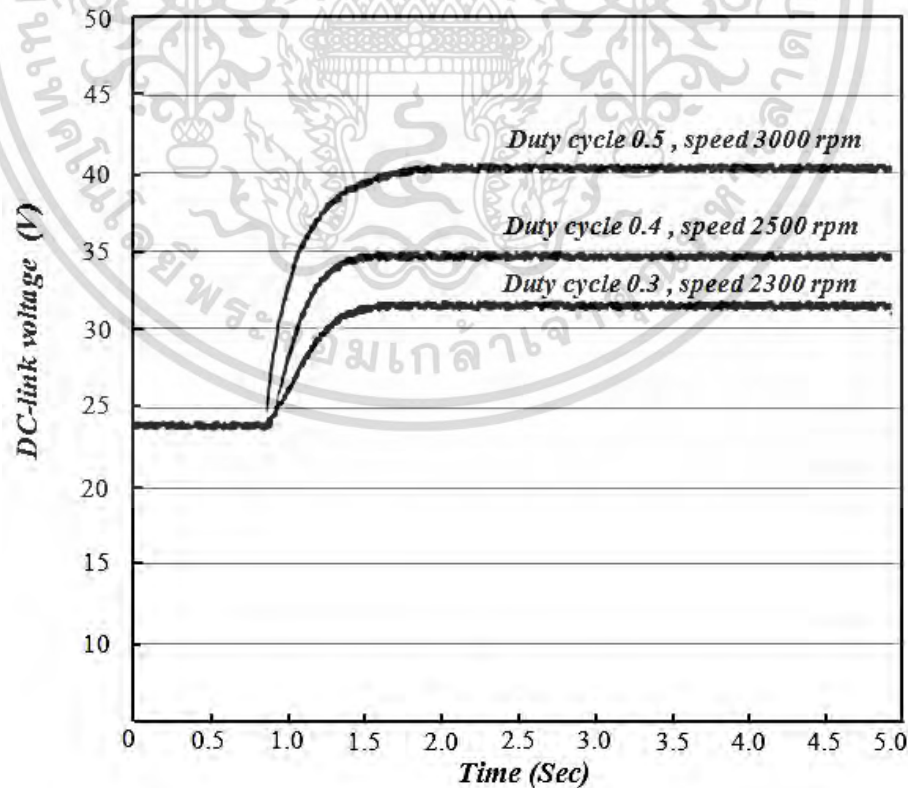
สำหรับการทำงานของโหมดการเบรกคืนกำลังทั้งสองสถานการณ์ แรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดถูกตั้งค่าใกล้กับค่าขีดเริ่มสูงสุด รูปแบบคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (Back-EMFs) ของขดลวดสเตเตอร์ (stator windings) กระแสดีซีลิงค์ แรงดันดีซีลิงค์ กระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด และกระแสของแบตเตอรี่ระหว่างการเบรกแสดงดังรูปที่ 5.4 เมื่อคำสั่งเบรกถูกใช้งานส่วนควบคุมแรกจะปรับแรงดันดีซีลิงค์สำหรับแรงบิดการเบรกคงที่ด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด ระหว่างช่วงระยะเวลาี้ กระแสดีซีลิงค์เกือบทั้งหมดจะถูกกักเก็บได้โดยตัวเก็บประจุยิ่งยวด ส่วนกระแสที่แบตเตอรี่จะเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อแรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวดถึงค่าปลอดภัยขีดเริ่มสูงสุด ส่วนควบคุมจะทำการปรับดีซีลิงค์แรงบิดการเบรกคงที่ด้วยแบตเตอรี่ ในเงื่อนไขนี้ แรงดันดีซีลิงค์จะมีค่าต่ำกว่าแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และ  $D_2$  จะเข้าสู่สภาวะไบอัสกลับ ด้วยเหตุนี้กระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะมีค่าเป็นศูนย์ และกระแสดีซีลิงค์ทั้งหมดจะถูกซาร์จเข้าแบตเตอรี่ เมื่อขั้นตอนกระบวนการเบรกเริ่มขึ้น แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (Back-EMFs) ของเจนเนอเรเตอร์จะเริ่มลดลง และเมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับสามเฟสเหล่านี้มีค่าน้อยมากๆ ส่วนควบคุมจะสลับเข้าสู่การเบรกแบบเสียด (frictional braking) โดยที่สถานะของฮอลล์เอฟเฟ็คเซนเซอร์สามเฟส (three-phase Hall Effect sensors) ระหว่างการชะลอของมอเตอร์ไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.5(ก) จากรูปที่ 5.5(ข) แสดงแรงดันดีซีลิงค์ที่ตัวดีไอซี และความเร็วค่าต่างๆ

จากการทดลอง เห็นได้ชัดว่าระบบคืนกำลังขณะเบรกที่น่าเสนอ พร้อมด้วยรูปแบบการสวิตซ์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3 สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง อีกหนึ่งสิ่งที่สามารถสรุปได้คือ การสร้างสัญญาณ PWM ที่สามารถปรับอัตราไซเคิลในอินเวอร์เตอร์ ทำให้แรงดันดีซีลิงค์เปลี่ยนแปลงได้ พร้อมกันนี้ รูปแบบคลื่นสัญญาณของความเร็วสำหรับมอเตอร์ระหว่างการชะลอแสดงดังรูปที่ 5.5(ค)

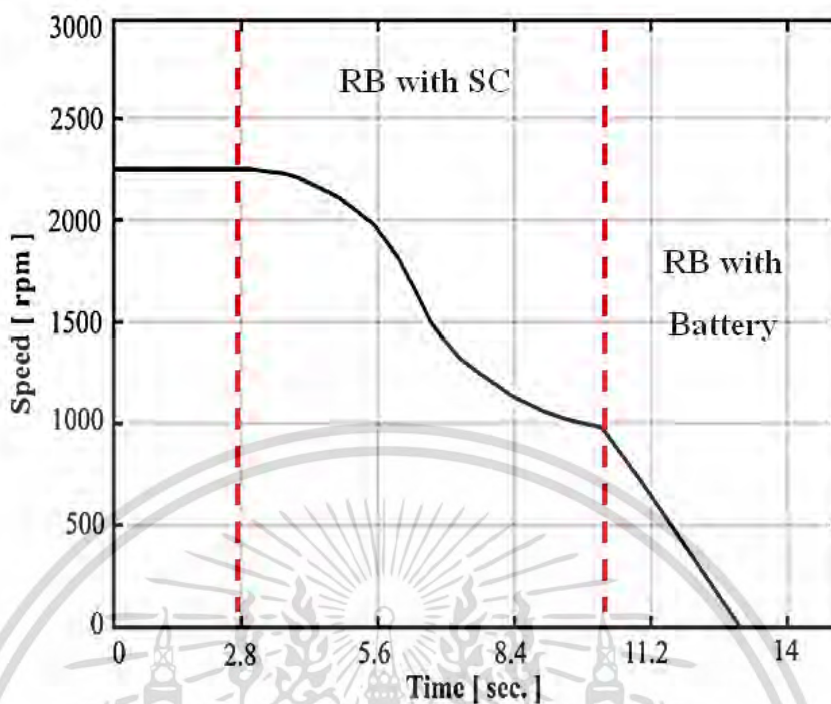


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 5.5 ผลการทดลองระบบกู้คืนกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ (ก) แรงดันของ Hall Effect sensors เมื่อมอเตอร์ BLDC เข้าสู่โหมดชะลอ (ข) แรงดันดีซีลิงค์ที่ค่าตัวที่ใช้เคิลที่แตกต่างกัน และที่ความเร็วที่ต่างกัน (ค) ความเร็วของมอเตอร์ BLDC ในโหมดปกติ โหมดคืนกำลังขณะเบรกด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด โหมดคืนกำลังขณะเบรกด้วยแบตเตอรี่ และการเบรกเชิงกล

#### 5.4 การจำลอง และทดสอบพลังงานที่เก็บได้ในโหมดการเบรก

รูปที่ 5.5 แสดงการจำลอง และการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว และเวลาที่ใช้ช่วงการเบรก 9.26 วินาที ที่ความเร็วก่อนการเบรกอยู่ที่ 34.84 กม/ชม. เพื่อทำการประเมินแรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวดทั้งก่อน และหลังการเบรก ซึ่งผลที่ได้จากการจำลอง และการทดสอบแสดงในตารางที่ 5.1 และ 5.2 จากผลการทดสอบพบว่าในช่วงระยะเวลาก่อน และหลังการเบรกในช่วงเวลา 9.26 วินาที ที่ความเร็วก่อนการเบรกเฉลี่ย 34.15 กม/ชม. แรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพิ่มขึ้นที่ค่าเฉลี่ย 5.8 โวลต์ แสดงให้เห็นพลังงานที่ถูกถ่ายโอนมาเก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวด หลังจากการเบรก โดยที่ตารางที่ 5.3 และ 5.4 แสดงผลการจำลอง และการทดสอบ พลังงานจลน์ก่อนการเบรก และพลังงานที่เก็บได้หลังจากการเบรก ที่ความเร็วก่อนการเบรกเฉลี่ย 9.45 เมตร/วินาที ที่ช่วงเวลาในเบรกที่ 9 วินาที จากผลการทดสอบพบว่า พลังงานที่ถูกเก็บไว้ได้หลังจากการเบรกอยู่ที่เฉลี่ย 3,219.02 จูล โดยพลังงานจลน์ที่เกิดก่อนการเบรกอยู่ที่เฉลี่ย 27450.90 จูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ค่าแรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวดช่วงก่อนและหลังการเบรกจากการจำลอง

Set	Speed before braking (km/h)	SC voltage before braking (V)	SC voltage after braking (V)	Braking start (s)	Braking end (s)
1	34.00	12.00	21.04	31.00	41.00
2	34.00	19.30	28.11	31.00	41.00
3	34.00	25.30	33.74	31.00	41.00
4	34.00	31.80	38.54	31.00	41.00
5	34.00	38.50	47.02	31.00	41.00

ตารางที่ 5.2 ค่าแรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวดช่วงก่อนและหลังการเบรกจากการทดสอบ

Set	Speed before braking (km/h)	SC voltage before braking (V)	SC voltage after braking (V)	Braking start (s)	Braking end (s)
1	34.51	12.19	19.82	31.17	41.46
2	34.84	19.30	26.38	31.45	41.71
3	34.04	25.30	31.84	31.18	41.27
4	34.22	28.31	34.40	31.36	41.09
5	34.17	33.18	39.53	31.52	41.58

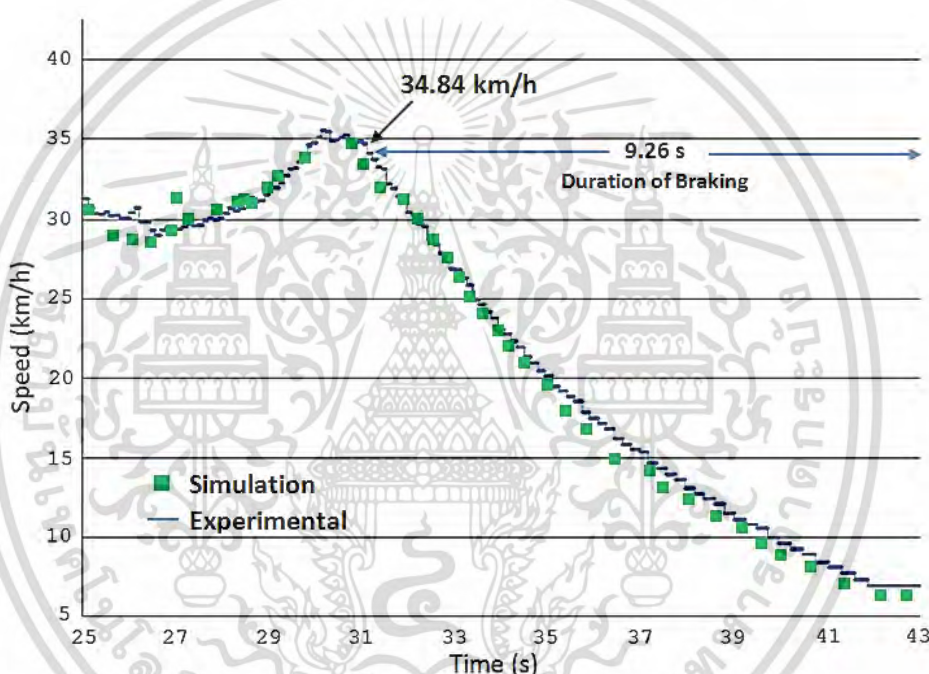
ตารางที่ 5.3 พลังงานกลช่วงก่อน และที่เก็บได้หลังจากการเบรกจากการจำลอง

Set	Speed before braking (m/s)	Total kinetic energy before braking (J)	Duration of braking (s)	Energy recovered (J)
1	9.44	26,734.08	10.00	2,960.02
2	9.44	26,734.08	10.00	4,115.10
3	9.44	26,734.08	10.00	4,640.26
4	9.44	26,734.08	10.00	5,190.89
5	9.44	26,734.08	10.00	7,177.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 พลังงานจลน์ช่วงก่อน และที่เก็บได้หลังจากการเบรกจากการทดสอบ

Set	Speed before braking (m/s)	Total kinetic energy before braking (J)	Duration of braking (s)	Energy recovered (J)
1	9.66	27,590.43	10.29	2,240.33
2	9.75	28,518.75	10.26	2,811.59
3	9.53	27,246.27	10.09	3,286.39
4	9.58	27,532.92	9.73	3,491.01
5	9.56	27,418.08	10.06	4,127.79

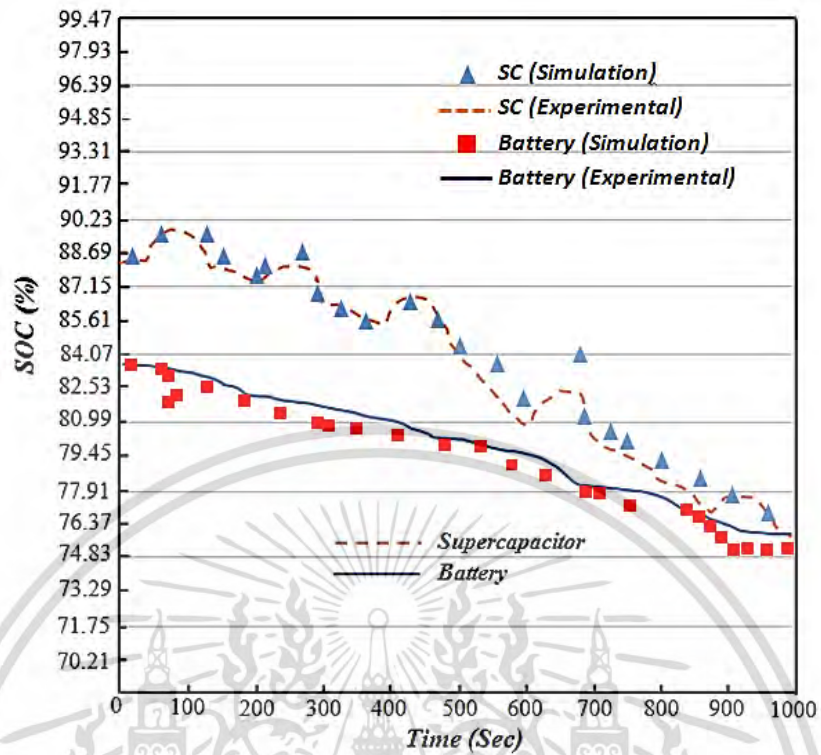


รูปที่ 5.5 การจำลอง และการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว และเวลาที่ใช้ช่วงการเบรก

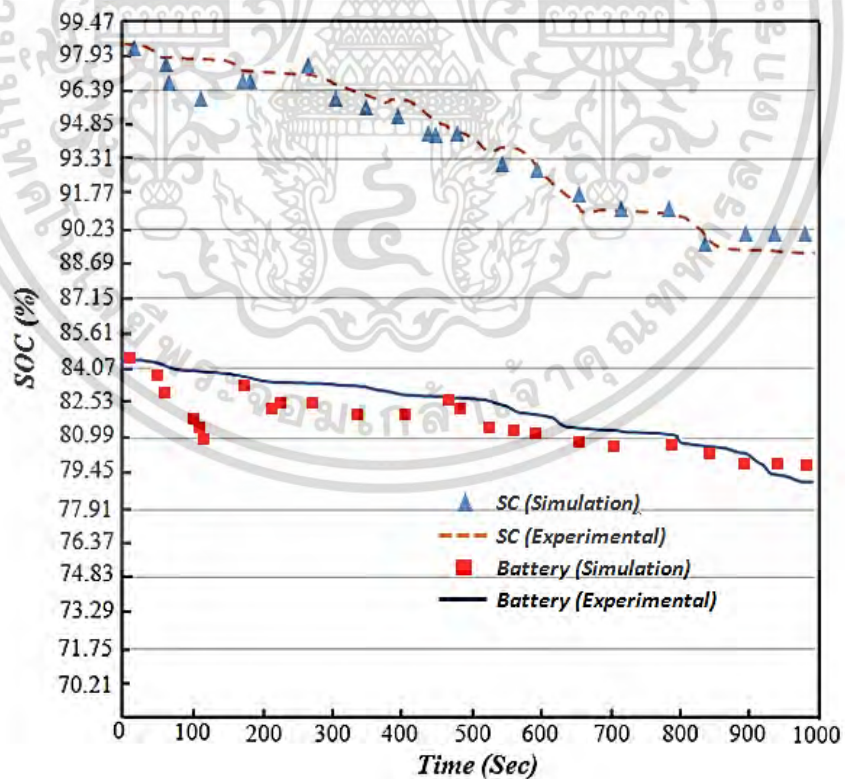
### 5.5 การจำลอง และทดสอบพลังงานที่เก็บได้ในโหมดการเบรก

ประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอสามารถประเมินได้โดยการเปรียบเทียบสถานะประจุของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฮบริด (ตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่) ระหว่างรอบการขับขี่ของยานยนต์ไฟฟ้า โดยรูปที่ 5.6 แสดงผลเปรียบเทียบการจำลอง และทดสอบสถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ ภายใต้ 3 เงื่อนไขคือ ระบบกู้คืนกำลังขณะเบรกโดยใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยสถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ เริ่มที่สถานะประจุ 88.3% และ 83.8%. ระบบกู้คืนกำลังขณะเบรกโดยใช้แบตเตอรี่ โดยที่สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ ที่เริ่มที่สถานะประจุ 98.3% และ 84.8% และระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว สถานะประจุของแบตเตอรี่ที่เริ่มที่สถานะประจุ 84.12%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

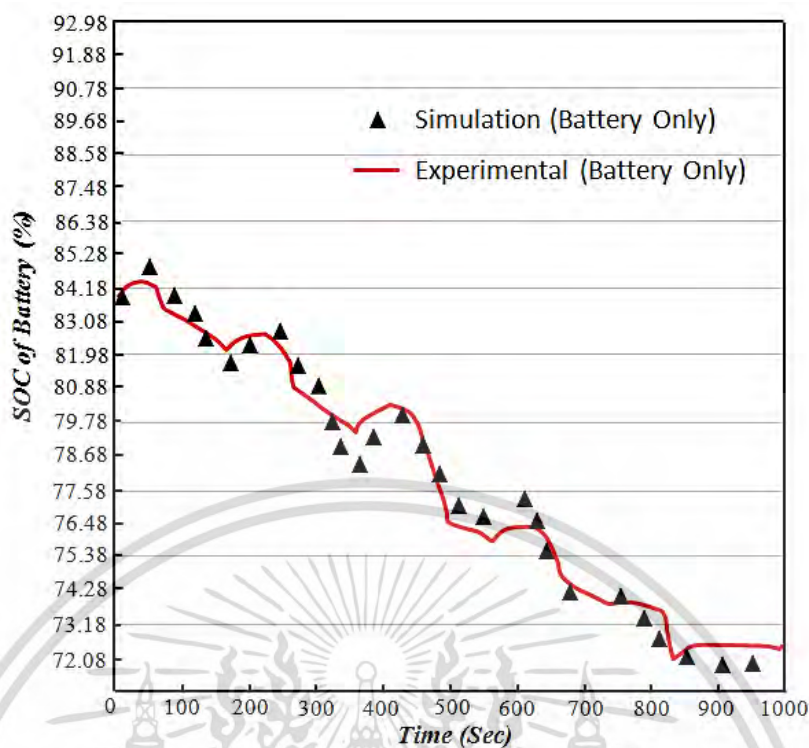


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 5.6 สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ (ก) สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ ที่เริ่มที่สถานะประจุ 88.3% และ 83.8%. ตามลำดับ (ข) สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ ที่เริ่มที่สถานะประจุ 98.3% และ 84.8%. ตามลำดับ (ค) สถานะประจุของแบตเตอรี่ ที่เริ่มที่สถานะประจุ 84.12%

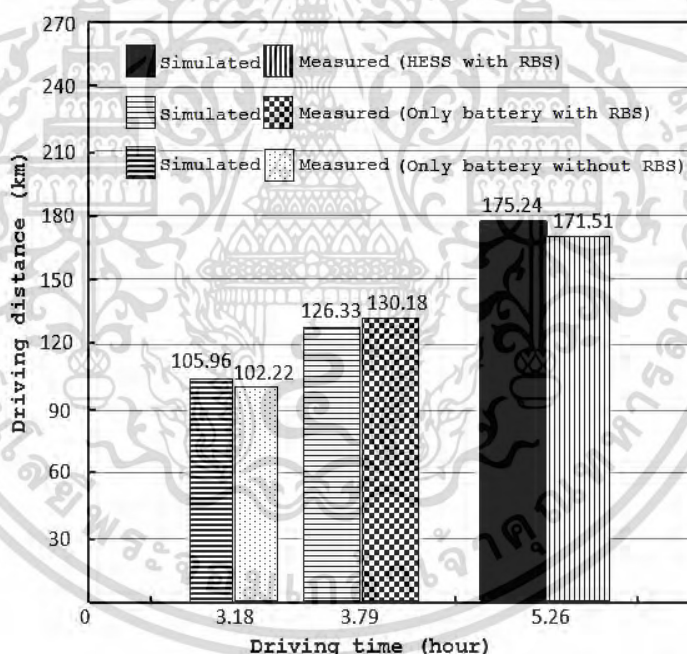
ในกรณีแรก ตั้งค่าเริ่มต้นของสถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ไว้ที่ 81.3% และ 81.8% ตามลำดับ ดังนั้น เนื่องจากแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดยังอยู่ห่างค่าขีดเริ่มความปลอดภัย (safety threshold 94%) การเบรกคิณกำลังด้วยแบตเตอรี่จะยังไม่ถูกเปิดใช้งาน ดังนั้นในกรณีนี้ จะมีเพียงตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้ในการกักเก็บพลังงานจากการเบรก โดยที่สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ในกรณีนี้แสดงดังรูปที่ 5.3 (ก). และจากรูป 5.3(ข) แสดงกรณีที่สองของการเบรกคิณกำลัง ซึ่งสถานะประจุ (SOC) ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดถูกตั้งค่าเริ่มต้นไว้ที่ 97% ในกรณีนี้ เนื่องจากสถานะประจุ (SOC) ของตัวเก็บประจุมีค่าเกินค่าความปลอดภัยขีดเริ่มที่ตั้งไว้ ตัวเก็บประจุจึงไม่สามารถดูดซับพลังงานจากการเบรกได้อีก และด้วยเหตุนี้การเบรกคิณกำลังด้วยแบตเตอรี่จะถูกเปิดใช้งานแทน ในส่วนที่เหลือของรอบการขับขี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้คายประจุจนถึงค่าต่ำกว่าค่าปลอดภัยขีดเริ่ม ด้วยเหตุนี้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจึงสามารถกลับใช้เพื่อกักเก็บพลังงานจากการเบรกคิณกำลังได้อีกครั้ง ส่วนรูปที่ 5.3(ข), แสดงสถานะประจุของแบตเตอรี่ในกรณียานยนต์ไฟฟ้าขับขี่โดยใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพียงอย่างเดียว

สำหรับการเบรกคิณกำลัง 2 สถานการณ์ดังกล่าวข้างต้น สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดอยู่ที่ 83.8% และ 98.3% โดยที่ค่าประสิทธิภาพที่คำนวณอยู่ที่ 48% และ 43.5% ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

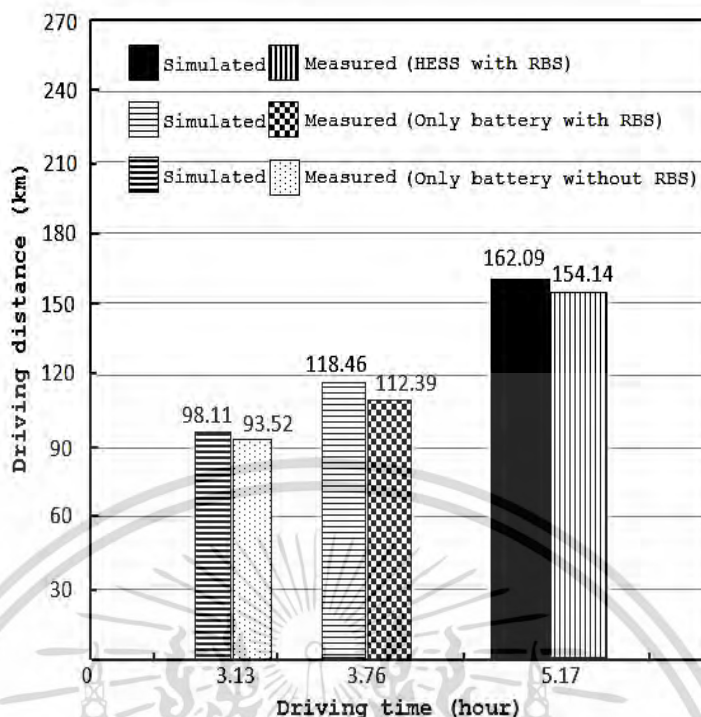
ในกรณีที่สอง เนื่องจากค่าแรงดันเริ่มต้นของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีค่าเกินค่าความปลอดภัยเริ่มต้นที่ตั้งไว้ การเบรกคิณกำลังด้วยแบตเตอรี่จึงถูกเปิดใช้งาน เนื่องจากข้อจำกัดของกระแสชาร์จสูงสุดของแบตเตอรี่ พลังงานจากการเบรกเกือบทั้งหมดจะถูกถ่ายโอนในรูปความร้อนผ่านการเบรกแบบแรงเสียดทาน (frictional braking) ดังนั้น จากสมการที่ (3.23) ค่าประสิทธิภาพของการเบรกคิณกำลังจะลดลง 4.5% ส่วนในกรณีของยานยนต์ไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพียงอย่างเดียว ค่าประสิทธิภาพจะลดลงประมาณ 20% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 1

จากสมการที่ (3.23) สัดส่วนขนาดใหญ่ของพลังงานจลน์ของยานยนต์ไฟฟ้าที่สูญเสียไปโดยการเบรกเชิงกลของล้อหน้า และล้อหลัง ด้วยเหตุนี้ระยะทางการขับขี่ของยานยนต์ไฟฟ้าจึงถูกคำนวณเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบคิณกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ โดยสมมติฐานว่าอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฮบริดถูกเติมประจุจนเต็ม ด้วยเหตุนี้ค่าสถานะประจุเริ่มต้นของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ถูกเลือกใช้งานที่ 98% และ 96% ตามลำดับ โดยผลการเปรียบเทียบระยะทางการขับขี่ของยานยนต์ไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.7 และ 5.8

## 5.6 ระยะทางการขับขี่จากการจำลอง และทดสอบระบบที่นำเสนอ



รูปที่ 5.7 การจำลอง และทดสอบการเปรียบเทียบระยะทางการขับขี่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไข 3 แบบ คือระบบ HESS ร่วมกับ RBS, ระบบแบตเตอรี่อย่างเดียวร่วมกับ RBS และระบบแบตเตอรี่อย่างเดียวที่ไม่มี RBS โดยใช้รอบการขับขี่แบบ INRETS Route1



รูปที่ 5.8 การจำลอง และทดสอบการเปรียบเทียบระยะทางการขับขี่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไข 3 แบบ คือระบบ HESS ร่วมกับ RBS, ระบบแบตเตอรี่อย่างเดียวร่วมกับ RBS และระบบแบตเตอรี่อย่างเดียวที่ไม่มี RBS โดยใช้รอบการขับขี่แบบ LAFTP-72

จากรูปที่ 5.7 และ 5.8 แสดงผลการจำลอง และทดสอบการเปรียบเทียบระยะทางการขับขี่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไข 3 แบบ คือระบบ HESS ร่วมกับ RBS, ระบบแบตเตอรี่อย่างเดียวร่วมกับ RBS และระบบแบตเตอรี่อย่างเดียวที่ไม่มี RBS โดยใช้รอบการขับขี่แบบ INRETS Route1 และแบบ LAFTP-72 ตามลำดับ โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลอง และการทดสอบ ได้แสดงในตารางที่ 4.1 จากรูปที่ 5.7 แสดงผลการจำลอง และการทดสอบในรอบการขับขี่แบบ INRETS Route1 แสดงให้เห็นว่า การใช้ระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ ร่วมกับระบบคั่นกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ มีระยะการขับขี่เพิ่มขึ้น 38.9% และ 37.11% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวร่วมกับ RBS และเพิ่มขึ้น 66.7% และ 65.11% เมื่อเทียบกับระบบแบตเตอรี่อย่างเดียวที่ไม่มี RBS และจากรูปที่ 5.8 แสดงผลการจำลอง และการทดสอบในรอบการขับขี่แบบ LAFTP-72 แสดงให้เห็นว่า การใช้ระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ ร่วมกับระบบคั่นกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ มีระยะการขับขี่เพิ่มขึ้น 36.83% และ 37.14% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวร่วมกับ RBS และเพิ่มขึ้น 65.21% และ 64.82% เมื่อเทียบกับระบบแบตเตอรี่อย่างเดียวที่ไม่มี RBS

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ผลการทดลองทั้งหมดที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีเนื้อหาที่สอดคล้องกับความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้กำหนดไว้ในบทที่ 1 ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบ การสร้าง การถอดแบบจำลองของพารามิเตอร์ต่างๆ และการทดสอบระบบกักเก็บกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/Battery สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 งานวิจัยนี้เสนอระบบคั่นกำลังขณะเบรกโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่านไฟกระแสตรง (BLDC Motor)

6.1.2 กลไกการควบคุมระบบคั่นกำลังขณะเบรก บนพื้นฐานส่วนควบคุม PI และ ANN เพื่อกระจายแรงเบรกได้ถูกพัฒนาไปพร้อมกันในงานวิจัยนี้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการเบรกคั่นกำลัง โดยที่เมื่อเข้าสู่โหมดชะลอ หรือเบรก แรงดันดิสคิลิ่งจะเข้าสู่สถานะบัส โดยใช้รูปแบบอัลกอริธึมการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์สามเฟส ดังนั้นไดโอด (Regenerative diode) จะอยู่ในสภาวะไบอัสไปข้างหน้า ซึ่งช่วยให้พลังงานจากการเบรกจะสามารถถูกถ่ายโอนกลับมาเก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้จนกระทั่งถึงค่าสูงสุดที่ (96%) พลังงานจากการเบรกจะถูกเปลี่ยนมาเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ได้

6.1.3 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบคั่นกำลังขณะเบรกที่ได้นำเสนอ การจำลอง และการทดสอบผลได้ถูกดำเนินการภายใต้ 3 สถานการณ์: ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่อย่างเดียวไม่มีระบบคั่นกำลังขณะเบรก, ยานยนต์ไฟฟ้าที่มีระบบคั่นกำลังขณะเบรกโดยใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพียงอย่างเดียว และยานยนต์ไฟฟ้าที่มีระบบคั่นกำลังขณะเบรกโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ โดยใช้ระยะทางต่อหนึ่งรอบการขับขี่ที่ 8069.57 เมตร

6.1.4 แสดงผลการจำลอง และการทดสอบในรอบการขับขี่แบบ INRETS Route1 แสดงให้เห็นว่า การใช้ระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ ร่วมกับระบบคั่นกำลังขณะเบรกที่นำเสนอ มีระยะการขับขี่เพิ่มขึ้น 38.9% และ 37.11% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวร่วมกับ RBS และเพิ่มขึ้น 66.7% และ 65.11% เมื่อเทียบกับระบบแบตเตอรี่อย่างเดียวที่ไม่มี RBS

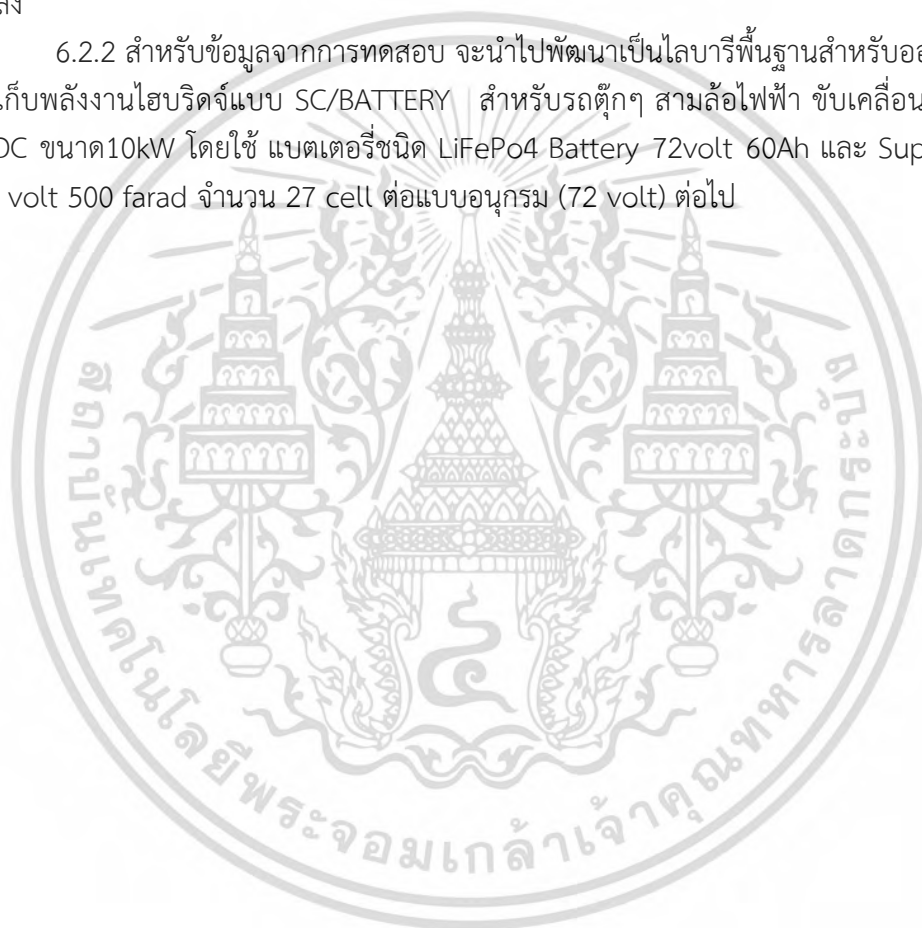
6.1.5 ซึ่งเป็นการยืนยันระบบคั่นกำลังขณะเบรกโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์แบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด/แบตเตอรี่ ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงานขณะเบรกได้ และสามารถเพิ่มระยะทางในการขับขี่ได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับยานยนต์ไฟฟ้าที่มีระบบคั่นกำลังขณะเบรกโดยใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ระบบที่นำเสนอยังช่วยปรับปรุงการเร่งของยานยนต์ไฟฟ้า และสามารถยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ เนื่องจากการทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานในวงจำกัด ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

6.2.1 สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาด 2.7 V 120 F จำนวน 18 เซลล์ ต่อแบบอนุกรม ทำให้ได้แรงดันรวมที่ 48 V โดยมีค่าความหนาแน่นพลังงานอยู่ที่ 2.18 Wh เพื่อใช้ไฮบริดจ์ร่วมกับแบตเตอรี่ขนาด 36 V 20 Ah ซึ่งทำให้สัดส่วนพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่นั้นอยู่ที่ 0.3 % ซึ่งเพียงพอเพื่อการประเมินสมรรถนะของระบบที่นำเสนอได้ในช่วงการขับชี่ระยะสั้น (1 cycle) เท่านั้น เนื่องจากตัวเก็บประจุที่มีแรงดัน และค่าความจุไฟฟ้าสูงๆ มีราคาที่สูงมากตามไปด้วย จึงควรเพิ่มโอกาสในการศึกษา วิจัย รวมถึงเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างตัวเก็บประจุที่สามารถสร้างเองได้ในประเทศ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนในการสร้างอุปกรณ์กักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์ ลดลง

6.2.2 สำหรับข้อมูลจากการทดสอบ จะนำไปพัฒนาเป็นไลบรารีพื้นฐานสำหรับออกแบบระบบ กักเก็บพลังงานไฮบริดจ์แบบ SC/BATTERY สำหรับรถตุ๊กๆ สามล้อไฟฟ้า ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ BLDC ขนาด10kW โดยใช้ แบตเตอรี่ชนิด LiFePo4 Battery 72volt 60Ah และ Supercapacitor 2.7 volt 500 farad จำนวน 27 cell ต่อแบบอนุกรม (72 volt) ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, and A. Emadi, "Energy storage systems for automotive applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2258–2267, 2008.
- [2] A. Emadi, Y. J. Lee, and K. Rajashekara, "Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2237–2245, 2008.
- [3] K. Jonghoon, S. Jongwon, C. Changyoon, and B. H. Cho, "Stable configuration of a Li-Ion series battery pack based on a screening process for improved voltage/SOC balancing," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 411–424, 2012.
- [4] Y. Kim, and N. Chang, "Design and management of energy-efficient hybrid electric energy storage systems," *springer*, pp.19-25, 2014.
- [5] H. Yin, C. Zhao, M. Li and et al., "Utility function-based real-time control of A battery ultracapacitor hybrid energy system", *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 11, no. 1, pp. 220-231, 2015.
- [6] P. J. Grbović, P. Delarue, P. Le Moigne and P. Bartholomeus, "A bidirectional three-level DC–DC converter for the ultracapacitor applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 10, pp. 3415–3430, Oct. 2010.
- [7] M. T. E. Heinrich, F. Kelch, P. Magne, and A. Emadi, "Regenerative braking capability analysis of an electric taxiing system for a single aisle midsize aircraft," *IEEE Trans. Transport. Electrific.*, vol. 1, no. 3, pp. 298–307, Oct. 2015.
- [8] M.-E. Choi, J.-S. Lee and S.-W. Seo, "Real-time optimization for power management systems of a battery/supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 8, pp. 3600–3611, Oct. 2014.
- [9] J. Cao, and A. Emadi, "A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 122–132, 2011.
- [10] K. Chol-Ho, K. Moon-Young, and M. Gun-Woo, "A modularized charge equalizer using a battery monitoring IC for series-connected Li-Ion battery strings in electric vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 8, pp. 3779–3787, 2013.
- [11] J. Shen and A. Khaligh, "A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system," *IEEE Trans. Transport. Electrific.*, vol. 1, no. 3, pp. 223–231, Oct. 2015.

- [12] A. Kuperman, I. Aharon, S. Malki and A. Kara, "Design of a semiactive battery-ultracapacitor hybrid energy source," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 2, pp. 806-815, Feb. 2013.
- [13] N.R. Tummuru, S. Member, M.K. Mishra and et al., "Dynamic energy management of renewable grid integrated hybrid energy storage system," *Dyn. Energy Manag. Renew. Grid Integr. Hybrid Energy Storage Syst.*, vol. 62, no. 12, pp. 7728-7737, 2015.
- [14] S. Dusmez, A. Hasanzadeh and A. Khaligh, "Comparative analysis of bidirectional three-level DC-DC converter for automotive applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 5, pp. 3305-3315, 2015.
- [15] T. Mesbahi, N. Rizoug, F. Khenfri, P. Bartholomeüs and P. Le Moigne, "Dynamical modelling and emulation of Li-ion batteries-supercapacitors hybrid power supply for electric vehicle applications," *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 7, pp. 161-169, Nov. 2016.
- [16] A. Castaings, W. Lhomme, R. Trigui and A. Bouscayrol, "Comparison of energy management strategies of a battery/supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints," *Appl. Energy*, vol. 163, pp. 190-200, 2016.
- [17] R. E. Araujo, R. de Castro, C. Pinto, P. Melo and D. Freitas, "Combined sizing and energy management in EVs with batteries and supercapacitors," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 7, pp. 3062-3076, Sep. 2014.
- [18] S. K. Kollimalla, M. K. Mishra and N. L. Narasamma, "Design and analysis of novel control strategy for battery and supercapacitor storage system," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1137-1144, Oct. 2014.
- [19] Z. Chen, R. Xiong, K. Wang and B. Jiao, "Optimal energy management strategy of a plug-in hybrid electric vehicle based on a particle swarm optimization algorithm," *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 3661-3678, 2015.
- [20] J. L. Torres, R. Gonzalez, A. Gimenez and J. Lopez, "Energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles. A comparative study," *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 816-824, Jan. 2014.
- [21] T. Mesbahi, F. Khenfri, N. Rizoug, P. Bartholomeus and P. Le Moigne, "Combined optimal sizing and control of Li-Ion battery/supercapacitor embedded power supply using hybrid particle swarm-Nelder-Mead algorithm," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 59-73, Jan. 2017.
- [22] X. Nian, F. Peng and H. Zhang, "Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 10, pp. 5798-5808, Jan. 2014.

- [23] L. Wang, E. G. Collins and H. Li, "Optimal design and real-time control for energy management in electric vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 4, pp. 1419-1429, Mar. 2011.
- [24] R. Hoseinnezhad and A. Bab-Hadiashar, "Efficient antilock braking by direct maximization of tire-road frictions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 8, pp. 3593-3600, Aug. 2011.
- [25] A. V. Topalov, Y. Oniz, E. Kayacan and O. Kaynak, "Neuro-fuzzy control of antilock braking system using sliding mode incremental learning algorithm," *Neurocomputing*, vol. 74, no. 11, pp. 1883-1893, May 2011.
- [26] J. Ko, S. Ko, I. Kim, D. Hyun and H. Kim, "Co-operative control for regenerative braking and friction braking to increase energy recovery without wheel lock," *Int. J. Autom. Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 253-262, Mar. 2014.
- [27] G. Hongwei, G. Yimin, and M. Ehsani, "A neural network based SRM drive control strategy for regenerative braking in EV and HEV," *Electric Machines and Drives Conference*, pp. 571-575, June 2001.
- [28] J. Ko, S. Ko, H. Son, B. Yoo, J. Cheon and H. Kim, "Development of Brake System and Regenerative Braking Cooperative Control Algorithm for Automatic-Transmission-Based Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 2, pp. 431-440, May 2014.
- [29] N. Mutoh, "Driving and braking torque distribution methods for front-and rear-wheel-independent drive-type electric vehicles on roads with low friction coefficient," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 10, pp. 3919-3933, Feb. 2012.
- [30] J. Shen, S. Dusmez and A. Khaligh, "Optimization of Sizing and Battery Cycle Life in Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicle Applications," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2112-2121, 2014.
- [31] J. Wang, P. Liu, J. Hicks-Garner, E. Sherman, S. Soukiazian, M. Verbrugge, H. Tataria, J. Musser and P. Finamore, "Cycle-life model for graphite-LiFePO<sub>4</sub> cells," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 8, pp. 3942-3948, 2011.

## ภาคผนวก ก. ข้อมูลอุปกรณ์

### ก.1. วงจรควบคุม

Arduino board

Sensored brushless DC motor

6 x 06N03LA N-type mosfet (or equivalent)

3 x IR2104S gate driver IC

LM339N (or LM339) quad comparator IC

10k ohm (or less) potentiometer

3 x 10k ohm resistor

7 x 100 ohm resistor

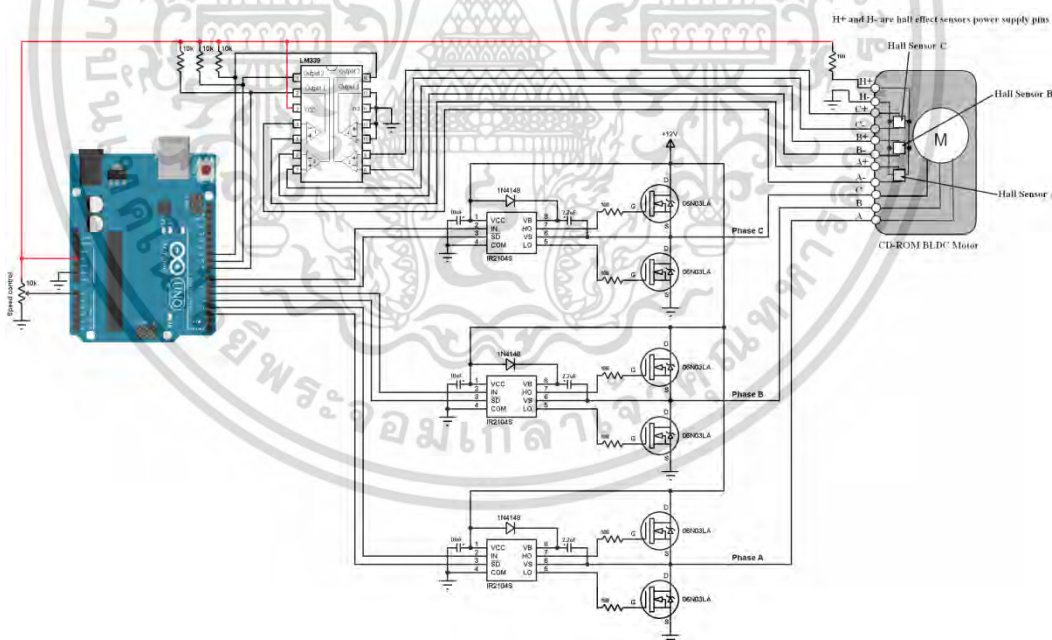
3 x IN4148 diode

3 x 10uF capacitor

3 x 2.2uF capacitor

12V source

Breadboard



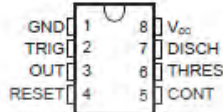
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics				
Parameter	Conditions	Min.	Max.	Units
Isolated +5V User Supply	$I_{out} \leq 50 \text{ mA}$	4.95V	5.05V	V
Fault Output Low Voltage	$I_{OL} = 8\text{mA}$		0.6	V
Fault Output High Voltage	$I_{OH} = -3\text{mA}$	4		V
Tachometer Output Low Voltage	$I_{OL} = 1\text{mA}$		0.3	V
Analog Speed Input impedance			10K	Ohms
Analog input tolerance	All	+/- 0.1		V
Analog input vs motor speed	input $\leq 0.5\text{V}$ input = 1.0V input = 5.0V	0 1700 6400	1900 6600	RPM
<b>See Note 1.</b>				
Digital Speed tolerance	All	+/- 1		%
Digital Speed Input low voltage	+5V <sub>user</sub> = 5.0V		0.8	V
Digital Speed Input high voltage	+5V <sub>user</sub> = 5.0V	4.0		
Digital Speed Input current			5	uA
Digital Speed Input Frequency	ALL	50	500	Hz
Digital PWM input vs motor speed	PWM input $\leq 15\%$ PWM input = 20% PWM input = 80%	0 1700 6400	1900 6600	RPM
<b>See Note 2.</b>				
VM - Ripple Current RMS	Input 5A, 600VDC		1	A
VM - Average Input Current			5	A
VM - charging current limiting see <b>See Note 3.</b>	On initial application of power		1	A
VM - Fuse			7.5	A
Module Over temperature	All conditions	90 194	110 230	°C °F

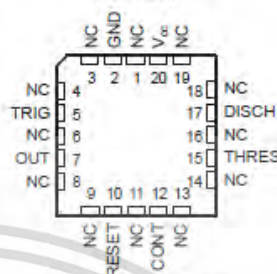
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6 Pin Configuration and Functions

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



SE555...FK PACKAGE  
(TOP VIEW)



NC – No internal connection

Pin Functions

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



NA555, NE555, SA555, SE555

SLFS022I – SEPTEMBER 1973 – REVISED SEPTEMBER 2014

www.ti.com

## 7 Specifications

### 7.1 Absolute Maximum Ratings<sup>(1)</sup>

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

			MIN	MAX	UNIT
$V_{CC}$	Supply voltage <sup>(2)</sup>			18	V
$V_i$	Input voltage	CONT, RESET, THRES, TRIG		$V_{CC}$	V
$I_o$	Output current			±225	mA
$\theta_{JA}$	Package thermal impedance <sup>(3)(4)</sup>	D package		97	°C/W
		P package		85	
		PS package		96	
		PW package		149	
$\theta_{JC}$	Package thermal impedance <sup>(5)(6)</sup>	FK package		5.61	°C/W
		JG package		14.5	
$T_J$	Operating virtual junction temperature			150	°C
	Case temperature for 80 s	FK package		260	°C
	Lead temperature 1.6 mm (1/16 in) from case for 80 s	JG package		300	°C

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

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

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

(4) The package thermal impedance is calculated in accordance with JE3D 51-7.

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

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

### 7.2 Handling Ratings

PARAMETER	DEFINITION	MIN	MAX	UNIT
$T_{stg}$	Storage temperature range	-85	150	°C

### 7.3 Recommended Operating Conditions

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

			MIN	MAX	UNIT
$V_{CC}$	Supply voltage	NA555, NE555, SA555	4.5	18	V
		SE555	4.5	18	
$V_i$	Input voltage	CONT, RESET, THRES, and TRIG		$V_{CC}$	V
$I_o$	Output current			±200	mA
$T_A$	Operating free-air temperature	NA555	-40	105	°C
		NE555	0	70	
		SA555	-40	85	
		SE555	-65	125	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



#### 7.4 Electrical Characteristics

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

PARAMETER	TEST CONDITIONS	SE555			NA555 NE555 SA555			UNIT	
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
THRES voltage level	$V_{CC} = 15\text{ V}$	9.4	10	10.8	8.8	10	11.2	V	
	$V_{CC} = 5\text{ V}$	2.7	3.3	4	2.4	3.3	4.2		
THRES current <sup>(1)</sup>			30	250		30	250	nA	
TRIG voltage level	$V_{CC} = 15\text{ V}$	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	4.8	5	5.2	4.5	5	5.6	V
			3		6				
	$V_{CC} = 5\text{ V}$	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	1.45	1.67	1.9	1.1	1.67	2.2	
					1.9				
TRIG current	TRIG at 0 V		0.5	0.9		0.5	2	$\mu\text{A}$	
RESET voltage level	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$		0.3	0.7	1	0.3	0.7	1	V
					1.1				
RESET current	RESET at $V_{CC}$		0.1	0.4		0.1	0.4	mA	
	RESET at 0 V		-0.4	-1		-0.4	-1.5		
DISCH switch off-state current			20	100		20	100	nA	
DISCH switch on-state voltage	$V_{CC} = 5\text{ V}$ , $I_O = 8\text{ mA}$					0.15	0.4	V	
CONT voltage (open circuit)	$V_{CC} = 15\text{ V}$	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	9.6	10	10.4	9	10	11	V
			9.6		10.4				
	$V_{CC} = 5\text{ V}$	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	2.9	3.3	3.8	2.6	3.3	4	
			2.9		3.8				
Low-level output voltage	$V_{CC} = 15\text{ V}$ , $I_{OL} = 10\text{ mA}$	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$		0.1	0.15		0.1	0.25	V
					0.2				
	$V_{CC} = 15\text{ V}$ , $I_{OL} = 50\text{ mA}$	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$		0.4	0.6		0.4	0.75	
					1				
	$V_{CC} = 15\text{ V}$ , $I_{OL} = 100\text{ mA}$	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$		2	2.2		2	2.5	
					2.7				
	$V_{CC} = 15\text{ V}$ , $I_{OL} = 200\text{ mA}$	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$		2.5			2.5		
					0.35				
	$V_{CC} = 5\text{ V}$ , $I_{OL} = 3.5\text{ mA}$	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$		0.1	0.2		0.1	0.35	
					0.8				
$V_{CC} = 5\text{ V}$ , $I_{OL} = 8\text{ mA}$			0.15	0.25		0.15	0.4		
High-level output voltage	$V_{CC} = 15\text{ V}$ , $I_{OH} = -100\text{ mA}$	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	13	13.3		12.75	13.3	V	
			12						
	$V_{CC} = 15\text{ V}$ , $I_{OH} = -200\text{ mA}$	$T_A = -55^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$		12.5			12.5		
				3	3.3		2.75		3.3
Supply current	Output low, No load	$V_{CC} = 15\text{ V}$		10	12		10	15	mA
		$V_{CC} = 5\text{ V}$		3	5		3	6	
	Output high, No load	$V_{CC} = 15\text{ V}$		9	10		9	13	
		$V_{CC} = 5\text{ V}$		2	4		2	5	

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ข.**  
**หน่วยในระบบเอสไอ**

ตารางที่ ข.1 หน่วยในระบบเอสไอ (International System Unit : SI Unit)

ปริมาณ	ชื่อหน่วย	หน่วยอนุพันธ์	หน่วยฐาน
ความยาว (Length)	Meter	-	m
มวล (Mass)	Kilogram	-	kg
เวลา (Time)	Second	-	s
กระแสไฟฟ้า (Current)	Ampere	-	A
ความถี่ (Frequency)	Hertz	Hz	1/s
แรง (Force)	Newton	N	$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$
แรงดัน (Pressure)	Pascal	Pa	$\text{N}/\text{m}^2 = \text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}^2$
พลังงาน (Energy)	Joule	J	$\text{N}\cdot\text{m} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$
กำลังไฟฟ้า (Power)	Watt	W	$\text{V}\cdot\text{A} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$
ประจุไฟฟ้า (Electric Charge)	Coulomb	C	A·s
ศักย์ไฟฟ้า (Potential)	Volt	V	$\text{J}/\text{C} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}\cdot\text{s}^3$
ความนำไฟฟ้า (Conductance)	Siemens	S	$\Omega^{-1} = \text{A}^2\cdot\text{s}^3/\text{kg}\cdot\text{m}^2$
ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance)	Ohm	$\Omega$	$\text{V}/\text{A} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}^2\cdot\text{s}^3$
ความจุไฟฟ้า (Capacitance)	Farad	F	$\text{C}/\text{V} = \text{A}^2\cdot\text{s}^4/\text{kg}\cdot\text{m}^2$
ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux)	Weber	Wb	$\text{V}\cdot\text{s} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}\cdot\text{s}^2$
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density)	Tesla	T	$\text{Wb}/\text{m}^2 = \text{kg}/\text{A}\cdot\text{s}^2$
ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance)	Henry	H	$\text{Wb}/\text{A} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}^2\cdot\text{s}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค.

## คำอุปสรรค

ตารางที่ ค.1 คำอุปสรรค หรือ คำนำหน้าหน่วย (Prefix)

$10^n$	คำอุปสรรค	ตัวย่อ	ความหมาย	ตัวเลข	
$10^{24}$	ยอตตะ	yotta-	Y	ล้านล้านล้านล้าน	1,000,000,000,000,000,000,000,000
$10^{21}$	เซตตะ	zetta-	Z	พันล้านล้านล้าน	1,000,000,000,000,000,000,000
$10^{18}$	เอกซะ	exa-	E	ล้านล้านล้าน	1,000,000,000,000,000,000
$10^{15}$	เพตะ	peta-	P	พันล้านล้าน	1,000,000,000,000,000
$10^{12}$	เทระ	tera-	T	ล้านล้าน	1,000,000,000,000
$10^9$	จิกะ	giga-	G	พันล้าน	1,000,000,000
$10^6$	เมกะ	mega-	M	ล้าน	1,000,000
$10^3$	กิโล	kilo-	k, K	พัน	1,000
$10^2$	เฮกโต	hecto-	h	ร้อย	100
$10^1$	เดคา	deca-	da	สิบ	10
$10^{-1}$	เดซี	deci-	d	หนึ่งส่วนสิบ	0.1
$10^{-2}$	เซนติ	centi-	c	หนึ่งส่วนร้อย	0.01
$10^{-3}$	มิลลิ	milli-	m	หนึ่งส่วนพัน	0.001
$10^{-6}$	ไมโคร	micro-	$\mu$	หนึ่งส่วนล้าน	0.000 001
$10^{-9}$	นาโน	nano-	n	หนึ่งส่วนพันล้าน	0.000 000 001
$10^{-12}$	พิโก	pico-	p	หนึ่งส่วนพันล้านล้าน	0.000 000 000 001
$10^{-15}$	เฟมโต	famto-	f	หนึ่งส่วนพันล้านล้านล้าน	0.000 000 000 000 001
$10^{-18}$	อัตโต	atto-	a	หนึ่งส่วนล้านล้านล้านล้าน	0.000 000 000 000 000 001
$10^{-21}$	เซปโต	zepto-	z	หนึ่งส่วนพันล้านล้านล้านล้าน	0.000 000 000 000 000 000 001
$10^{-24}$	ยอกโต	yocto-	y	หนึ่งส่วนล้านล้านล้านล้านล้าน	0.000 000 000 000 000 000 000 001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


## ภาคผนวก ง.

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิตยสารนี้

- [1] Kunagone Kiddee and Werachet Khan-Ngern. “Performance Evaluation of Regenerative Braking System Based on a HESS in Extended Range BEV” Journal of Electrical Engineering and Technology (JEET 2018) pp. 1921-1933.
- [2] Kunagone Kiddee, Wiwat.Keyoonwong and Werachet Khan-Ngern. “ A HSC/Battery Energy Storage System-based Regenerative Braking System Control Mechanism for Battery Electric Vehicles Driven by Induction Motor” The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ 2018)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้







**Journal of Electrical Engineering & Technology**  
The scope of the journal includes the following: Electrical power engineering, Electrical machinery and energy conversion systems, Electrophysics and applications, Information and controls

**Archives** Journal of Electrical Engineering & Technology

**To Be Published** [IRPPE](#) > [Archives](#) > [To Be Published](#)

**Recently Accepted Papers**

<b>A Simple and Robustness Algorithm for ECG R-peak Detection</b> Md Saifur Rahman*, Chulhyung Choi**, Young-pil Kim** and Sikyung Kim†	
<b>A Novel-Type Velocity-controllable Electromagnetic Coil Launcher based on Voltage Control</b> Wenkai Huang†, Shi Huan** and Ying Xiao**	
<b>Electrical Properties of BaTiO<sub>3</sub>-based 0G03/0.1μF/0.3mm Ceramics Decoupling Capacitor for Embedding in the PCB of 10G RF Transceiver Module</b> Hwa-sun Park*, Youngil Na*, Ho Joon, Choi*, Su-jeong Suh*, Dong-Hyun Baek** and Jung-Rag Yoon***†	
<b>Experimental Study on Air Decomposition By-Product Under Creepage Discharge Fault and Their Impact on Insulating Materials</b> Hassan Javed†, Kang Li*, Guoqiang Zhang* and Adrian Traian Pleșca**	
<b>Performance Evaluation of Regenerative Braking System Based on a HESS in Extended Range BEV</b> Kunagone Kiddee† and Werachet Khan-Ngern*	

**JEET** Online Submission

**COPE** Flowchart

**KCSE**

**SCIE**

**crossref**

**cross check**

**KIEE**

pISSN: 1975-0102  
eISSN: 2093-7423

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Performance Evaluation of Regenerative Braking System Based on a HESS in Extended Range BEV

Kunagone Kiddee<sup>†</sup> and Werachet Khan-Ngern\*

**Abstract** – This paper proposed a regenerative braking system (RBS) strategy for battery electric vehicles (BEVs) with a hybrid energy storage system (HESS) driven by a brushless DC (BLDC) motor. In the regenerative braking mode of BEV, the BLDC motor works as a generator. Consequently, the DC-link voltage is boosted and regenerative braking energy is transferred to a battery and/or ultracapacitor (UC) using a suitable switching pattern of the three-phase inverter. The energy stored in the HESS through reverse current flow can be exploited to improve acceleration and maintain the batteries from frequent deep discharging during high power mode. In addition, the artificial neural network (ANN)-based RBS control mechanism was utilized to optimize the switching scheme of the vehicular braking force distribution. Furthermore, constant torque braking can be regulated using a PI-controller. Different simulation and experiments were implemented and carried out to verify the performance of the proposed RBS strategy. The UC/battery RBS also contributed to improved vehicle acceleration and extended range BEVs.

**Keywords:** Battery electric vehicles (BEV); Hybrid Energy Storage System (HESS); Three-Phase Inverter; Regenerative Braking System (RBS); Ultracapacitor (UC)

### 1. Introduction

Battery Electric Vehicle (BEV) offers definite advantages including high efficiency, environmental responsiveness, fashionability, reduced noise pollution, reduced maintenance and energy efficiency. Most importantly, the BEV can be used to reduce carbon emissions [1-4]. The BEV relies on batteries for use as the main Energy Storage System (ESS) components. However, using electrochemical batteries as the sole energy storage device of the BEV has several limitations including high initial cost, limited driving range, short cycling life and limited power density [4, 5]. In addition, the batteries need to be able to provide the power demand of the BEV such as acceleration or driving uphill. Therefore, the batteries have to be oversized in order to deliver these functions. Ultracapacitors (UCs) with batteries based Hybrid Energy Storage System (HESS) can be utilized to improve the acceleration of vehicles and significantly prolong the life cycle of the batteries [5-17]. Owing to the rapid growth of UC technologies, one type of ultracapacitor technology is the Electric Double Layer Capacitors (EDLC), which offers many outstanding features such as high power density and long life-cycle [9, 11]. Combining the features of the UC and batteries based HESS has significant benefits such as improvement acceleration or in

the high power mode of the BEV and significantly prolonged life cycle of the batteries, which is due to the UC assisting the batteries during peak power demand by the vehicle [12-18]. In addition, the high power density of the UC can also be used to effectively harvest regeneration energy through reverse current flow during regenerative braking mode, which leads to increased driving range for the vehicle.

Various topologies of HESS are described in [5-21]. The most widely utilized and researched is the battery/UC topology for HESS. The objective of combining batteries with a UC is to construct a hybrid energy storage system with the high power density of a UC and the high energy density of a battery. Since the HESS needs additional two energy storage elements and power electronic interface, such as a bidirectional DC/DC converter, it is typically not cost effective [14, 18]. Furthermore, the bidirectional DC/DC converter needs to match the power of the HESS module and is utilized to convey the energy flow between the UC and the battery pack. Hence, the efficiency of regenerative braking is decreased due to the power dissipation of the high power electronic interface. It also significantly increases overall system costs [5-19].

In this paper, a configuration is proposed for appropriate interaction between two energy storage elements (UC/Battery) based on the HESS. The proposed HESS includes the battery pack, UC module, power diode and unidirectional DC/DC buck converter. In addition, a proposed a HESS topology with four operation modes is discussed in detail. Furthermore, a new RBS strategy is optimized for the proposed HESS. During the braking or deceleration mode of the vehicle, the suitable switching pattern of the three-

<sup>†</sup> Corresponding Author: Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. (kkunagone@gmail.com)

\* Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. (kkveerac@kmitl.ac.th)

Received: December 26, 2017; Accepted: May 4, 2018

phase inverter is activated; the voltage of DC-link can be boosted. Hence, the power diode is forward biased. Then, regenerative braking energy is transferred directly to the UC module without using any additional power electronic interface. The voltage of DC-link is regulated by differentiation of the PWM duty-cycle in the three-phase inverter. Consequently, in case of the UC is almost charged, regenerative braking energy can be harvested through the battery pack. In the proposed strategy, the efficiency of regenerative braking energy is increased due to the elimination of power electronics interfaces. Furthermore, braking force distribution is improved via the Multilayer Perceptron (MLP) function in an Artificial Neural Network (ANN) controller. Simultaneously, the PI controller is used to regulate the PWM duty-cycle in the three-phase inverter to maintain constant torque braking. The organization of this research is as follows: Section 1 is the introduction, Section 2 discusses the UC/battery HESS topology and operation modes. Section 3 describes the ANN-based control mechanism of the proposed regenerative braking system (RSB), while Section 4 deals with the simulations and experimental results of the proposed RBS. The concluding remarks are provided in Section 5.

## 2. The Proposed HESS Topology and Operation Modes

The configuration of the proposed HESS topology is shown in Fig. 1. In the proposed HESS topology, the voltage of DC-link can be maintained relatively constant due to the DC-link being directly connected to the battery pack. The battery pack is connected to the UC module through a DC/DC buck converter. In addition, the voltage of the UC module is controlled to keep it higher than the battery pack voltage. The UC module is paralleled with the battery pack through a regenerative diode. Meanwhile, the proposed HESS is used to supply the BLDC motor through the three-phase inverter,  $V_{bat} = V_{link} \leq V_{UC}$  which  $V_{bat}$ ,  $V_{link}$  and  $V_{UC}$  refer to voltage of the battery pack, DC-link, and UC module respectively. In normal situations, the battery has enough power to supply the three-phase BLDC motor. Thus, the battery pack can handle the load demand alone. During high power modes such as vehicle acceleration or high speeds, the UC module assists to supply the BLDC motor with the battery pack through the

unidirectional DC/DC buck converter. In normal driving mode, the regenerative diode is always reverse biased. The buck converter is regulated to maintain UC voltage greater than the voltage of the battery pack. In braking mode, the BLDC motor acts as a generator [22-23]. Therefore, by utilizing the IGBTs in the three-phase inverter with inductances in the three-phase BLDC motor and a suitable switching pattern, the inverter can be boosted. Consequently, in regenerative braking conditions, the power diode is forward biased due to the voltage of DC-link being boosted. Therefore, energy can be efficiently stored through the UC module during the braking process.

Different individual cells of the two energy storage elements are required to be utilized. A degree of freedom arises for the distribution of power demand. Effectively splitting the power demand of the BEV between the UC module and the battery pack is a major challenge. Utilizing higher voltage for the UC module has many advantages from implementation in comparison with utilizing higher voltage of the batteries. On the other hand, the State of Charge (SOC) of the UC can be easily measured due to being proportional to the UC voltage. Moreover, active cell balancing circuits in the UC module are easier to be implemented and can reduce the overall cost of the system.

The proposed HESS with unidirectional DC/DC buck converter and three-phase inverter can be separated into four different operation modes of BEV which are discussed in detail below.

### 2.1 Normal or low power mode

In the normal mode, since the battery has enough power to supply the required power demand for the BEV, the voltage of the UC can be maintained higher than the battery pack voltage. Consequently, the power demand is equal or less than the battery power. This operating mode is referred to as normal mode. Fig. 2 shows energy flow for the normal mode of operation in the proposed HESS. In the normal mode, the power diode is reverse biased since the voltage of the UC module is higher than the battery pack voltage. As a result, the battery pack supplies the BLDC motor alone in this condition.

### 2.2 Acceleration mode

In the acceleration mode of the vehicle, the required

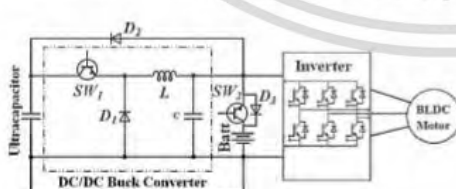


Fig. 1. Configuration of the proposed HESS

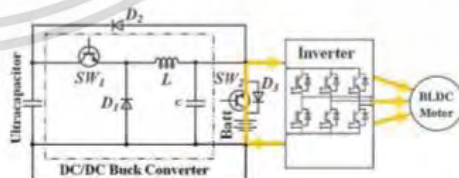


Fig. 2. Energy flow in normal or low power mode of the proposed HESS

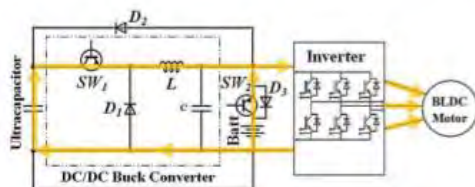


Fig. 3. Energy flow in acceleration mode of the proposed HESS

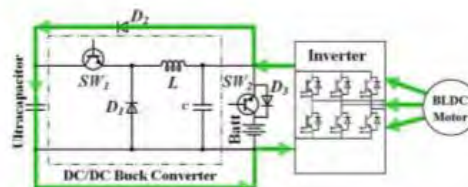


Fig. 4. Energy flow in the regenerative braking with UC mode of the proposed HESS.

power demand is greater than available by battery power. In this condition, battery voltage can no longer be maintained due to the battery suffering frequent deep discharge cycles. Vehicle acceleration could also be degraded as a result. In this condition, the UC will start to assist the battery pack via the DC-DC buck converter when the voltage of the UC is higher than the minimum threshold ( $V_{UC} \geq V_{UCmin}$ ). If the UC voltage drops below the battery voltage, the battery might unnecessarily charge the UC module in the circumstance, which increases the stresses in the battery pack. Hence, the UC only provides assistance to the battery pack until the UC voltage is higher than the battery voltage, which is adjusted by the loop control system strategy. In this condition, the regenerative diode ( $D_2$ ) is usually reverse biased. The energy from both the UC bank and the battery pack is also providing power to the BLDC motor. Energy flow in the acceleration mode is shown in Fig. 3.

2.3 Regenerative braking with UC mode

During vehicle braking, in this mode, can be divided into two even the equivalent circuit of the DC-link and DC/AC converter. High sides of the switches of the half-bridge are turned off and the low sides of the switches are pulse width modulated. In addition, this operation mode is activated only when  $V_{UC} \leq V_{UCmax}$  in which  $V_{UCmax}$  is the maximum voltage limit of the UC module that is commonly analyzed for secure operating systems.

2.4 Regenerative braking with battery mode

Fig. 5 shows the energy flow of regenerative braking in Event II, which is referred to the regenerative braking with battery. In this condition, the energy of regenerative braking cannot be transferred to the UC module. In the operation principle of this condition, the voltage of DC-link can be boosted. Hence  $D_1$  is forward biased and braking energy will be absorbed by the battery pack via  $D_2$ . While the voltage of DC-link is boosted for achievement of regenerative braking by the HSC, both  $D_2$  and  $D_3$  are forward biased.

It should be noted that Fig. 4 is only operated in  $V_{bat} > V_{dlink} > V_{UC}$ , and Fig. 5. is only operated in  $V_{bat} < V_{dlink} < V_{UC}$ . In other cases, the regenerated current flows in both sides, including the UC and battery. Thus, it cannot control

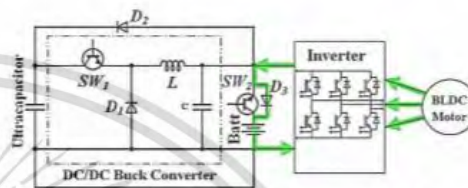


Fig. 5. Energy flow in the regenerative braking with battery mode of the proposed HESS

the magnitude of the charging current. It is only determined by the voltage of the battery, DC-link, and UC.

3. Control strategy of the proposed Regenerative Braking System

3.1 The DC/AC inverter concepts

In normal situations, six IGBTs in the DC/AC converter are commutated to allow the rotor position, which is attained through Hall Effect sensors. During regenerative braking, the high side IGBTs of the half bridge are turned off and the low side switches are controlled by the PWM to choose the suitable switching pattern. The three-phase back-EMFs, current of the three-phase armature, suitable switching patterns and Hall Effect signals are shown in Fig. 7. During the regenerative braking condition, six rotation

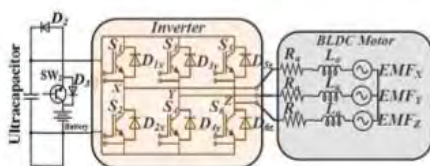


Fig. 6. The equivalent circuit of the proposed HESS, three phase inverter and three-phase BLDC motor

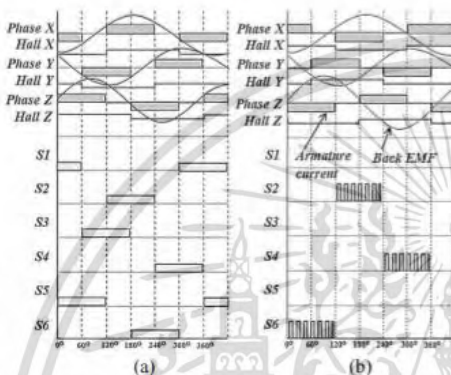


Fig. 7. Waveforms of the back-EMFs, the armature currents and the switching scheme: (a) normal operational mode, (b) regenerative braking mode

time periods and only an individual IGBT is turned on and off during each time period.

3.2 Tractive Force of the BEV

The kinematics of vehicle model is used for evaluation of the dynamic traction power requirement for the BEV powertrain [24-26]. Normally, driving forces can be separated into four main segments which are presented below:

3.2.1. Energy loss associated with rolling resistance

The force to overcome that resists the motion of a tires rolling on the road, which is called rolling friction or rolling resistance, can be calculated as:

$$F_{roll} = K_{roll}mg\cos\theta \tag{1}$$

where  $K_{roll}$  is the rolling resistance coefficient,  $m$  is mass of the vehicle (kg),  $\theta$  is the slope angle and  $g$  is the acceleration of gravity constant ( $m/s^2$ ).

3.2.2. Aerodynamic loss

This loss results from air resistance force against the

body of the vehicle. Aerodynamic loss can be calculated as:

$$F_A = \frac{1}{2} \rho C_d A_f v^2 \tag{2}$$

In (2),  $\rho$  is the density of air ( $kg/m^3$ ),  $C_d$  is the coefficient of drag force,  $A_f$  is the vehicle frontal area ( $m^2$ ) and  $v$  is the speed of the vehicle ( $m/s^2$ ).

3.2.3. Gradient force

In certain driving conditions such as climbing resistance, inclined road force and uphill driving, gradient force is generated via gravitational forces, which significantly affects the performance of the vehicle. Gradient resistance force can be represented as:

$$F_g = mgs\sin\theta \tag{3}$$

3.2.4. Transient force

This is the required force to acceleration or deceleration of the vehicle and can be calculated as:  $m \frac{dv}{dt}$ . Hence, the required force for the front and rear wheels of the vehicle can be calculated as:

$$F_T = F_{roll} + F_A + F_g + m \frac{dv}{dt} \tag{4}$$

Substituting (1)-(3) in (4) yields:

$$F_T = K_{roll}mg\cos\theta + \frac{1}{2} \rho C_d A_f v^2 + mgs\sin\theta + m \frac{dv}{dt} \tag{5}$$

In (5),  $F_T$  is the required force supplied by the vehicle powertrain to driven the vehicle. Eq. (5) can also be used to reach the required braking force to braking of the vehicle in a predestine distance specified.

3.3 Regenerative braking control strategy for the BEV

Fig. 8 show configuration of the control strategy of the proposed RBS strategy. The ANNs, PI controller and the braking force distribution are the main part, which are discussed in subsections as given by:

3.3.1. Braking force distribution of the BEV

In braking condition, braking energy will be transferred to the hybrid energy storage elements. In some braking circumstances, the HESS will gain its maximum capacity and cannot receive additional charge from the induction machine, which limits regenerative energy. Accordingly, participation of frictional braking forces is critical for

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

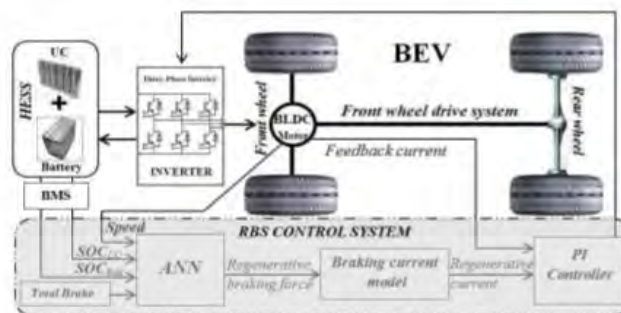


Fig. 8. Configuration of the control system of the proposed RBS strategy

achieve the braking purpose. Therefore, the total braking force of the vehicle consists mainly of the front and rear braking forces:

$$F_{\text{vehicle}} = F_f + F_r \quad (6)$$

where  $F_f$  is regenerative and mechanical forces of the front wheel and  $F_r$  is only the mechanical force of the rear wheel. These forces can be represented as follows:

$$F_f = \varnothing \frac{mg(C_r + wh_v)}{L} \quad (7)$$

$$F_r = \varnothing \frac{mg(C_f + wh_v)}{L} \quad (8)$$

In (7) and (8),  $\varnothing$  is the coefficient of adhesion,  $m$  is the overall mass of the vehicle,  $g$  is the gravitational constant,  $C_r$  is the centroid of the vehicle to the rear axle centerline length,  $C_f$  is the centroid of the vehicle to the front axle centerline length,  $h_v$  is the height of the centroid of the BEV, and  $L$  is the distance from front axle to the rear axle of the BEV ( $L = C_f + C_r$ ). Furthermore,  $w$  is defined as  $w = \frac{\alpha_{\text{vehicle}}}{g}$

in which  $\alpha_{\text{vehicle}}$  is the acceleration of the vehicle.

Substituting (7) to (8) yields:

$$F_{\text{vehicle}} = F_f + F_r = \varnothing mg \quad (9)$$

The maximum braking force of the vehicle that can enable the front and rear wheels to lock concurrently for every adhesion condition can be calculated as:

$$F_r = \frac{1}{2} \left[ \frac{mg}{h_v} \sqrt{v^2 + \frac{4h_v L}{mg} F_f} - \left( \frac{mg C_r}{h_v} + 2F_f \right) \right] \quad (10)$$

Solving (9) and (10) yields the braking force required to stop the vehicle with the front and rear wheels. Normally,

Table 1. Parameters of the BEV and road conditions

Parameter	Definition	value
$m$	Mass of the BEV	1080 kg
$\theta$	Slope angle	0 degree
$g$	Gravitational constant	9.81 m/s <sup>2</sup>
$\rho$	Air density	1.18 kg/m <sup>3</sup>
$A_v$	Frontal area of the BEV	2.4 m <sup>2</sup>
$C_w$	the wheel radius	0.42 m
$h_v$	Weight of the centroid of the BEV	0.5 m
$L$	Distance between front axle to the rear axle	2.4 m
$K_{roll}$	Rolling resistance coefficient	0.011
$C_f$	Centroid of BEV to the front axle centerline	1.15 m
$C_r$	Centroid of BEV to the rear axle centerline	1.25 m

vehicle weight substantially affects the behavior of braking. In this paper, the weight of the BEV including HESS and overall load is 1080 kg. Moreover, other BEV parameters are listed in Table 1.

### 3.3.2. Design of Artificial Neural Network (ANN) controller

The proposed RBS control strategy concept is shown in Fig. 8. During braking of the vehicle, in accordance with frequent of the pedal, the force required to brake can be obtained by (5). Braking force values, for both the front and rear wheels in BEVs can be considered based on the distribution of braking force, as discussed in the previous subsection. Conditions for the vehicle such as speed rate, auxiliary subsystem controllers, and State-of-Charge (SOC) of the battery are usually used to define the values of the mechanical and regenerative braking forces for wheels. Anywise, in condition of the BEV base on HESS, the SOC of both UC and battery need to be taken into account in which implementation processes lead to complexity. Braking force distribution between the front wheel and rear wheel of the vehicle reduces the risk of vehicle instability such as spinning and sliding. The complicated dynamics systems have not been effectively controlled by previous controllers.

Base on the aforementioned, the proposed ANN controller is utilized to distribute the required braking force between

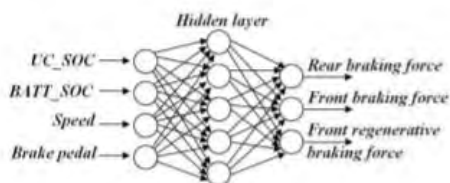


Fig. 9. The MLP function of the ANN

the different wheels of the BEV. ANNs are intelligent computational models based on large inter-connected components called artificial neurons, which can be defined by the association of both input and output arrays Multilayer Perceptron (MLP), which is a well-known function of ANNs.

ANN performance depends mainly on the design procedure. All possible circumstances must be prepared in a training dataset for learning by the ANN. Then, the ANN can be trained by the collected training datasets. Finally, evaluation and validation of the trained ANN scheme with other training datasets is necessary to examine infallibility in the system.

A four layer MLP neural network in various simulations provides desirable performance. The speed of vehicle, state of charge of the UC and battery and brake pedal depression are specified input of the MLP. One hidden layer with 5 neurons is considered. The mechanical braking forces of the front and rear wheels and the regenerative braking force of the front wheel are outputs of the utilized ANN. The activation function for the neurons in the hidden layers using sigmoid functions can be represented as follows.

$$f(n) = \frac{1}{1 + e^{-n/t}} \quad (11)$$

Fig. 9 shows the proposed MLP neuron network configuration [27]. Association with the brake pedal depression, the braking force of front and rear (wheels) can be calculated using the ideal braking force distribution, which is discussed in the previous subsection. In addition to the training dataset, it should also include enough data for the mechanical braking and regenerative braking forces for various functional conditions [28-29].

The Simulink within MATLAB is utilized to establish the training dataset with different simulations by using various values for state of charge of the UC and battery. The speed of the vehicle and braking force are created by the rich training dataset of drive cycles that can be obtained from the braking situation occurring at various BEV speeds and different brake forces. The selection of the drive loop is very significant for braking simulation.

The Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) is one of the principles used to evaluate the performance of the ANNs, which is the maximum error between the analyzed output and the real output, and can be represented

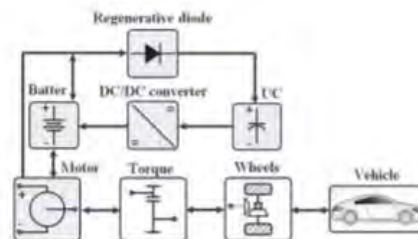


Fig. 10. Configuration of drivetrain in MATLAB

Table 2. Simulation and experimental specifications

Specifications	Simulation	Experimental
Battery	Lithium-ion Battery pack from ADVISOR 12 Volt 20Ah 3 packs in series	Lithium-ion Battery pack 12 Volt 20Ah 3 packs in series
UC	Maxwell Ultracapacitor BoostCap 2.7V 500 Farad 18 cell in series	Ultracapacitor 2.7V 500 Farad 18 cell in series
Motor	Three-Phase BLDC Motor, 5 kW from ADVISOR	Three-Phase BLDC Motor, 5 kW from LapVolt series
Measurement Instrument	Data Acquisition and Control Interface 9063	

Table 3. Specification of battery and UC

Parameter	Value	Unit
Rated Battery voltage	36-40	V
Battery capacity	20	Ah
Battery energy storage	760	Wh
Battery maximum charge/discharge current	10/20	A
Rated UC voltage	48.6	V
Rated UC capacitance	27	F
UC energy storage	9.12	Wh
UC maximum charge/discharge current	50/50	A

as follows:

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_n [F(n) - F'(n)]^2}{\sum_n F'(n)^2}} \quad (12)$$

where  $(n)$  and  $F'(n)$  are the estimated and goal values of the outputs respectively and  $n$  is number of data unit. In the training stage, 328 cases are simulated through various SOC's. The NRMSE is calculated 0.017, 0.011, 0.016 for the rear force, front force and regenerative-braking force respectively.

Fig. 10 shows a diagram of the simulated drivetrain consisting mainly of mechanical and electrical modules. The simulation and experimental parameters are shown in Table 2. Moreover, the specifications of the battery and UC are listed in Table 3.

### 3.3.3. PI Controller

When braking force distribution is achieved by the ANN,

the front wheel braking force is converted to the regenerative braking current by (13):

$$I = k \times F_{\text{regenerative braking}} \quad (13)$$

Regenerative braking torque is regulated by the PI controller using the PWM duty-cycle procedure. Therefore, regenerative braking constant torque is achieved by the proposed method for realizing security objectives.

### 3.4 The efficiency consideration of the proposed RBS

Normally, the regenerative braking efficiency of the proposed system depends on several conditions such as the SOC of UC and battery, the velocity of vehicle, information for drive-cycle, etc. Efficiency is given as follows:

$$\% \mu = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta E_{UC} + \sum_{i=1}^n E_{\text{Batt}}}{\sum_{i=1}^n \Delta E_{\text{Kin}}} \times 100 \quad (14)$$

In (14),  $n$  is the number of braking processes of the BEV in the drive-cycle. Furthermore,  $\Delta E_{UC}$  is the differentiation of energy density in the UC during braking and can be obtained with the following equation:

$$\Delta E_{UC} = \frac{1}{2} C V^2 \quad (15)$$

where  $C$  is the specific capacitance of the UC and  $V^2$  is the rated voltage or potential window of the UC module during braking of the vehicle.  $\Delta E_{\text{Batt}}$  is energy density in the battery during braking according to the following relationship:

$$\Delta E_{\text{Batt}} = \int_{t_1}^{t_2} (V_{\text{Batt}} i_{\text{Batt}} - R(t) i_{\text{Batt}}^2) dt \quad (16)$$

where  $R$  is initial internal resistance of the charging battery.  $V_{\text{Batt}}$  and  $i_{\text{Batt}}$  are the voltage and current of the battery, respectively. Additionally,  $t_1$  and  $t_2$  are the beginning and stopping of decelerating or braking processes. Finally,  $\Delta E_{\text{Kin}}$  is the differentiation of kinetic energy in the BEV which can be obtained as follows:

$$\Delta E_{\text{Kin}} = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) \quad (17)$$

where  $m$  is the mass of the BEV and  $v_1$  and  $v_2$  are vehicle velocities during braking.

### 3.5 Analysis of the system losses in the proposed system

In this study, the conduction and switching losses of the

unidirectional dc-dc converter are considered for Buck mode. The dc-dc converter conduction losses of the high-side switch is computed as

$$P_{\text{on,H}} = I_{\text{out}}^2 \times R_{\text{on,H}} \times \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \quad (18)$$

The dc-dc converter conduction losses of the low-side IGBT can be written as

$$P_{\text{on,L}} = I_{\text{out}}^2 \times R_{\text{on,L}} \times \left(1 - \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}\right) \quad (19)$$

where  $V_{\text{in}}$  is the input voltage,  $V_{\text{out}}$  is the output voltage.  $R_{\text{on,H}}$  is the high-side IGBT on resistance,  $R_{\text{on,L}}$  is the low-side IGBT on resistance.

The switching losses of dc-dc converter can be expressed as:

$$P_{\text{sw,dc}} = f_s \left[ \frac{1}{2} V_G |I_L| (t_r + t_f) + \frac{1}{2} V_G^2 C_{\text{oss}} + Q_{\text{charge}} V_G + V_G Q_{\text{rr}} \right] \quad (20)$$

The inductor current is  $I_L$ , which is equal to the UC current  $i_L$ . The output capacitance of the dc-dc converter is  $C$  and  $V_G$  is the voltage across. The switching frequency  $f_s$  is 50 kHz.  $t_r$  and  $t_f$  are the rise-time and fall-time transitions of IGBTs during switching periods.  $C_{\text{oss}}$  is the output capacitance of IGBT.  $Q_{\text{charge}}$  is the gate charge due to charging the gate capacitance by gate voltage.  $Q_{\text{rr}}$  is the reverse recovery charge.  $V_G$  is the gate voltage.

The reverse recovery loss in the body diode can be written as

$$P_{\text{Diode}} = \frac{1}{2} \times V_{\text{in}} \times I_{\text{rr}} \times t_{\text{rr}} \times f_s \quad (21)$$

where  $I_{\text{rr}}$  is the peak value of body diode reverse recovery current.  $t_{\text{rr}}$  is the body diode reverse recovery time.

As regards both the electrical losses of the inverter and the motor, these can be expressed by the approximate relationship

$$P_{\text{Inv, Mot, loss}} = P_{\text{const}} + k P^2 \quad (22)$$

where  $P_{\text{Inv, Mot, loss}}$  is the power of losses at power level ( $P$ ).  $P_{\text{const}}$  is the power of constant losses.  $k$  is the constant [ $\text{W}^{-1}$ ].

The values of parameters  $k$ ,  $P_{\text{const}}$  are defined by the systems losses analysis of the inverter and motor as a function of operating power. Assuming therefore that the mean power during braking is given as

$$P_{\text{brake}} = \frac{\Delta E_{\text{Kin}}}{t_{\text{brake}}} \quad (23)$$

where  $\Delta E_{kin}$  is the kinetic energy portion converted into electric energy.  $t_{brake}$  is the set time of braking.

The total power losses in HESS are the sum of power losses in the dc-dc buck converter, inverter, motor, during braking and the UC/battery as

$$P_{HESS,loss} = P_{on,H} + P_{on,L} + P_{sw,loss} + P_{Diode} + P_{Inv.Mot,loss} + P_{brake} + I_{UC}^2 R_{UC} + I_{batt}^2 R_{batt} \quad (24)$$

Since the total power loss is obtained, the efficiency can be calculated with the following equation

$$\eta = \frac{V_{OUT} \times I_{OUT}}{(V_{OUT} \times I_{OUT}) + P_{HESS,loss}} \quad (25)$$

where  $V_{OUT}$  is the output voltage.  $I_{OUT}$  is the output current.

#### 4. Experimental and Simulation Results

The proposed regenerative braking was simulated and modeled using Simulink within MATLAB. The New York City Cycle (NYCC) drive cycle was selected to evaluate regenerative braking performance. The length of the drive cycle for testing was 8210.28 meters using total actual driving time of 824 seconds. The maximum speed of the vehicle stretched 78.48 km/h and in driving time, the BEV spent 36.31% in decelerating mode. The entire BEV components, comprised of the BLDC motor, battery, UC, etc., were modeled as data analysis applications as well as lookup table and efficiency maps based on the empirical measurements obtained from literature, datasheets, etc. The model uses specified speeds as inputs and controls the rate power, velocity, and torque that meet the velocity of the vehicle. Table 2 show that the parameters of the HESS and RBS for the simulations and experiments

Fig. 11(a) shows speed curve of the vehicle drive-cycle. The BEV is accelerated to a constant speed. After that, it is decelerated to standstill mode again. This process is repeated two more times at a constantly increasing velocity. Consequently, the proposed HESS can be activated at all operating modes using the simulation in a virtual driving environment.

The motor torque curve of the BEV is illustrated in Fig. 11(b). In the acceleration mode of the vehicle, the required motor torque reaches approximately 154 N.m. The highlighted area is demonstrates the regenerative braking area, in which energy is transferred to the HESS. While, constant speeds are increased, the braking torque is increased, that clearly illustrating the efficient performance of the proposed ANN controller.

The distribution of braking force of the front, rear wheel and proportion of regenerative braking forces as well as the mechanical forces are achieved through operation in real time by the ANN controller, as illustrated in Fig. 12(a). It

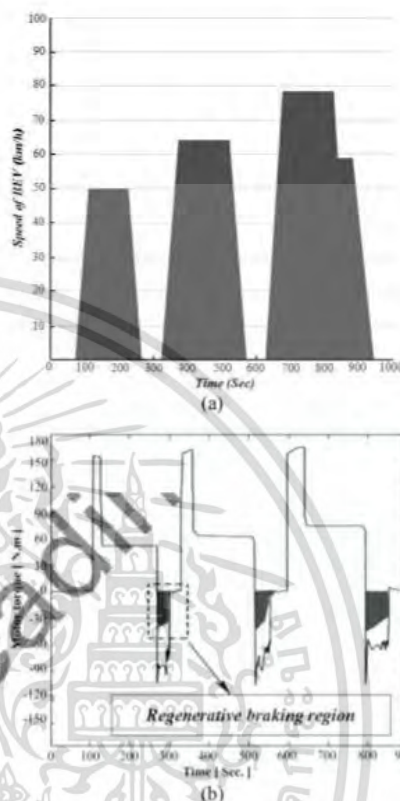


Fig. 11. (a) Simulated speed curves of the proposed RBS in NYCC drive cycle; (b) Motor-Generator torque curve of the proposed RBS

can be summarize that the braking force of the front wheel is significantly larger than the braking force of the rear wheel. Furthermore, regenerative braking proportion is increased at further constant speeds of the vehicle. In addition, regenerative braking will be considerably lower via the ANN controller at low vehicle speeds and shares to braking force for stability deceleration of the BEV.

In acceleration mode of the vehicle is shown in Fig. 11 (b). The BLDC motor is required a high transient torque. Hence, a large transient current will be drawn from the HESS element, which can substantially degrade battery life. As shown in Fig. 12(b), the UC module assists the battery pack during acceleration mode and high power mode of the BEV. When the battery discharge current reaches the maximum value of 20 A, the UC module will be provide the rest of the current demand by regulating PWM in the power converter. Moreover, it can be concluded that the large current of regenerative braking is harvested through

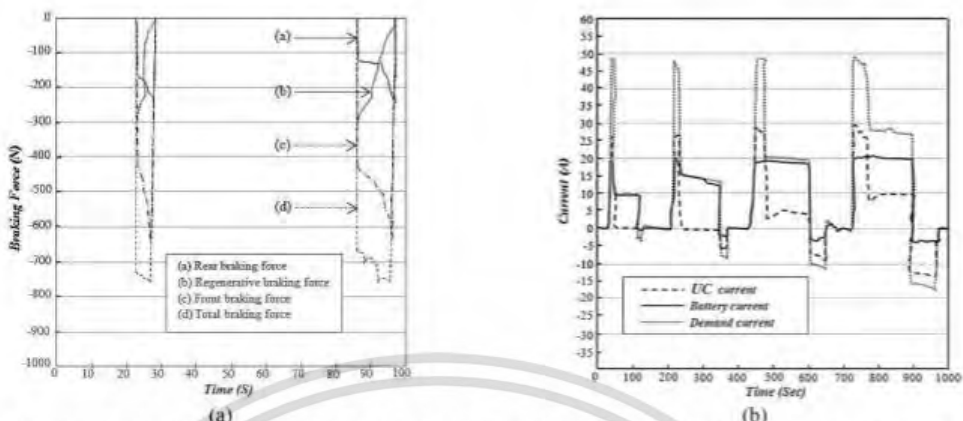


Fig. 12. Simulated braking force distribution and current waveforms of the UC, battery and BLDC motor: (a) Braking force distribution between the front and rear wheels of the BEV; (b) Simulated current waveforms of the UC, battery and BLDC motor

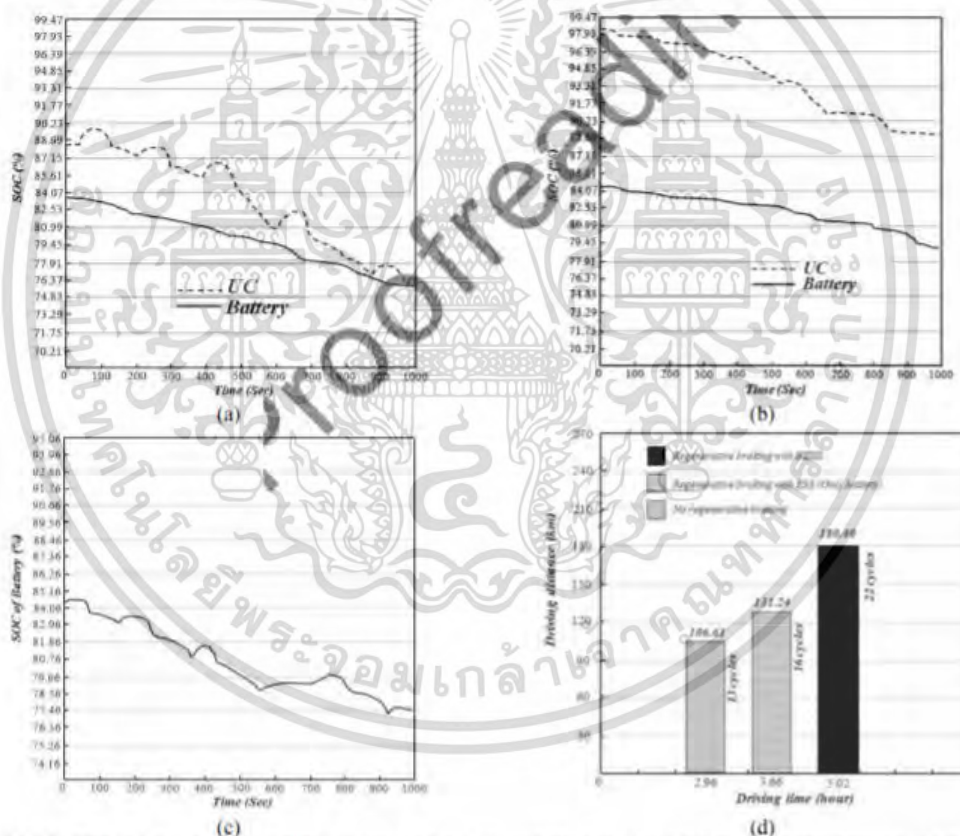


Fig. 13. The SOC relative to time and driving range: (a) the initial SOC of 88.1% (UC) and 83.3% (battery), (b) the initial SOC of 98.07% (UC) and 84.18% (battery). (c) SOC of the battery in the BEV without HESS when the initial SOC of the battery is 84.26% (d) The driving range of the BEV without RBS, with the battery-only RBS, with the UC/battery (HESS) RBS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Performance Evaluation of Regenerative Braking System Based on a HESS in Extended Range BEV

the UC module, which not only increases braking efficiency, but also maintains the battery from large currents of charging.

The efficiency of the proposed scheme can be estimated using the state of charge of the HESS during the drive-cycle. Fig. 13(a) shows the initial SOC of the UC and the battery. In the first circumstance, the SOC of the UC and battery are set to 88.1% and 83.3%, respectively. Consequently, UC voltage is much lower than the maximum safety zone (95%). Accordingly, braking energy is harvested by only the UC. In the second circumstance, the state of charge of the UC reaches 98.07%, as shown in Fig. 13(b). Consequently, the SOC of the UC is over the safety threshold. Hence, braking energy cannot be harvested through the UC. Therefore, regenerative braking is harvested through the battery by regulating the DC-link voltage. Fig. 13(c) shows the battery SOC's in case the vehicle is driven with only the battery.

For the two conditions mentioned above, where the SOC's of the UC are 88.1% and 98.07%, efficiency is calculated at 49.2% and 45.4%, respectively. In the second case, the battery is used for regenerative braking since the UC voltage is beyond the safety threshold during the braking circumstances. Since the battery maximum charge current is limited, heat of the braking energy will be transferred through frictional braking. Hence, the efficiency of regenerative braking is decreased 3.8%, according to (14). In case the BEV is driven with only the battery (ESS), efficiency is decreased about 27% compared to case 1 (Regenerative braking with UC).

Moreover, the power loss evaluation of the regenerative braking with battery of the proposed HESS (Fig. 13b) is analyzed and compared with the regenerative braking with only the battery (the BEV driven with only the battery). Since the conduction loss is increased, the power loss of the regenerative braking with battery of the proposed HESS is increased by 9.83 W compared to the regenerative braking with only the battery (the BEV driven with only the battery).

In the case of the proposed system, the result shows the UC assists the battery pack during BEV acceleration and high speeds, as seen in Fig. 13(a) and 13(b), respectively. After arriving of the battery maximum discharge current, the UC supplies the rest of the load demand. Moreover, a large braking energy is harvested by the UC module (Fig. 11 (b)), which not only improves the braking efficiency, but also protects the battery from deep discharge. Since the braking current could be effectively stored, the BEV driving range can be significantly increased with compared to the BEV driven with only the battery (ESS). In Fig. 13(c), shows the SOC of the battery during the BEV is driven with only the battery.

The drive range of the BEV is computed more intuitive to estimate the performance of the RBS. The initial SOC's of the UC and the battery are selected 99% and 97%, respectively and the result is shown in Fig. 13(d).



Fig. 14. Test bench of the proposed RBS strategy

Fig. 13(d) shows the drive range is about 13 cycles in case of the BEV driven with only the battery (ESS) and driving cycle pattern is shown in Fig. 11(a), which a distance per cycle approximately 8.2 kilometers. Accordingly, it can be seen that the proposed HESS and the RBS strategy are improved the drive range of the BEV approximately 74 kilometers. Moreover, the drive range can increase approximately 49 kilometers compared with the regenerative braking with ESS.

The proposed RBS strategy was tested in the laboratory in order to perform an evaluation. The laboratory and equipment configurations for testing of the proposed RBS strategy are shown in Fig. 14. The battery module is an EP-24 15F lithium ion battery module rated at 12 Volt 20Ah 3 packs in series and weight about 6.8 kg. The BoostCap ultracapacitor is rated at 2.7V, 500 Farad from Maxwell Technologies are connected in 18 cells in series and weight about 1.3 kg. The unidirectional dc/dc buck converter is rated at 1.25 kW and is used to interface the UC module and battery pack. The motor controller is rated at 24–120 v, 600 A from VEC300 model. The BLDC motor is rated at 48-120 vdc, 3000-5000 rpm 5 kW from LapVolt series. The Data Acquisition and Control Interface 9063 are used to record the electrical characteristics data. The specifications of the UC and battery are presented in Table 3.

Fig. 15 shows waveforms of the current and voltage of DC-link, battery current, UC current and Back EMF waveform, which generated in stator winding during braking mode. When the brake pedal is engaged, the controller will regulate the voltage of DC-link for constant torque braking with the UC. In this time duration, most of the current of DC-link is transferred to the UC and the current of battery is zero. After the voltage of the UC is beyond the maximum safety threshold, the controller will regulate the voltage of the DC-link for constant torque braking by battery. In this case, the voltage of DC-link is lower than the voltage of the UC and D3 is reverse biased. Therefore, the current of UC is relatively zero. The current of DC-link is charging with the battery pack.

During the braking process, the Back-EMFs begin to decrease. The system switches to frictional braking by the controller. Fig. 15(d) shows the voltage of DC-link at

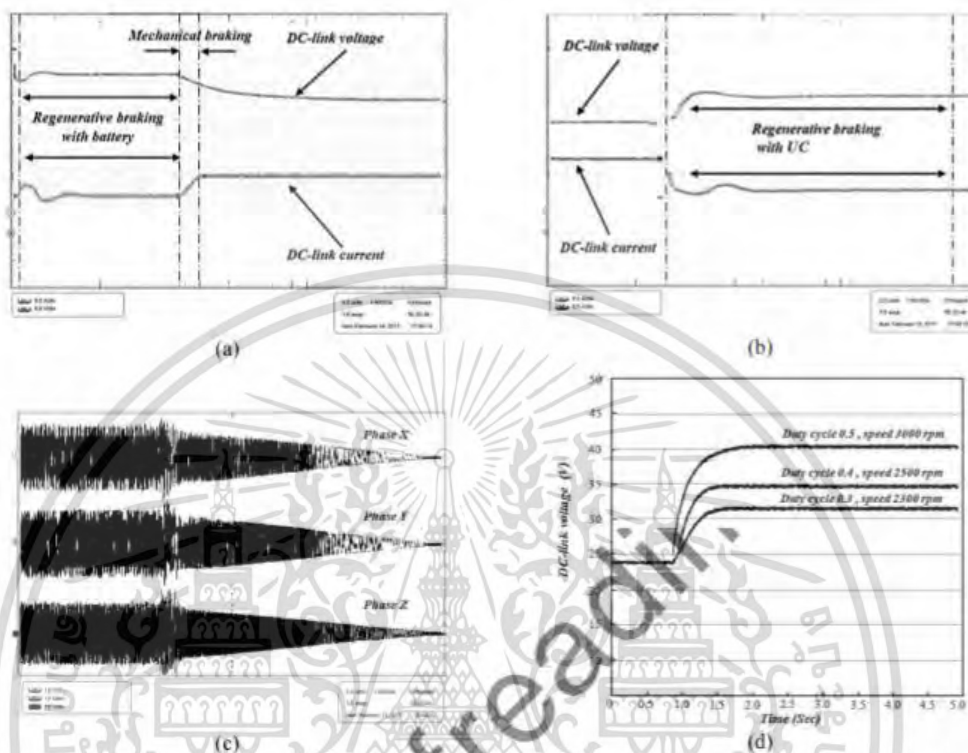


Fig. 15. Experimental results of the proposed RBS: (a) Voltage and current waveforms of the DC-link during normal conditions and regenerative braking; (c) Back-EMFs of the stator windings during normal conditions and regenerative braking; (d) DC-link voltage at different speeds duty and duty cycles.

various duty-cycles and speeds. It is clear that the proposed RBS with suitable switching pattern, as explained in Section 3 operates precisely. Moreover, the voltage of DC-link is able to be adjusted by the regulation of PWM duty cycle in the three-phase inverter.

## 5. Conclusion

In this paper, proposed HESS with a novel RBS strategy for BEVs driven using a three-phase BLDC motor based on the utilization of UC/Battery for HESS. In regenerative braking mode, braking energy is harvested through the UC using suitable switching pattern of a three-phase inverter. Hence, regenerative braking efficiency is increased due to the elimination of power electronics interfaces. Meanwhile, braking force distribution between the front and rear wheels of the BEV is controlled by a Multilayer Perceptron (MLP) function in ANN controller. In addition, a PI controller is utilized to regulate the PWM duty cycle in the three phase inverter to improve constant torque braking.

The proposed RBS strategy demonstrates excellent

efficiency and is simpler to implement compared to other types of RBS strategies. The BEV is simulated in NYCC drive cycle, which illustrates that the efficiency of regenerative braking is improved by approximately 27% compared to the regenerative braking with ESS. Moreover, it has been shown that the driving range of the BEV is increased by approximately 6 cycles. It can be concluded that the proposed scheme is able to improve the efficiency of braking energy while ensuring safe and stable deceleration of the BEV.

## References

- [1] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, and A. Emadi, "Energy storage systems for automotive applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2258-2267, 2008.
- [2] A. Emadi, Y. J. Lee, and K. Rajashekar, "Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2237-2245,

- 2008.
- [3] K. Jonghoon, S. Jongwon, C. Changyoon, and B. H. Cho, "Stable configuration of a Li-Ion series battery pack based on a screening process for improved voltage/SOC balancing," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 411-424, 2012.
- [4] Y. Kim, and N. Chang, "Design and management of energy-efficient hybrid electric energy storage systems," *Springer*, pp.19-25, 2014.
- [5] H. Yin, C. Zhao, M. Li and et al., "Utility function-based real-time control of A battery ultracapacitor hybrid energy system," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 11, no. 1, pp. 220-231, 2015.
- [6] P. J. Grbović, P. Delarue, P. Le Moigne and P. Bartholomeus, "A bidirectional three-level DC-DC converter for the ultracapacitor applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 10, pp. 3415-3430, Oct. 2010.
- [7] M. T. E. Heinrich, F. Kelch, P. Magne, and A. Emadi, "Regenerative braking capability analysis of an electric taxiing system for a single aisle midsize aircraft," *IEEE Trans. Transport. Electric.*, vol. 1, no. 3, pp. 298-307, Oct. 2015.
- [8] M.-E. Choi, J.-S. Lee and S.-W. Seo, "Real-time optimization for power management systems of a battery/supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 8, pp. 3600-3611, Oct. 2014.
- [9] J. Cao, and A. Emadi, "A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 122-132, 2011.
- [10] K. Chol-Ho, K. Moon-Young, and M. Gun-Won, "A modularized charge equalizer using a battery monitoring IC for series-connected Li-Ion battery strings in electric vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 8, pp. 3779-3787, 2013.
- [11] J. Shen and A. Khaligh, "A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system," *IEEE Trans. Transport. Electric.* vol. 1, no. 3, pp. 223-231, Oct. 2015.
- [12] A. Kuperman, I. Aharon, S. Malki and A. Kara, "Design of a semiactive battery-ultracapacitor hybrid energy source," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 2, pp. 806-815, Feb. 2013.
- [13] N.R. Tummuru, S. Member, M.K. Mishra and et al., "Dynamic energy management of renewable grid integrated hybrid energy storage system," *Dyn. Energy Manag. Renew. Grid Integr. Hybrid Energy Storage Syst.*, vol. 62, no. 12, pp. 7728-7737, 2015.
- [14] S. Dusmez, A. Hasanzadeh and A. Khaligh, "Comparative analysis of bidirectional three-level DC-DC converter for automotive applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 5, pp. 3305-3315, 2015.
- [15] T. Mesbahi, N. Rizoug, F. Khenfri, P. Bartholomeus and P. Le Moigne, "Dynamical modelling and emulation of Li-ion batteries-supercapacitors hybrid power supply for electric vehicle applications," *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 7, pp. 161-169, Nov. 2016.
- [16] A. Castaigns, W. Lhomme, R. Trigui and A. Bouscayrol, "Comparison of energy management strategies of a battery/supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints," *Appl. Energy*, vol. 163, pp. 190-200, 2016.
- [17] R. E. Araujo, R. de Castro, C. Pinto, P. Melo and D. Freitas, "Combined sizing and energy management in EVs with batteries and supercapacitors," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 7, pp. 3062-3076, Sep. 2014.
- [18] S. K. Kollimalla, M. K. Mishra and N. L. Narasamma, "Design and analysis of novel control strategy for battery and supercapacitor storage system," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1137-1144, Oct. 2014.
- [19] Z. Chen, R. Xiong, K. Wang and B. Jiao, "Optimal energy management strategy of a plug-in hybrid electric vehicle based on a particle swarm optimization algorithm," *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 3661-3678, 2015.
- [20] J. I. Torres, R. Gonzalez, A. Gimenez and J. Lopez, "Energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles. A comparative study," *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 816-824, Jan. 2014.
- [21] T. Mesbahi, F. Khenfri, N. Rizoug, P. Bartholomeus and P. Le Moigne, "Combined optimal sizing and control of Li-Ion battery/supercapacitor embedded power supply using hybrid particle swarm-Nelder-Mead algorithm," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 59-73, Jan. 2017.
- [22] J. O. Estima and A. J. M. Cardoso, "Efficiency analysis of drive train topologies applied to electric/hybrid vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 3, pp. 1021-1031, Mar. 2012.
- [23] F. Odeim, J. Roes and A. Heinzl, "Power management optimization of an experimental fuel cell/battery/supercapacitor hybrid system," *Energies 2015*, vol. 8, pp. 6302-6327, Mar. 2015.
- [24] R. Hoseinnezhad and A. Bab-Hadiashar, "Efficient antilock braking by direct maximization of tire-road frictions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 8, pp. 3593-3600, Aug. 2011.
- [25] A. V. Topalov, Y. Oniz, E. Kayacan and O. Kaynak, "Neuro-fuzzy control of antilock braking system using sliding mode incremental learning algorithm," *Neurocomputing*, vol. 74, no. 11, pp. 1883-1893, May 2011.
- [26] J. Ko, S. Ko, I. Kim, D. Hyun and H. Kim, "Co-operative control for regenerative braking and friction braking to increase energy recovery without wheel lock," *Int. J. Autom. Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 253-262, Mar. 2014.
- [27] G. Hongwei, G. Yimin, and M. Ehsani, "A neural

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

network based SRM drive control strategy for regenerative braking in EV and HEV," *Electric Machines and Drives Conference*, pp. 571-575, June 2001.

- [28] J. Ko, S. Ko, H. Son, B. Yoo, J. Cheon and H. Kim, "Development of Brake System and Regenerative Braking Cooperative Control Algorithm for Automatic-Transmission-Based Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 2, pp. 431-440, May 2014.
- [29] N. Mutoh, "Driving and braking torque distribution methods for front-and rear-wheel-independent drive-type electric vehicles on roads with low friction coefficient," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 10, pp. 3919-3933, Feb. 2012.



**Kunagone Kiddee** He received the B.Eng degree in electronics engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang in 2013. Currently, he is pursuing the Ph.D. degree in electrical engineering in King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. His research interests

include power electronics, electric vehicle systems, intelligent control, and electrical machines.



**Werachet Khan-Ngern** He received B.Eng and M.Eng in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand and received his Ph.D. and DIC in electrical engineering (power electronics) from Imperial College of Science Technology and Medicine,

University of London in 1997. He is currently an associate professor at electrical engineering department, KMITL, Thailand. His research areas are focused on electromagnetic compatibility, converters, inverters, energy storage and green energy applications. His recently research is focused on zero emission vehicle from proton exchange membrane fuel cell EVs, lithium phosphate battery application in EVs, amphibious EVs, wireless power charging for EVs, design of maximum power point tracking for PV system and the design of high performance electric car using carbon nano tube (CNT) material to meet a high EV energy saving.



## Outline

FOUNDED	May 1888
SERVICES	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monthly Distribution of The Transactions of IEEJ</li> <li>- Member discount on IEEJ publications</li> <li>- Photocopying service</li> <li>- Supporting members for the international activities</li> <li>- Association with foreign countries</li> </ul>
NUMBER OF THE MEMBERS OF EACH SOCIETY (5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SOCIETY A (Fundamentals and Materials) 2,748</li> <li>- SOCIETY B (Power and Energy) 7,925</li> <li>- SOCIETY C (Electronics, Information and Systems) 3,919</li> <li>- SOCIETY D (Industry Applications) 6,261</li> <li>- SOCIETY E (Sensors and Micromachines) 1,256</li> </ul>
NUMBER OF MEMBERS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PERSONNEL TOTAL 22,109</li> <li>- 21,366</li> </ul>

### about IEEJ

[President's Inaugural Address](#)  
[Overview](#)  
[Outline](#)  
[IEEJ Members of Board of Directors](#)  
[Code of Ethics](#)  
[Code of Conduct](#)  
[Secretariat](#)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A HSC/Battery Energy Storage System-based Regenerative Braking System Control Mechanism for Battery Electric Vehicles Driven by Induction Motor

Kunagone Kiddee<sup>\*a)</sup> Non-member, Wiwat Keyoonwong<sup>\*</sup> Non-member,  
 Werachet Khan-Ngern<sup>\*</sup> Non-Member

(Manuscript received xxx. 00, 20XX, revised xxx 00, 20XX)

This research proposes a novel hybrid energy storage system (HESS) for the regenerative braking system (RBS) of the front-wheel induction motor-driven battery electric vehicle (BEV). The HESS was an amalgamation of multiple hybrid supercapacitors (HSC) and lithium-ion battery cells. The artificial neural network (ANN)-based RBS control mechanism was utilized to optimize the switching scheme of the RBS's three-phase inverter and the vehicular braking force distribution. In the regenerative braking mode, the ANN-based HSC/battery RBS transferred the braking energy to be stored in the HSC and, upon reaching the HSC maximum safety threshold, subsequently to the battery. In addition, the RBS control mechanism could achieve the uniform braking force distribution between the front and rear wheels of the vehicle. Furthermore, the research findings revealed that the experimental HSC/battery RBS program enhanced the harvesting of the regenerative braking energy, as evident in the longer driving distance vis-à-vis that of the battery-only vehicle. The HSC/battery RBS also contributed to the improved vehicle acceleration and the extended battery life.

**Keywords:** Battery electric vehicles (BEV); Hybrid Energy Storage System (HESS); Three Phase Inverter; Regenerative Braking System (RBS); Artificial Neural Network (ANN)

## 1. Introduction

The rapid economic growth and rising affluence contributes to the increase in private-car ownership and the ensuing vehicular toxic emissions. The toxic emissions from the internal combustion engine (ICE) vehicles in turn harm human health and the environment. As a result, numerous attempts have been made to mitigate the harmful effects and improve the livability of urban areas. One such effort is the battery electric vehicle (BEV) since this type of vehicle offers several advantages over the conventional ICE vehicles, including energy efficiency, low pollution, modernity, environmental-friendliness and low maintenance. Importantly, the BEV generates considerably lower carbon emissions<sup>(1)-(4)</sup>.

At present, most battery electric vehicles are run on the electrochemical battery (i.e. the main energy storage system). However, the electrochemical batteries suffer from a number of drawbacks, including the high cost, short life cycle, limited driving range and low power density and the subsequent diminished regenerative braking efficiency. Furthermore, to meet the vehicle power demand during acceleration and high power mode, a bulky energy storage system (ESS) containing multiple battery packs is required.

To overcome the drawbacks, the hybrid energy storage system

(HESS) based on multiple battery and supercapacitors (SC) was utilized to improve the vehicle acceleration and prolong the battery life span<sup>(5)-(8)</sup>. In addition, the other battery/SC HESS topologies for the BEV are proposed<sup>(6),(11)</sup>. Specifically, the battery/SC HESS scheme utilizes the high power density of an SC and the high energy density of a battery. Nevertheless, a high-power electronic interface, e.g. the bidirectional DC/DC converter, is required to connect the battery and the SC, rendering it cost-ineffective<sup>(10)-(13)</sup>. Moreover, the high-power electronic interface induces the power dissipation and the subsequent diminished regenerative braking efficiency<sup>(20)-(29)</sup>.

Table 1. The properties of the hybrid supercapacitor (HSC) and electrochemical lithium-ion battery

Specifics	Hybrid Supercapacitor (HSC)	Lithium-ion Battery
Cell voltage (Volt)	3.2 to 5	3.7 to 4.35
Cycle life	20,000 to 100,000	400 to 1200
Self-Discharge	Very low < 2 mA	Very low < 0.5 mA
Specific energy (Wh/L)	30-60	100-600
Specific power (W/L)	~10000	500 to 3,000
Charge time	5-15 seconds	10-90 minutes
Discharge time	Sec/Minutes	Minutes/Hours
Charge/Discharge Efficiencies	>95%	80-96%

a) Correspondence to: Kunagone Kiddee. E-mail: kkunagone@gmail.com

\* Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Rd. Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

An improved SC technology, the hybrid supercapacitor (HSC) combines the high power density characteristic of the electric double layer capacitor (EDLC) with the high energy density feature of the pseudo capacitor. Table 1 tabulates the properties of the hybrid supercapacitor (HSC) and electrochemical lithium-ion battery<sup>(22),(24)</sup>. The HESS fashioned from the HSC and the lithium-ion battery (i.e. the HSC/battery HESS topology) could thus realize the super-high power density of the HSC and the high energy density of the battery. In this research, a new HESS topology encompassed a HSC module, a multi-cell battery pack, a regenerative diode and a DC/DC buck converter is proposed.

Specifically, this research experiments with the proposed HSC/battery HESS topology on the regenerative braking system (RBS) program of the front-wheel battery electric vehicle (BEV) driven by the three-phase induction motor under four operation modes: the normal mode, the acceleration mode, the HSC-and battery-enabled regenerative braking modes. Furthermore, for the proposed HSC/battery HESS, a new artificial neural network (ANN)-based RBS control mechanism is developed. In the regenerative braking condition, the DC-link voltage is boosted. Hence, the ANN-based RBS program transferred the braking energy to store in the HSC, until reaching the maximum safety threshold (96%), and subsequently diverted the energy to the battery using suitable switching scheme of the three-phase inverter. Moreover, the ANN-based RBS control mechanism was utilized to optimize the three-phase inverter's switching scheme and the breaking force distribution of the vehicle. In the proposed scheme, the efficiency of regenerative braking is improved due to elimination of the utilized power electronics interfaces. Simulations were carried out and the lab-scale experiments undertaken. In short, the proposed ANN-based HSC/battery-enabled RBS program contributes to the improved vehicle acceleration, the extended battery life attributable to the HSC's supplemental function and the elongated drive range. The organization of this research is as follows: Section 1 is the introduction. Section 2 discusses the HSC/battery HESS topology and operation modes. Section 3 describes the ANN-based control mechanism of the proposed regenerative braking system (RBS), while Section 4 deals with the simulation and experimental results of the proposed RBS program. The concluding remarks are provided in Section 5.

## 2. The HSC/battery HESS and operation modes

Fig. 1 illustrates the schematic of the experimental hybrid energy storage system (HESS), consisting of the multi-cell HSC module, the multi-cell battery pack and a unidirectional DC/DC buck converter. Given the direct connection between the DC-link and the battery, the DC-link voltage was relatively constant. The unidirectional DC/DC buck converter was deployed to connect the battery to the HSC module such that the HSC voltage remained higher than that of the battery. The HSC module was connected in parallel with the battery using a regenerative diode ( $D_3$ ). The HESS then supplied the voltage through the three-phase inverter to the three-phase induction motor (IM). The HSC/battery HESS is operable in four modes: the normal mode, the acceleration mode, the HSC- and battery-enabled regenerative braking modes.

In the normal mode, the battery power is sufficient to meet the vehicle power demand, giving rise to the higher HSC voltage vis-à-vis the battery voltage and the subsequent reverse-biased power diode ( $D_3$ ). Under this condition, the battery is the sole

voltage supplier to the three-phase induction motor. Fig. 2 illustrates the energy flow of the HSC/battery HESS in the normal operational mode.

In the acceleration mode, the battery power is insufficient to meet the vehicle power demand, leading to the excessive deep discharge and the subsequent degradation of vehicle acceleration. The power mismatch activates the HSC to compensate the power deficit through the DC-DC buck converter, given that the HSC voltage is beyond the minimum HSC threshold ( $V_{HSC} \geq V_{HSCmin}$ ). In addition, the regenerative diode ( $D_3$ ) becomes reverse-biased. Under the acceleration condition, the three-phase induction motor is driven by both the HSC module and the battery. Fig. 3 depicts the energy flow under the acceleration condition.

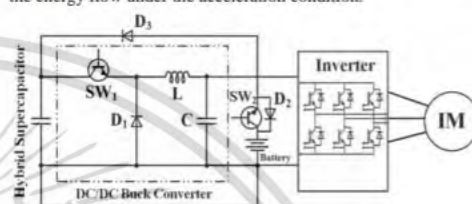


Fig. 1. The schematic of the experimental HSC/battery HESS, the three-phase inverter and induction motor

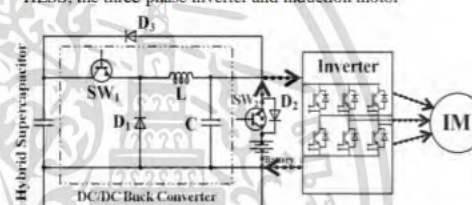


Fig. 2. Energy flow of the HSC/battery HESS in the normal mode

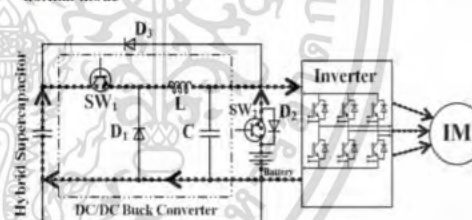


Fig. 3. Energy flow of the HSC/battery HESS in the acceleration mode

In the HSC-enabled regenerative braking mode, the DC-link voltage is boosted and  $D_3$  becomes forward-biased. The regenerative braking energy is then transferred and stored in the HSC module (Fig. 4). Conventionally, an additional buck-boost DC/DC converter is deployed to transfer the braking energy to the HSC. Nevertheless, this technique suffers from the higher implementation cost and the diminished energy transfer efficiency induced by the power dissipation. To overcome, the inductors could be introduced into the three-phase induction motor, along with the optimal ANN-generated switching scheme through the bidirectional three-phase inverter. While the three-phase inverter is form a boost circuit. The IGBTs on the high side of the

half-bridge are turned off and the IGBTs of the low arms are pulse width modulated. The switching schemes are more discussed in Section 3. It should be noted that the HSC-enabled regenerative braking mode is activated only if  $V_{HSC} \leq V_{HSC,mb}$ , where  $V_{HSC,mb}$  is the safety threshold voltage of the HSC module. In the battery-enabled regenerative braking mode, once the HSC module reaches the maximum voltage threshold, the DC-link voltage is re-boosted and  $D_2$  becomes forward-biased, giving rise to the braking energy being transferred and stored in the battery via  $D_2$  (Fig. 5).

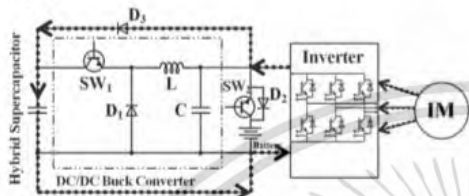


Fig. 4. Energy flow of the HSC/battery HESS in the HSC-enabled regenerative braking mode

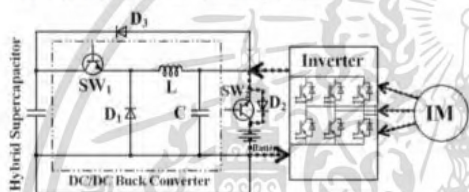


Fig. 5. Energy flow of the HSC/battery HESS in the battery-enabled regenerative braking mode

Once DC-link voltage is boosted for achievement of HSC-enabled regenerative braking, both  $D_2$  and  $D_3$  are forward biased. Considering dynamics of the regenerated current flows in both side, HSC charging and battery charging, it is clear that the HSC contribution is considerably higher than the battery for harvesting the braking energy. In fact, the braking procedure time constant is close to time constant of HSC and is much lower than time constant of the battery. Moreover, due to high power density and lower equivalent series resistance (ESR) of HSC, most of the braking current is harvested by the HSC. Therefore, forward-biasing of  $D_2$  has no significant impact on the operation of HSC-enabled regenerative braking mode.

3. The proposed regenerative braking system (RBS)

Fig. 6 illustrates the equivalent circuits of the HESS, the six half-bridge-IGBT three-phase inverter and the three-phase induction motor. Specifically, in the induction motor,  $r_a$  and  $L_a$  are the armature resistance and inductance; and  $EMF_x$ ,  $EMF_y$  and  $EMF_z$  are the back-EMFs generated in the armature of phases X, Y and Z, respectively. In the regenerative braking mode, the DC-link voltage is boosted and the braking energy stored in the HSC via  $D_3$  and subsequently in the battery via  $D_2$ .

In the normal mode, six IGBTs in the three-phase inverter are commutated according to the rotor position, obtained by the Hall Effect sensors. Under the regenerative braking condition, the

high-side half-bridge IGBTs are turned off and the low-side switches are modulated by a proportional integral (PI) controller for the optimal switching scheme. Fig. 7 (a)-(b) respectively illustrates the waveforms of the back-EMFs, armature currents and switching scheme in the normal and regenerative braking modes.

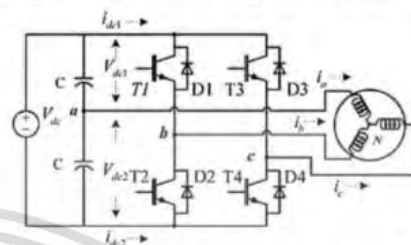


Fig. 6. The equivalent circuits of the proposed HESS, three-phase inverter and induction motor.

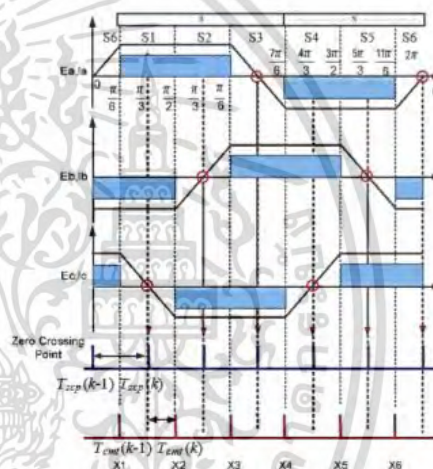


Fig. 7. The waveforms of the back-EMFs, the armature currents and the switching scheme

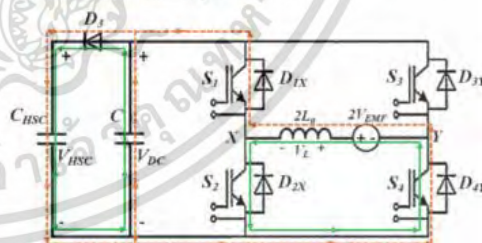


Fig. 8. Equivalent circuit of the HSC-enabled regenerative braking at each subinterval

During the regenerative braking circumstance, there are six commutation states and only one switches of the inverter is turned on and off during each state. The commutation interval ( $120^\circ - 180^\circ$ ) and equivalent circuit of the HSC-enabled regenerative

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

braking is shown in Fig. 8. Assume  $S_2$  is turn on during a time interval ( $T_{on}$ ). The linear current ramps in  $2L_a$  to a peak value can be calculated by

$$I_{peak} = \frac{V_{EMF} \times T_{on}}{L_a} \quad (1)$$

Therefore, the total energy stored in an inductor is given as follows:

$$E = \frac{1}{2}(2L_a)I_{peak}^2 = L_a I_{peak}^2 \quad (2)$$

In  $S_2$  is turn on, the capacitor ( $C$ ) is utilized to supply the output and thus,  $C$  should be sufficiently large to provide the output for time state  $T_{on}$ . Then,  $S_2$  is off,  $D_{IX}$  is forward biased and both the back-EMFs energy and the energy stored in an inductor are utilized to supply the HSC. Under such condition, when the PI controller operates using a negative feedback loop, the output voltage is adjusted by controlling the  $S_2$ . If whole energy in (2) can be transferred to the output during each time period ( $T$ ) (supposing conversion is 100% efficient), the power transferred to the load through  $2L_a$  is:

$$P_{Ind} = \frac{L_a \times I_{peak}^2}{T} \quad (3)$$

In addition, the total power  $P_{DC}$  is delivered to the output through  $2V_{EMF}$ , which can be defined as:

$$P_{DC} = 2V_{EMF} \times \frac{I_{peak}}{2} \times \frac{T_d}{T} \quad (4)$$

where  $T_d$  is time interval which the inductor current ramp down to zero. Therefore, the total power transferred to the load can be written as follows:

$$P_{Total} = P_{Ind} + P_{DC} = \left( \frac{L_a \times I_{peak}^2}{T} + 2V_{EMF} \right) \times \frac{I_{peak}}{2} \times \frac{T_d}{T} \quad (5)$$

Substituting (1) gives

$$P_{Total} = \frac{V_{EMF}^2 \times T_{on}}{T \times L_a} \times (T_{on} + T_d) \quad (6)$$

It is supposed that the circuit operates in the discontinuous mode. Consequently,  $T_{on} + T_d = uT$ , where  $u$  is a fraction less than one. Equation (6) can be written as:

$$P_{Total} = \frac{V_{EMF}^2 \times T_{on}}{T \times L_a} \times (u + T) \quad (7)$$

For the output voltage can be expressed as:

$$P_{Total} = \frac{V_{EMF}^2 \times T_{on}}{T \times L_a} \times (u + T) = \frac{V_{DC}^2}{R} \quad (8)$$

where  $R$  is the output resistance, which the conversion ratio can be expressed by

$$\frac{V_{DC}}{V_{EMF}} = \sqrt{\frac{R \times T_{on} \times u}{L_a}} \quad (9)$$

In this research, the vehicle kinematics was used for evaluation of the dynamic traction power requirement of the BEV powertrain, including the rolling resistance loss, the aerodynamic resistance

loss, the gradient force and the transient force<sup>(24)(25)</sup>.

Specifically, the rolling resistance loss ( $F_{Rr}$ ) is the force to overcome the rolling resistance of a tire on the road and can be expressed as, where  $K_{Rr}$  is the rolling resistance coefficient,  $m$  is the vehicle mass ( $kg$ ),  $\theta$  is the slope angle and  $g$  is the acceleration of gravity constant ( $m/s^2$ ).

$$F_{Rr} = K_{Rr} m g \cos \theta \quad (10)$$

The aerodynamic resistance loss ( $F_A$ ) is the air resistance force against the vehicle body and can be expressed as, where  $\rho$  is the air density ( $kg/m^3$ ),  $C_d$  is the drag force coefficient,  $A_f$  is the vehicle frontal area ( $m^2$ ) and  $v$  is the vehicle speed ( $m/s$ ).

$$F_A = \frac{1}{2} \rho C_d A_f v^2 \quad (11)$$

The gradient force ( $F_g$ ) is generated as a result of the gravitational pull and the inclination; and can be written as, where  $m$  is the vehicle mass ( $kg$ ),  $g$  is the acceleration of gravity constant ( $m/s^2$ ) and  $\theta$  is the slope angle.

$$F_g = m g \sin \theta \quad (12)$$

The transient force ( $F_T$ ) is the force required to accelerate and decelerate the vehicle and can be calculated as, where  $m$  is the vehicle mass ( $kg$ ),  $v$  is the vehicle speed ( $m/s$ ) and  $t$  is the drive-cycle interval.

$$F_T = F_{Rr} + F_A + F_g + m \frac{dv}{dt} \quad (13)$$

Substituting (10)-(12) in (13),

$$F_T = K_{Rr} m g \cos \theta + \frac{1}{2} \rho C_d A_f v^2 + m g \sin \theta + m \frac{dv}{dt} \quad (14)$$

Equation (14) can be used to approximate the required braking force to stop the vehicle within a predetermined distance.

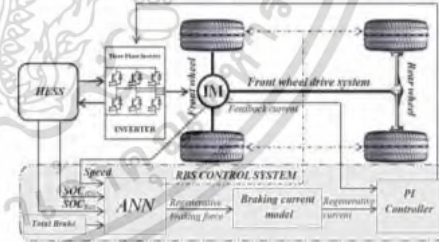


Fig. 9. Schematic of the control mechanism of the proposed RBS, where IM denotes the three-phase induction motor, total brake is the number of brake applications per drive cycle (8210.28m)

In Fig. 9, the RBS control mechanism consists of the ANN and the PI controller. Typically, in the braking mode, the braking energy is sequentially transferred to the HSC and the battery (i.e. the HESS). Nevertheless, under rare occasions does the HESS reach its maximum capacity, rendering impossible the additional charge. To mitigate the excessive braking energy, the participation

of the rear-wheel mechanical brakes is crucial to the brake force distribution. Thus, the total brake force consists of the front and rear brake forces and can be expressed as, where  $F_f$  is the front-wheel regenerative and mechanical forces and  $F_r$  is the rear-wheel mechanical force.

$$F_{vehicle} = F_f + F_r \quad (15)$$

$$F_f = \phi \frac{mg(C_r + wh_v)}{L} \quad (16)$$

$$F_r = \phi \frac{mg(C_f + wh_v)}{L} \quad (17)$$

where  $\phi$  is the adhesion coefficient,  $m$  is the overall vehicle mass,  $g$  is the gravitational constant,  $C_r$  is the centroid of the vehicle to the rear axle centerline length,  $C_f$  is the vehicle centroid to the front axle centerline length,  $h_v$  is the vehicle centroid height,  $L$  is the distance from the front to rear axle ( $L = C_f + C_r$ ), and  $w = \frac{a_{vehicle}}{g}$  where  $a_{vehicle}$  is the vehicle acceleration.

Summing (16) and (17) yields

$$F_{vehicle} = F_f + F_r = \phi mg \quad (18)$$

The maximum braking force that contributes to the simultaneous front- and rear-wheel lock for every adhesion coefficient can be calculated as

$$F_v = \frac{1}{2} \left[ \frac{mg}{h_v} \sqrt{v^2 + \frac{4h_v}{mg} F_f - \left( \frac{mgC_r}{h_v} + 2F_f \right)} \right] \quad (19)$$

Solving (18) and (19) yields the braking force required to stop the front and rear wheels. In fact, the vehicle weight (mass) substantially influences the braking performance. In this research, the total weight of the HESS-enabled BEV is 1105 kg. Table 2 tabulates the parameters of the experimental BEV.

Table 2. Parameters of the BEV and the driving condition

Parameter	Definition	value
$m$	Mass of the BEV	1105 kg
$\theta$	Slope angle	0 degree
$g$	Gravitational constant	9.81 m/s <sup>2</sup>
$\rho$	Air density	1.22 kg/m <sup>3</sup>
$A_f$	Frontal area of the BEV	2.42 m <sup>2</sup>
$C_w$	Wheel radius	0.40 m
$h_v$	Height of the vehicle centroid	0.5 m
$L$	Distance between the front and rear axles	2.45 m
$K_b$	Rolling resistance coefficient	0.012
$C_f$	Centroid of BEV to the front axle centerline	1.20 m
$C_r$	Centroid of BEV to the rear	1.25 m

	<i>axle centerline</i>
--	------------------------

The proposed RBS control mechanism is shown in Fig. 9. Once the brake pedal is pressed, the required braking force can be attained by (14). The front and rear braking force in BEVs can be considered based on the braking force distribution curve<sup>(23)</sup>. Depending on the BEV condition such as speed and state-of-charge (SOC) of battery, the look-up tables and fuzzy based controller are normally utilized to regulate the regenerative and mechanical braking force for the BEVs front wheels drive. On the other hand, in case of BEVs based on hybrid energy storage devices with HESS, the SOC of SC and battery needs being integrated into control mechanism which cause complicated control design. Likewise, the braking forces distribution strategy of electronic braking system (EBS) and other advanced braking systems for improving vehicle stability under uncertainties is complicated dynamics which cannot be certainly controlled by the aforementioned controllers.

Consequently, the ANN-based three-layer multi-layer perceptron (MLP) algorithmic scheme<sup>(30)(32)</sup> (Fig. 10) is integrated into the RBS control mechanism to optimize the braking forces between the front and rear wheels of the BEV. ANN is a computational intelligent approaches inspired by the structure, learning ability and functions of biological neural networks, which usually structured in layers. Layers are made up of a number of interconnected units which contain an activation function. Patterns are offered to the network by the input layer, which communicates to one or more hidden layer where the actual processing is completed by a system of weighted connections. The hidden layers then link to an output layer where the answer is output<sup>(30)(35)</sup>.

The capability of ANN importantly depends on the design method. First, the entire feasible cases that the ANN needs to learn will be collected in a training dataset (TD). Then, the configuration of the ANN comprising the number of the hidden, neurons and type layers needs to be identified in order to achieve a specified application. Next, the ANN with different learning factors for classification processed using the accumulated datasets. Finally, the additional datasets is required to estimate and rectify the trained ANN to verify the information.

The various simulations results illustrate that a multi-layer feed-forward ANN provide satisfactory ANN capability in this proposed scheme. The inputs include the vehicle speed, states of charge (SOC) of the HSC and the battery, and the number of brake applications per drive cycle. The mechanical braking forces of the front and rear wheels and the regenerative braking force of the front wheel are the outputs of the ANN algorithmic scheme.

Five neurons in hidden layer are analyzed. Meanwhile, the hidden layer of the algorithmic scheme consists of five neurons whose activation functions are of sigmoid function, as expressed below

$$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-u/c}} \quad (20)$$

Moreover, a threshold transfer function is used to quantify the output neurons in the ANN output layer. The proposed ANN-based three-layer multi-layer perceptron (MLP) algorithmic scheme is shown in Fig. 10. The correlation of the brake pedal depression with the front and rear braking force can be computed according to the ideal distribution curve<sup>(23)</sup>. However, the TD needs to

comprise enough statistics about the portions of the regenerative and mechanical braking forces for various functioning.

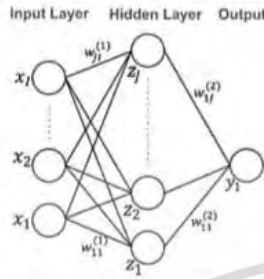


Fig.10. The ANN-based three-layer multilayer perceptron (MLP) algorithmic scheme

To establish the TD, different simulations are realized through MATLAB/SIMULINK by employing different SOC's values of the HSC and battery. The BEV velocity and the brake pedal depression are created via different drive cycle. The drive cycle specifying is very essential for simulation of appropriate braking situations.

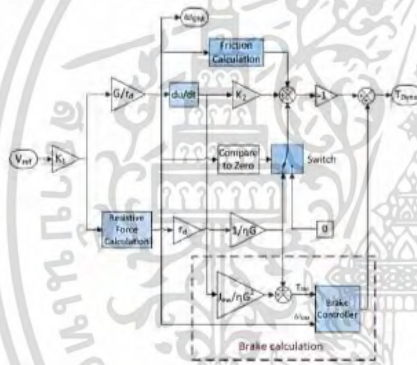


Fig.11. Simulated drivetrain configuration in MATLAB/SIMULINK

Fig. 11 illustrates the simulated drivetrain configuration in MATLAB/SIMULINK. In this paper, LAFTP-72 drive cycle is selected, in which the BEV spends 50.99% of time decelerating or/and braking. The braking situations occur at various BEV velocity and various brake pedal depression. Therefore, a large training dataset can be established. The drive cycle parameters identification for training ANN is shown in Table 3. The braking forces for BEV are computed based on three aspects. Firstly, the BEV is stopped and/or decelerated in the time and distance determined via the drive cycle. Secondly, maximum of regeneration is accomplished. Finally, SOC's of HSC and battery maintain within their safety operation zone. The Levenberg-Marquardt based backpropagation learning algorithm is used for training the ANN. The ANN-based MLP algorithmic scheme was assessed using the normalized root mean square error (NRMSE)<sup>(23)(25)</sup>, which is the maximum error between the ANN-based simulation outputs and the actual measurements; and

can be expressed as

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_n [F(n) - F^t(n)]^2}{\sum_n F^t(n)^2}} \quad (21)$$

where  $F(n)$  and  $F^t(n)$  are respectively the estimated and target outputs and  $n$  is the number of data units. In this research, the braking forces (i.e. the rear, front and regenerative braking forces) were subsequently simulated using MATLAB based on a total of 314 input combinations. The NRMSE were 0.015, 0.019, 0.022 for the mechanical rear and front braking forces and the front-wheel regenerative braking force, which are negligible. The comprehension performance characteristics of the ANN must be estimated by other braking situations which are not activated in the training stage. Therefore, the ANN is rectified using a New European Drive Cycle (NEDC) with appropriate number of braking scenarios, in which 57 different case are simulated and thus, the assessment capability of ANN can be obtained. The NRMSE were 1.302, 1.020 and 1.141 for the mechanical rear and front braking forces and the front-wheel regenerative braking force in this case.

Table 3. The parameters of the LAFTP-72 drive-cycle for training ANN

Parameter	Value	Unit
Cycle name	LA FTP-72	-
Distance	10996.78	m
Total time	1265	s
% of accelerating time	44.78	%
% of decelerating time	31.19	%
% of braking time	19.80	%
% of cruising time	18.05	%
Average speed	52.9	km/h
Maximum speed	79.22	Km/h
Average positive acceleration	0.429	m/s <sup>2</sup>
Average negative acceleration	-0.464	m/s <sup>2</sup>

Given the ANN-generated braking forces (i.e. the rear, front and regenerative braking forces), the front-wheel braking force is converted to the regenerative braking current ( $I$ ) as below

$$I = k \times F_{\text{regenerative braking}} \quad (22)$$

The regenerative braking current is manipulated by the PI controller based on the PWM duty-cycle algorithmic scheme. The ideal regenerative braking force for comfort and safe driving could thus be achieved by the proposed RBS control mechanism (Fig. 9).

The entire process flowchart of the proposed RBS control mechanism is presented in Fig. 12, which clearly demonstrates the calculations related to  $F_r$ ,  $F_f$  and  $F_r$  can be simply integrated into the ANN.

To assess the efficiency of the entire RBS program, this research uses the following equation.

$$\% \mu = \frac{\sum_{n=1}^n \Delta E_{HSC} + \sum_{n=1}^n E_{Batt}}{\sum_{n=1}^n \Delta E_{kit}} \times 100 \quad (23)$$

where  $n$  is the number of deceleration and braking per drive cycle, and  $\Delta E_{HSC}$  is the difference between the energy density in the HSC at the initiation of deceleration and the complete vehicular stop; and can be expressed as, where  $C$  is the specific capacitance of the HSC and  $V^2$  is the rated voltage of the HSC module during the braking.

$$\Delta E_{HSC} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (24)$$

$\Delta E_{Batt}$  is the difference between the energy density in the battery at the initiation of deceleration and the complete vehicular stop; and can be expressed as, where  $R$  is the initial battery internal charge resistance,  $V_{Batt}$  and  $i_{Batt}$  are the voltage and current of the battery.  $t_1$  and  $t_2$  are the time when deceleration is initiated and the time when the vehicle comes to a standstill.

$$\Delta E_{Batt} = \int_{t_1}^{t_2} (V_{Batt} i_{Batt} - R(t) i_{Batt}^2) dt \quad (25)$$

The variation of the kinematic energy ( $\Delta E_{Kinematic}$ ) can be approximated by, where  $m$  is the vehicle mass,  $v_1$  and  $v_2$  are the vehicle speeds at the initiation of deceleration and the complete vehicular stop.

$$\Delta E_{Kinematic} = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) \quad (26)$$

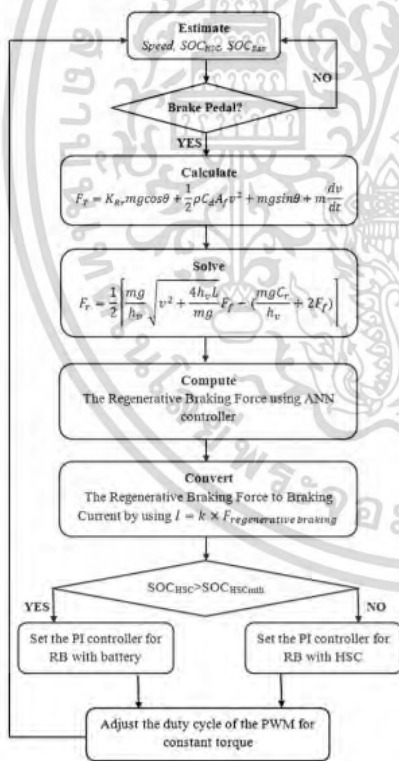


Fig. 12. The flowchart of the proposed RBS control mechanism

4. EXPERIMENTAL AND SIMULATION RESULTS

In this research, the simulations were carried out on the proposed RBS program using MATLAB/ Simulink, given the drive-cycle distance of 8150.52 m, the travel time of 880 s and the New York City drive cycle (NYCC). The maximum speed and the residence time in the deceleration mode per drive cycle were 75.41 km/h and 31.28%. Table 4 tabulates the simulated and experimental HSC, lithium-ion battery and three-phase induction motor. The IM specifications are given in Table 5.

Table 4. The simulated and experimental HSC, lithium-ion battery and three-phase induction motor

Specifics	Simulation	Experimental
Battery	Lithium-ion Battery pack from ADVISOR 12 Volt 30Ah 3 packs in series	Lithium-ion Battery pack 12 Volt 30 Ah 3 packs in series
(HSC)	Supercapacitor module Maxwell Ultra Capacitor BoostCap 2.7V 2600 Farad 18 cell in series	HSC module-Hybrid supercapacitor 2.7V 500 Farad 18 cell in series
Motor	Three-Phase Induction Motor, 5 kW from ADVISOR	Three-Phase Induction Motor, 5 kW from LapVolt series
Measurement Instrument	Data Acquisition and Control Interface 9063	

Table 5. Specifications of the induction motor

Parameter	Value	Unit
Power rating	5	kW
Voltage rating	48	V
Current rating	120	A
Rated speed	2700	rpm
Stator Resistance [ $R_s$ ]	1.46	$\Omega$
Rotor Resistance [ $R_r$ ]	1.017	$\Omega$
Stator Inductance [ $L_s$ ]	0.362	H
Rotor Inductance [ $L_r$ ]	0.363	H
Mutual Inductance [ $L_{sr}$ ]	0.102	H
Inertia coefficient [ $J$ ]	0.00004	J

Fig. 13 (a) illustrates the simulated speed curves of the HSC/battery RBS-based BEV in one drive cycle, whereby the vehicle was accelerated to the first constant speed of approximately 50 km/h for 130 s and subsequently decelerated to idle. The second cycle was launched after 50 s to the constant speed of around 64 km/h for 180 s prior to the initiation of deceleration. The final cycle was repeated after 50 s to the 78.48

km/h constant speed for 210 s.

Fig. 13 (b) illustrates the corresponding motor torque curves. The maximum motor torque was approximately 152.26 N.m under the three scenarios. The shaded areas represent the regenerative braking energy transferred and stored in the HESS. In the figure, the constant speed is positively correlated with the braking force and the subsequent regenerative braking energy, indicating the effectiveness of the proposed RBS control mechanism (Fig. 9).

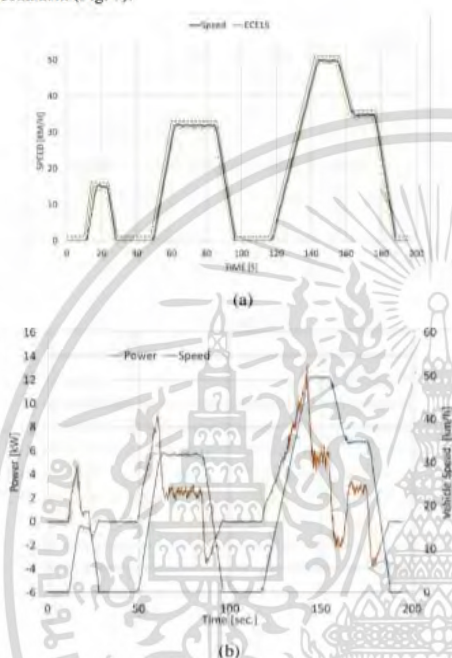


Fig. 13. The simulated RBS performance per drive cycle: (a) the speed curves of the RBS-based BEV, (b) Speed and power from batteries during the NYCC driving cycle

Fig. 14 (a) illustrates the braking force distribution between the front and rear wheels based on the ANN-based RBS control mechanism. By comparison, the front-wheel braking force (both regenerative and mechanical forces) accounted for the greatest proportion of the total braking force. In addition, the regenerative braking energy increased with the elevated constant speeds.

In Fig. 14(b), during the vehicle acceleration, the HSC module supplemented the battery. In other words, as the current demand exceeded the 20A maximum current of the battery, the HSC module would supplement the deficit.

To further verify the RBS control mechanism, the initial states of charge (SOC) of the HSC were deliberately set below (88.2%) and above (98.12%) its maximum safety threshold of 96%, with the corresponding battery SOC's of 83.8% and 84.06%, as shown in Fig. 15 (a)-(b), respectively. In Fig. 15 (a), given that the initial SOC was below the maximum safety threshold, the regenerative braking energy was transferred and retained in the HSC. In Fig. 15 (b), when the HSC voltage exceeded the maximum safety

threshold (96%), the regenerative braking energy was directly transferred and retained in the battery by the RBS control mechanism.

For the aforementioned two conditions, where the SOC's of the HSC are 88.2% and 98.12%, the efficiency is calculated 51.3% and 46.2%, respectively. Since the battery maximum charge current is limited. Hence, in case of the battery-enabled regenerative braking mode, most of the braking energy will be transmitted to heat via the frictional braking. Hence, in accordance with (23), the regenerative braking efficiency is decreased 5.1%. In case of the battery-only -based RBS, the efficiency is decreased approximately 22% compared to HSC-enabled regenerative braking mode.

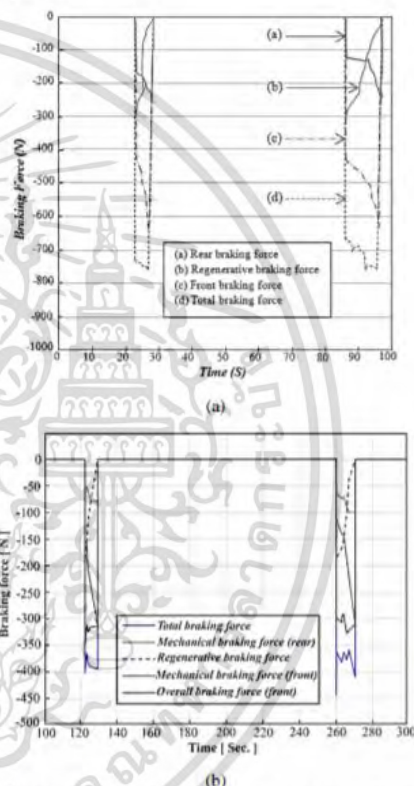


Fig. 14. The simulated RBS performance per drive cycle: (a) the braking force distribution between the front and rear wheels, (b) the current waveforms of HSC, battery and induction motor

Fig. 16 compares the driving ranges and duration (drive cycle) of the BEV without the regenerative braking system (RBS), with the battery-only RBS, with the HSC/battery (HESS) RBS, given that one drive cycle is 8150.52 m with a total travelling time of 880 seconds. In the absence of the RBS, the vehicle could travel 105.96 km (13 cycles) while, under the battery-only RBS condition, the distance travelled by the BEV was 126.33 km (15.5 cycles). Meanwhile, the distance logged by the vehicle with the

HES-based RBS was 175.24 km (21.5 cycles), an increase of 48.91 km (6 cycles) vis-à-vis that of the battery-only vehicle.

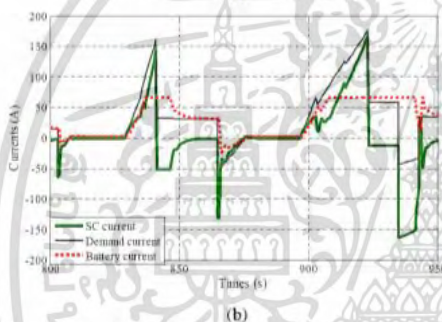
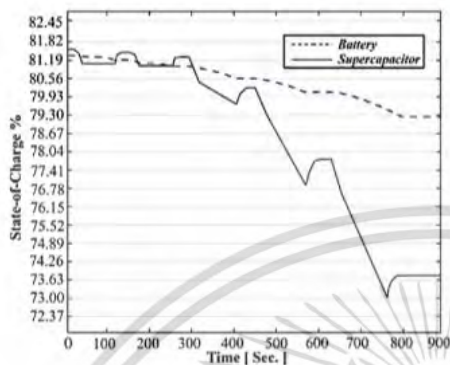


Fig. 15. The SOC relative to time: (a) the initial SOC of 88.2% (HSC) and 83.8% (battery), (b) HSC current, Demand current and Battery current

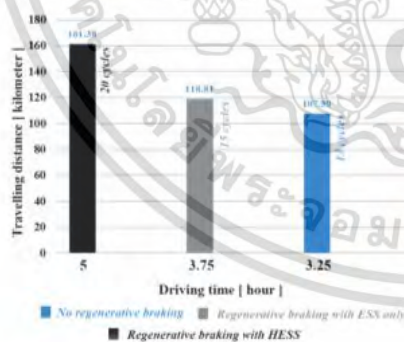


Fig. 16. The travel distance and duration of the BEV without the regenerative braking system (RBS), with the battery-only RBS, with the HSC/battery (HES) RBS, given 8150.52m per drive cycle

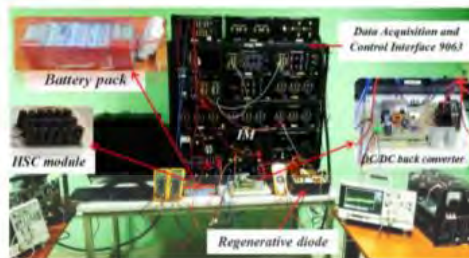
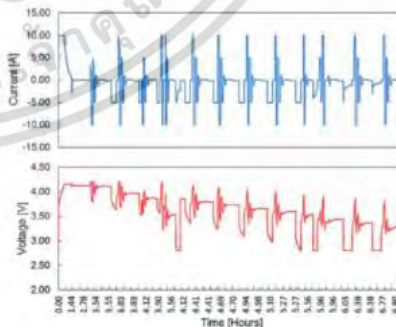
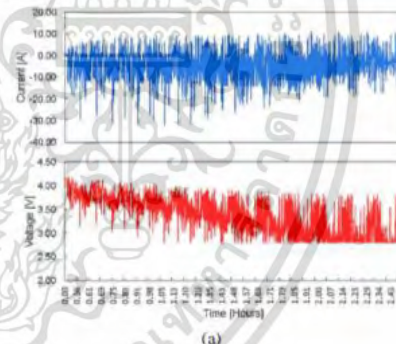


Fig. 17. The experimental setup of the proposed RBS program

Fig. 17 depicts the lab-scale experimental setup of the RBS program, consisting the HES, DC/DC buck converter<sup>(25)(30)</sup> and three-phase induction motor. The specifications of the experimental components are tabulated in Table 3.

Fig. 18 (a)-(b) respectively illustrate the waveforms of the DC-link voltage and current under the battery- and HSC-enabled regenerative braking conditions. Upon applying the brakes, the RBS control mechanism was activated to manipulate the DC-link voltage such that the regenerative braking energy (i.e. the regenerative current) was transferred and retained in the HSC while the battery was uncharged. Once the HSC voltage exceeded the maximum safety threshold (96%), the RBS control mechanism diverted the regenerative current to the battery.



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

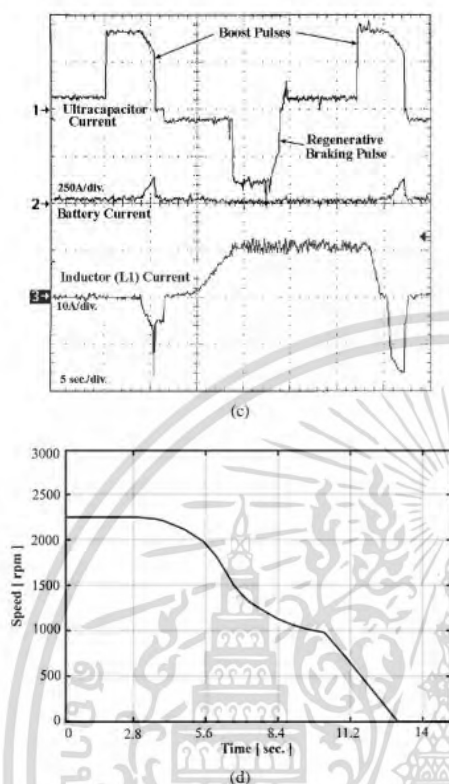


Fig. 18. The experimental results of the RBS program: (a) the DC-link voltage and current waveforms in the battery-enabled regenerative braking mode, (b) those in the HSC-enabled regenerative braking mode, (c) back-EMFs of the stator windings in the normal and HESS-enabled regenerative braking modes, (d) Speed of the induction motor in different modes including normal mode

In Fig. 18 (c), once the brakes were engaged, the back-EMFs decreased and the RBS control mechanism uniformly distributed the braking force to the front- and rear-wheel mechanical brakes. Fig. 18 (d) compares the DC-link voltage relative to time under variable duty cycles (0.3, 0.4 and 0.5), with the resulting motor speeds of 2300, 2500 and 3000 rpm, respectively.

The experimental results validate that the proposed ANN-based RBS program could effectively enhance the harvesting of the regenerative braking energy, as evidenced by the longer travel distance (175.24 km) of the HSC/battery RBS BEV vis-à-vis the battery-only vehicle (126.33 km).

## 5. Conclusion

In this paper, a new HSC/battery HESS topology on the regenerative braking system (RBS) program of the front-wheel induction-motor-driven battery electric vehicle (BEV) is proposed.

Moreover, a new ANN-based RBS control mechanism was deployed to optimize the three-phase inverter's switching scheme and the braking force distribution of the BEV. In the regenerative braking mode, the DC-link voltage is boosted, the ANN-based RBS program transferred the braking energy to store in the HSC, until reaching the maximum safety threshold (96%), and subsequently diverted the energy to the battery using suitable switching scheme of the three-phase inverter. Furthermore, the three-layer MLP algorithmic scheme of the ANN-based RBS control mechanism uniformly distributed the braking force between the front and rear wheels of the vehicle.

To comparatively assess the performance of the proposed HESS-based RBS program, the simulations were carried out under the NYCC drive cycle and it is shown that in comparison with battery only-based RBS, the regeneration efficiency is improved about 22%. Moreover, the results revealed that, under the battery-only-based RBS condition, the distance travelled by the BEV was 126.33 km (15.5 cycles). The distance logged by the vehicle with the HESS-based RBS was 175.24 km (21.5 cycles), an increase of 48.91 km (6 cycles), in comparison with that of the battery-only vehicle. The findings indicated that the ANN-based RBS program could effectively enhance the harvest of the regenerative braking energy, as evident in the elongated drive range vis-à-vis that of the battery-only vehicle. Moreover, the HSC/battery RBS program contributes to the improved vehicle acceleration and the extended battery life attributable to the HSC's supplemental function.

## References

- (1) M. T. E. Heinrich, F. Keleh, P. Magne and A. Emadi, "Regenerative braking capability analysis of an electric taxiing system for a single aisle midsize aircraft", *IEEE Trans. Transport. Electric.*, Vol. 1, No. 3, pp. 298-307 (2015)
- (2) A. Emadi, Y. J. Lee, and K. Rajashekara, "Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 55, No. 6, pp. 2237-2245 (2008)
- (3) A. Emadi, *Advanced Electric Drive Vehicles*, Boca Raton, FL: CRC Press, Oct. (2014)
- (4) M. A. Al Faruque and K. Vatanparvar, "HVAC System and Automotive Climate Control Influence on Electric Vehicle and Battery", *Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, pp. 1-6 (2016)
- (5) X., Hu, N., Murgovski, L. M., Johansson, and B. Egardt, "Comparison of three electrochemical energy buffers applied to a hybrid bus powertrain with simultaneous optimal sizing and energy management", *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Vol. 15, No. 3, pp. 1193-1205 (2014)
- (6) B. Lequèsne, "Automotive electrification: The nonhybrid story", *IEEE Trans. Transport. Electric.*, Vol. 1, No. 1, pp. 40-53 (2015)
- (7) K. Carter, A. Cruden, and P. Hall, "Optimizing for efficiency or battery life in a battery/SC electric vehicle", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 61, No. 4, pp. 1526-1533 (2012)
- (8) A. Khaligh and Z. Li, "Battery ultracapacitor fuel cell and hybrid energy storage systems for electric hybrid electric fuel cell and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 59, No. 6, pp. 2806-2814 (2010)
- (9) S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez and A. Emadi, "Energy storage systems for automotive applications", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 55, No. 6, pp. 2258-2267 (2008)
- (10) A.-I. Stan, M. Świerczyński, D.-I. Stroe, R. Teodorescu and S.J. Andreasen, "Lithium ion battery chemistries from renewable energy storage to automotive and back-up power applications - An overview", *International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, pp. 713-720 (2014)
- (11) S. Lu, P. Weston, H. B. Gooi, and C. Roberts, "Increasing the regenerative braking energy for railway vehicles", *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Vol. 15, No. 6, pp. 2506-2515 (2014)
- (12) J. Cao, and A. Emadi, "A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and PHEV", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.

27, No. 1, pp.122-132 ( 2011)

- (13) S. Dusmez and A. Khaligh : "A supervisory power splitting approach for a new ultracapacitor-battery vehicle deploying two propulsion machines", *IEEE Trans. Ind. Informat.*, Vol. 10, No. 3, pp. 1960-1971 (2014)
- (14) D. Carreira, G. D. Marques and D. M. Sousa : "Hybrid energy storage system joining batteries and supercapacitors", *Proc. IEEE 5th Int. Symp. Power Electron. Distrib. Generat. Syst. (PEDG)*, pp. 1-6 (2014)
- (15) J. Li, J. K. Barillas, C. Guenther, and M. A. Danzer, "A comparative study of state of charge estimation algorithms for LiFePO batteries used in electric vehicles", *J. Power Sources*, Vol. 230, pp. 244-250 (2013)
- (16) S. Lee, J. Kim, J. Lee, and B. H. Cho, "State-of-charge and capacity estimation of lithium-ion battery using a new open-circuit voltage versus state-of-charge", *J. Power Sources*, Vol. 185, No. 2, pp. 1367-1373 (2008)
- (17) W. Yanzi, X. Changle and W. Wang : "Energy management strategy based on fuzzy logic for a new hybrid battery-ultracapacitor energy storage system", *Proc. ITEC Asia-Pacific*, pp. 1-5 (2014)
- (18) J. Sheu, S. Dusmez, and A. Khaligh : "Optimization of sizing and battery cycle life in battery/UC HESS for EV applications", *IEEE Trans. Ind. Informat.*, Vol.10, No. 4, pp. 2112-2121 (2014)
- (19) X. Liu, Y. Wu, and J. Duan : "Power split control strategy for a series hybrid electric vehicle using fuzzy logic", *Proc. IEEE Autom. Logist. Conf.*, pp. 481-486 ( 2008)
- (20) M.-E. Choi, J.-S. Lee, and S.-W. Seo : "Real-time optimization for power management systems of a battery/supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 63, No. 8, pp. 3600-3611 (2014)
- (21) D. Shin, M. Poncino, E. Macri and N. Chang: "A statistical model-based cell-to-cell variability management of Li-ion battery pack", *IEEE Trans. Comput.-Aided Design Integr. Circuits Syst.*, Vol. 34, No. 2, pp. 252-265 (2015)
- (22) E. Baronti, R. Roncella and R. Saletti : "Performance comparison of active balancing techniques for lithium-ion batteries", *J. Power Sources*, Vol. 267, pp. 603-609 (2014)
- (23) X. Zhang, Y. Wang, G. Liu, and X. Yuan : "Robust regenerative charging control based on T-S fuzzy sliding-mode approach for advanced electric vehicle", *IEEE Trans. Transport. Electric.* Vol. 2, No. 1, pp. 52-65, Mar (2016)
- (24) J. Shen, and A. Khaligh : "A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system", *IEEE Trans. Transport. Electric.*, Vol. 1, No. 3, pp. 223-231 (2015)
- (25) Y. Okazaki, M. Hagiwara and H. Akagi : "A speed-sensorless start-up method of an induction motor driven by a modular multilevel cascade inverter (MMCI-DSCC)", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 50, No. 4, pp. 2671-2680 (2014)
- (26) A. Hassanpoor, L. Angquist, S. Norrga, K. Ives and H.-P. Nee : "Tolerance band modulation methods for modular multilevel converters", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.30, No. 1, pp. 311-326 (2015)
- (27) M. Pavlovsky, G. Guidi, and A. Kawamura : "Assessment of coupled and independent phase designs of interleaved multiphase buck/boost dc-dc converter for EV power train", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 6, pp. 2693-2704 (2014)
- (28) M. Hajian, J. Robinson, D. Jovic, and W. Bin : "30 kW 200 V/900 V thyristor LCL de/dc converter laboratory prototype design and testing", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 3, pp. 1094-1102 (2014)
- (29) M. R. Islam, Y. Guo and J. Zhu : "A high-frequency link multilevel cascaded medium-voltage converter for direct grid integration of renewable energy systems", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 8, pp. 4167-4182 (2014)
- (30) M. Wlas et al.: "Artificial-neural-network-based sensorless nonlinear control of induction motors", *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 20, No. 3, pp. 520-528 (2005)
- (31) M. Mortazavi, M. Mastali, and A. A. Safavi: "Enhanced Neural Network Based Fault Detection of a VVER Nuclear Power Plant with the Aid of Principal Component Analysis", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 55, No. 6, pp. 3611-3619 (2008)
- (32) B. K. Bose: "Neural network applications in power electronics and motor drives—An introduction and perspective," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 4, No. 1, pp. 14-33 (2007)
- (33) C. G. Ma, Q. H. Liu, D. F. Wang, Q. Li, and L. Wang : "A novel black and white box method for diagnosis and reduction of abnormal noise of hub permanent magnet synchronous motors for electric vehicles", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 63, No. 2, pp. 1153-1167 (2016)
- (34) J. Li, J. K. Barillas, C. Guenther, and M. A. Danzer: "A comparative study of state of charge estimation algorithms for LiFePO batteries used in electric vehicles", *J. Power Sources*, Vol. 230, pp. 244-250 (2013)
- (35) G. won You, S. Park, and D. Oh: "Real-time state-of-health estimation for electric vehicle batteries: A data-driven approach," *Appl. Energy*, Vol. 176,

pp. 92-103 (2016)



**Kunagone Kiddee** (Non-member) He received a M.Eng. degree in electronics engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang in 2013. Currently, he is pursuing the Ph.D. degree in electrical engineering in King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. His research interests include power electronics, electric vehicle systems, intelligent control, and electrical machines.



**Wiwat Keyoonwong** (Non-member) received his M.Eng and Ph.D. degree in chemical engineering from Tokyo Institute of Technology in 2009 and 2013, respectively. He is currently a professor at the Department of Electrical Engineering of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. His research interests include energy storage devices, renewable energy and power quality.



**Werachet Khan-Ngern** (Non-Member) received his B.Eng and M.Eng in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMILT), Thailand and received his Ph.D. and DIC in electrical engineering (power electronics) from Imperial College of Science Technology and Medicine, University of London in 1997. He is currently an associate professor at electrical engineering department, KMILT, Thailand. His research areas are focused on electromagnetic compatibility, converters, inverters, energy storage and green energy applications. His recently research is focused on zero emission vehicle from proton exchange membrane fuel cell EVs, lithium phosphate battery application in EVs, amphibious EVs, wireless power charging for EVs, design of maximum power point tracking for PV system and the design of high performance electric car using carbon nano tube (CNT) material to meet a high EV energy saving.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายคุณากร คิตดี
วัน เดือน ปีเกิด	4 พฤษภาคม พ.ศ. 2527 ที่ อำเภอเมือง ภูเก็ต
ที่อยู่	25/329 ถนนเจ้าฟ้า ตำบลวิชิต อำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต 83000 โทร. 076-263814
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี พ.ศ. 2549 วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ระดับปริญญาโท พ.ศ. 2555 วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรม อิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) การออกแบบวงจร CMOS อินเวอร์เตอร์ และวงจรรวม 2) การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟฟ้า สำหรับวงจร CMOS อินเวอร์เตอร์ 3) งานวิจัยด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง คอนเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์ และ
แหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง	4) งานวิจัยด้านพลังงานสะอาดและสิ่งแวดล้อม ยานยนต์ไฟฟ้า
รจกรยานยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น	
ประสบการณ์ทำงาน	1) Technical Support บริษัท Securitech Solution จำกัด 2) อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	3) อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์	4) หนึ่งในคณะวิจัย โครงการทุนวิจัยเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานและ พลังงานทดแทน (Energy Storage Systems) กระทรวงพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์นี้

- [1] Kunagone Kiddee and Werachet Khan-Ngern. “Performance Evaluation of Regenerative Braking System Based on a HESS in Extended Range BEV” *Journal of Electrical Engineering and Technology (JEET 2018)*, pp. 1921-1933.
- [2] Kunagone Kiddee, Wiwat.Keyoonwong and Werachet Khan-Ngern. “ A HSC/Battery Energy Storage System-based Regenerative Braking System Control Mechanism for Battery Electric Vehicles Driven by Induction Motor” *The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ 2018)*

ผลงานวิจัยด้านอื่นๆ ของผู้เขียน

- [1] K. Kiddee, A. Ruangphanit, R. Muanghlua and S. Niemcharoen. “Modeling and Parameter extraction of pn junction for VLSI circuits” *Proc. (KKU-IENC 2012)*, May 10-12. pp. 190-193.
- [2] K. Kiddee, A. Ruangphanit, A. Poyai, R. Muanghlua and S. Niemcharoen. “Characterization of 0.8  $\mu\text{m}$  NMOSFETs at Elevated Temperatures” *Proc. 1st International Symposium on Technology for Sustainability 26-29 January 2012, KMITL, Bangkok Thailand.* pp. 377-380.
- [3] K. Kiddee, A. Ruangphanit, C. Punyasai, R. Muanghlua and S. Niemcharoen. “Study of Designed and Fabricated of Basic Logic Gate in 0.8  $\mu\text{m}$  CMOS Technology” *Proc. (AGRC) 2012, Chiang Mai, Thailand.* pp.146.
- [4] K. Kiddee, A. Ruangphanit, R. Muanghlua and S. Niemcharoen. “Design Fabrication and Electrical Characteristics of 0.8  $\mu\text{m}$  CMOS Inverter” *Proc. the 29th MST Annual Conference, 30 January - 1 February 2012, Cha-am, Thailand.* pp. 44.
- [5] K. Kiddee, A. Ruangphanit, S. Niemcharoen and N. Atiwongsangthong. “Extraction of Mobility degradation, Effective Channel length and Total Series Resistance of NMOS at Elevated Temperature” *Proc. The 8th (ECTI) Association, Thailand – Conference. 2011* pp. 2-5.
- [6] K. Kiddee, A. Ruangphanit, B. Phinyo, R. Muanghlua and S. Niemcharoen. “Research the Electrical Parameters Mismatch Model of MOSFET over the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Temperature Range” Proc. (UNRN) 2012, Chiang Mai, Thailand. May 16-18, 2012. pp. 89-92.
- [7] A. Ruangphanit, K. Kiddee, R. Muanghlua and S. Niemcharoen. “The Effects of Temperature on the threshold Voltage and the Subthreshold Characteristic of NMOSFETs Modeling” Proc. (KKU-IENC 2012), May 10-12. pp. 14-16.
- [8] A. Ruangphanit, N. Sakuna, K. Kiddee, R. Muanghlua and S. Niemcharoen. “The Effect of Temperature on Threshold voltage, the Low field mobility and the Series parasitic resistance of PMOSFET ” International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2012) November 21-24, 2012 pp.78-81
- [9] N. Sakuna, A. Ruangphanit, K. Kiddee, R. Muanghlua and S. Niemcharoen. “A MISMATCH MODEL OF TEMPERATURE DEPENDENT AND DEVICE DIMENSION ON THE THRESHOLD VOLTAGE OF MOSFET IN VLSI” the 1st Mae Fah Luang University International Conference 2012 pp.154-157.
- [10] K. Kiddee, A. Ruangphanit, S. Niemcharoen and R. Muanghlua. “Temperature Dependence of Threshold Voltage, Mobility and S/D Resistance of NMOSFETs” Proc. (ICET-2011), Phuket, May 2-3, 2011. pp. 288-290
- [11] K. Kiddee, A. Ruangphanit, R. Muanghlua and S. Niemcharoen. “A Simulation Studies of Tilt Angle Effect In S/D Engineering On NMOS Performances” ANSCSE15 Bangkok University, Thailand March 30-April 2, 2011. pp. 561-565.
- [12] K. Kiddee, A. Ruangphanit, B. Phinyo, R. Muanghlua and S. Niemcharoen. “The Effects of Temperature and Device Demension of MOSFETs on the DC Characteristics of CMOS Inverter” Proc. (ECTI-CON 2012), Hua Hin, Thailand May 16-18, 2012. pp. 341-345.
- [13] Kunagone Kiddee and Werachet Khan-Ngern “Performance Evaluation of Regenerative Braking System Of EV Using Suitable Switching Pattern Of The Three Phase Inverter With MLP Function” International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology (ICESIT2017), August 2-4, 2017 at Thai-Nichi Institute of Technology (TNI), Bangkok, Thailand.