

การพัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์

นาย นาถณรงค์ ลิ้มวุฒิไกรจิรัฐ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

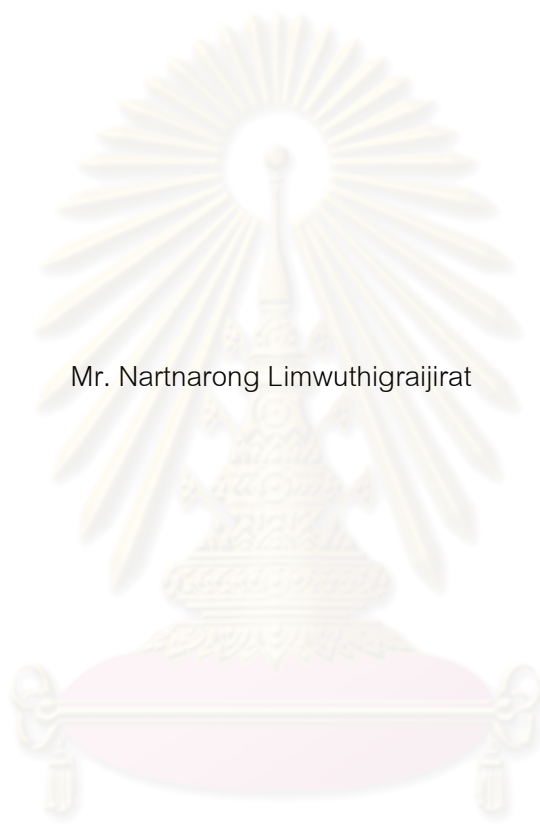
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE DEVELOPMENT OF A FUEL CELL HYBRID PROPULSION SYSTEM FOR SCOOTER



Mr. Nartnarong Limwuthigraijirat

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับ
รถจักรยานยนต์

โดย

นาย นาถณรงค์ ลิ้มวุฒิกิจรัฐ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังคิรี ศรีภคการ


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


ดร. นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนรินทร์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา บงเจริญ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังคิรี ศรีภคการ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ไชยณรงค์ จักรรานนท์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์)

นาถณรงค์ ลิมวุฒิไกรจิรัฐ : การพัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์. (THE DEVELOPMENT OF A FUEL CELL HYBRID PROPULSION SYSTEM FOR SCOOTER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. อังศิริ ศรีภคากร, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. นกสิทธิ์ นุ่มวงษ์, 193 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ โดยพิจารณาใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM พิกัด 1.2 กิโลวัตต์ เป็นแหล่งพลังงานปฐมภูมิและใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานทุติยภูมิ นอกจากนั้นชุดเก็บประจุความจุสูงได้รับการพิจารณาเพื่อทดสอบเปรียบเทียบให้เป็นทางเลือกของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดแทนการใช้แบตเตอรี่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อการออกแบบและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการพัฒนาระบบขับเคลื่อน ผลการจำลองยืนยันถึงความจำเป็นของรูปแบบไฮบริดในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิง และแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในเชิงพลังงานของต้นแบบระบบขับเคลื่อน ส่วนถัดมาได้ทดสอบอุปกรณ์ย่อยเพื่อเรียนรู้ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ รวมถึงนำผลทดสอบที่ได้มาสร้างแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากขึ้น และแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำที่ดีเพียงพอและสามารถใช้เป็นแนวทางเพื่อปรับปรุงการออกแบบระบบขับเคลื่อนได้ จากนั้นได้พิจารณาถึงรูปแบบการจัดวางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบสองแบบคือ 1) ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ และ 2) ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง โดยมีเป้าหมายคือการเลือกแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ การทดสอบระบบขับเคลื่อนดำเนินการโดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้าเพื่อจำลองภาระการขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับทดสอบสามรูปแบบ ผลการทดสอบแสดงถึงความสามารถของระบบขับเคลื่อนในการจ่ายกำลังไฟฟ้าตามวัฏจักรขับทดสอบได้อย่างรวดเร็วและเพียงพอ และพบว่าระบบทั้งสองมีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกันมาก ในด้านค่าใช้จ่ายนั้นพบว่าชุดเก็บประจุความจุสูงมีความคุ้มค่าในระยะยาวมากกว่าแบตเตอรี่ แม้ว่ามีราคาเริ่มต้นที่สูงกว่ามาก นอกจากนั้นชุดเก็บประจุความจุสูงยังมีข้อได้เปรียบที่ไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาอย่างสิ้นเชิง โดยสรุปแล้วชุดเก็บประจุความจุสูงจึงถือเป็นทางเลือกที่ควรให้ความสนใจอย่างหนึ่งสำหรับการนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2551.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4970386721 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: FUEL CELL/ SUPERCAPACITOR / HYBRID PROPULSION SYSTEM

NARTNARONG LIMWUTHIGRAIJIRAT : THE DEVELOPMENT OF A FUEL CELL HYBRID PROPULSION SYSTEM FOR SCOOTER. THESIS PRINCIPAL ADVISOR : ASST. PROF. ANGKEE SRIPAKAGORN, Ph.D., THESIS COADVISOR : NUKSIT NOOMWONGS, D.Eng., 193 pp.

This thesis aimed at the development of a hybrid fuel cell propulsion system for scooter where a modular 1.2 kW PEM fuel cell system was employed as a primary energy source and the battery was employed as a secondary energy source. Supercapacitor was also studied as an alternative secondary energy source. Mathematical model of hybrid fuel cell propulsion system was used for the design and the assessment of the feasibility of the prototype. The simulation result indicates the need for hybrid configuration. The subsystems were tested in order to study the characteristic of each part and also to develop empirical models of subsystem. The models were shown to provide accurate prediction of the subsystem performance. The models are then employed to improve the design of the system. This study explored the optimal configuration of two types of hybrid fuel cell propulsion system including 1) fuel cell-battery hybrid propulsion system and 2) fuel cell-supercapacitor hybrid propulsion system. This work attempted to identify the most suitable secondary energy source for a hybrid fuel cell propulsion system for scooters. The testing was implemented by a programmable electronic load which simulated the traction load following a set of selected driving cycles. The propulsion systems developed are shown to work satisfactorily over the prescribed driving cycles. There is no discernable difference between the fuel consumption of both systems. In term of cost, although supercapacitor has obviously higher initial cost but in the long term, supercapacitor has lower total cost. Supercapacitor also has added benefits in being maintenance free. This paper concludes that, compared to the battery, supercapacitor is a better choice of secondary energy storage for the hybrid fuel cell propulsion system in scooters.

Department ... Mechanical Engineering ...	Student's signature.....
Field of study Mechanical Engineering ...	Principal Advisor's signature.....
Academic year 2008	Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนบางส่วนจากโครงการพัฒนาสถิติการใช้ PEMFC ในรถยนต์สามล้อ ซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่างกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงานและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนการศึกษาแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนเงินทุนบางส่วนในวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เชื้อเพื่อสถานที่และอุปกรณ์หลักในวิทยานิพนธ์นี้

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความรู้ความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังคีร์ ศรีภคการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาในทุกเรื่องและตรวจแก้ไขงานวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. นกสิทธิ์ นุ่มวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม เป็นอย่างสูง ท่านได้กรุณาให้ความรู้ และคำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ กรรมการ และ อาจารย์ ดร. ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ กรรมการ ที่กรุณารับเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ซึ่งมีพระคุณต่อผู้วิจัยอย่างหาที่เปรียบมิได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ	ฐ
รายการสัญลักษณ์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัยโดยย่อ.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 เนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรม.....	6
2.1 ยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด	6
2.2 ระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์	8
บทที่ 3 ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า.....	11
3.1 ลักษณะของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า	11
3.2 ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแบบไฮบริด.....	15
3.2.1 ความจำเป็นของระบบไฮบริด	15
3.2.2 แนวคิดการจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแบบไฮบริด	16
3.2.3 การจัดวางระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด.....	18
3.3 ส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า	20
3.3.1 มอเตอร์ขับเคลื่อน	20
3.3.2 แบตเตอรี่.....	29

3.3.3	ชุดเก็บประจุความจุสูง.....	36
3.3.4	เซลล์เชื้อเพลิง.....	39
บทที่ 4	การออกแบบและการจำลองระบบขับเคลื่อน.....	45
4.1	การออกแบบเบื้องต้นของระบบขับเคลื่อน.....	45
4.1.1	เป้าหมายของรูปแบบของระบบขับเคลื่อน.....	45
4.1.2	แนวทางการออกแบบระบบขับเคลื่อน.....	45
4.2	การจัดวางระบบและรูปแบบทางไฟฟ้าของระบบ.....	47
4.3	ภาระการขับเคลื่อน.....	48
4.3.1	แรงต้านทานการกลิ้ง.....	49
4.3.2	แรงต้านทานการไหลของอากาศ.....	49
4.3.3	แรงเพื่อการขึ้นทางลาดชัน.....	50
4.3.4	แรงเพื่อสร้างความเร่ง.....	50
4.3.5	ภาระการขับเคลื่อนรวม.....	51
4.3.6	ภาระทางไฟฟ้าสำหรับการขับเคลื่อน.....	52
4.4	การกำหนดสมรรถนะสำหรับการออกแบบ.....	54
4.4.1	การกำหนดสมรรถนะและค่าลักษณะเฉพาะของรถที่สภาวะคงที่.....	54
4.4.2	การกำหนดสมรรถนะและค่าลักษณะเฉพาะของรถโดยวิศวกรขับทดสอบ.....	55
4.5	กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงาน.....	60
4.6	แนวทางการจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า.....	61
4.7	ผลการศึกษาเบื้องต้น.....	62
4.7.1	การกำหนดค่าตัวแปรเบื้องต้นสำหรับจำลองระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า.....	62
4.7.2	ผลการจำลองสมรรถนะ.....	64
4.7.3	ผลการจำลองกับวิศวกรขับทดสอบ.....	68
4.7.4	สรุปผลการศึกษาเบื้องต้น.....	76
บทที่ 5	การทดสอบและการจำลองอุปกรณ์.....	77
5.1	การทดสอบและการจำลองเซลล์เชื้อเพลิง.....	77
5.1.1	แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง.....	77

5.1.2	การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง	78
5.1.3	การประเมินแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง	80
5.2	การทดสอบและการจำลองแบตเตอรี่	82
5.2.1	แบบจำลองแบตเตอรี่	82
5.2.2	การทดสอบแบตเตอรี่	89
5.2.3	การประเมินแบบจำลองแบตเตอรี่	92
5.3	การทดสอบและการจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง	94
5.3.1	แบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง	95
5.3.2	การทดสอบชุดเก็บประจุความจุสูง	95
5.3.3	การประเมินแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง	98
5.4	สรุปการทดสอบและการจำลองอุปกรณ์	100
บทที่ 6	ชุดทดสอบระบบขับเคลื่อนและการทดสอบเบื้องต้น	101
6.1	ส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อน	101
6.1.1	เซลล์เชื้อเพลิง	101
6.1.2	ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	102
6.1.3	ชุดรับภาระทางไฟฟ้า	106
6.2	ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่	106
6.2.1	ข้อพิจารณาการใช้งานแบตเตอรี่	106
6.2.2	การติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่	107
6.2.3	ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่	109
6.2.4	วิจารณ์ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับ แบตเตอรี่	113
6.2.5	ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิง กับแบตเตอรี่	114
6.3	ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง	114
6.3.1	การติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับ ชุดเก็บประจุความจุสูง	115

6.3.2	ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง.....	120
6.3.3	วิจารณ์ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง.....	129
6.3.4	ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนา	130
6.4	สรุปชุดทดสอบระบบขับเคลื่อนและการทดสอบ	131
บทที่ 7	การเปรียบเทียบระบบขับเคลื่อน	135
7.1	การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบระบบขับเคลื่อน.....	135
7.1.1	หลักการและเหตุผล	135
7.1.1	การติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่	138
7.1.2	การติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง.....	139
7.1.3	ขั้นตอนการทดสอบ	140
7.1.4	ผลการทดสอบ.....	141
7.1.5	สรุปผลการทดสอบ	146
7.2	การเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย อายุการใช้งาน ขนาดและน้ำหนักของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิ.....	147
7.3	สรุปการเปรียบเทียบ	152
บทที่ 8	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	153
8.1	บทสรุป	153
8.2	ข้อเสนอแนะ.....	154
8.2.1	ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนายานยนต์เซลล์เชื้อเพลิง	155
8.2.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อเนื่อง	155
	รายการอ้างอิง.....	157

ภาคผนวก.....	162
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อน	163
ภาคผนวก ข การปรับแก้ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	168
ภาคผนวก ค วงจรไฟฟ้าของชุดทดลอง	173
ภาคผนวก ง การวัดและอุปกรณ์การวัด	175
ภาคผนวก จ แบบจำลองระบบขับเคลื่อน	181
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	193



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ฎ

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2-1 พลังงานในการขับเคลื่อนต่อหน่วยมวลต่อระยะทาง (J/km/kg)	9
ตารางที่ 3-1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานจากน้ำมันดิบจนถึงพลังงานขับเคลื่อนที่ล้อของระบบที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICEV) กับระบบยานยนต์ไฟฟ้า (EV)	12
ตารางที่ 3-2 ชนิดของมอเตอร์ที่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้ารุ่นต่างๆ.....	20
ตารางที่ 3-2 ต่อ ชนิดของมอเตอร์ที่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้ารุ่นต่างๆ	21
ตารางที่ 3-3 ลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่แต่ละชนิด.....	33
ตารางที่ 3-4 ลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงในแต่ละชนิดและการใช้งาน	41
ตารางที่ 3-5 ลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย	44
ตารางที่ 4-1 สมรรถนะของรถจักรยานยนต์.....	55
ตารางที่ 4-2 เปรียบเทียบวัฏจักรขับทดสอบ	59
ตารางที่ 4-3 ค่าตัวแปรในการคำนวณของรถจักรยานยนต์.....	63
ตารางที่ 4-4 ค่าตัวแปรเบื้องต้นในการคำนวณภาระการขับเคลื่อน	64
ตารางที่ 4-5 อัตราทดที่ทำให้ได้สมรรถนะตามเป้าหมายที่กำหนด	67
ตารางที่ 4-6 เปรียบเทียบสมรรถนะที่ทำได้กับเป้าหมาย	68
ตารางที่ 4-7 ค่าตัวแปรของการคำนวณชุดเก็บบรรจุความจุสูง	72
ตารางที่ 4-8 ค่าตัวแปรของการคำนวณแบตเตอรี่	72
ตารางที่ 7-1 สรุปพารามิเตอร์และลักษณะเฉพาะของวัฏจักรขับทดสอบทั้งสามแบบ.....	137
ตารางที่ 7-1 ต่อ สรุปพารามิเตอร์และลักษณะเฉพาะของวัฏจักรขับทดสอบทั้งสามแบบ	138
ตารางที่ 7-2 การประมาณราคาแบตเตอรี่และชุดเก็บบรรจุความจุสูง	148
ตารางที่ 7-3 การเปรียบเทียบราคา อายุการใช้งาน ขนาดและน้ำหนัก ระหว่างแบตเตอรี่กับชุดเก็บบรรจุความจุสูง	151
ตารางที่ ง-1 ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า NI 9221	177
ตารางที่ ง-2 ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ารุ่น ACS754xCB-050 และ ACS754SCB-200	178
ตารางที่ ง-2 ต่อ ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ารุ่น ACS754xCB-050 และ ACS754SCB-200	179
ตารางที่ ง-3 ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า NI 9205.....	179
ตารางที่ ง-3 ต่อ ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า NI 9205	180

สารบัญภาพ

ฐ
ม

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3-1 การเปลี่ยนแปลงของแรงบิดต่อความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์และเครื่องยนต์	13
รูปที่ 3-2 ประสิทธิภาพของแหล่งพลังงานสามประเภทเทียบกับสัดส่วนของภาระขับเคลื่อน	14
รูปที่ 3-3 แผนภาพ Ragone สำหรับแหล่งพลังงานชนิดต่างๆ	16
รูปที่ 3-4 การส่งถ่ายพลังงานที่การขับเคลื่อนที่ต่างๆ	18
รูปที่ 3-5 การจ่ายและประจุพลังงานที่การขับเคลื่อนที่ต่างๆ	18
รูปที่ 3-6 ระบบยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิง	19
รูปที่ 3-7 ลักษณะแรงบิดและความเร็วมอเตอร์	22
รูปที่ 3-8 ผลของการแปรเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้า (E_g) และฟลักซ์แม่เหล็ก (Φ)	24
รูปที่ 3-9 มอเตอร์แบบ Brushless DC motor	24
รูปที่ 3-10 มอเตอร์แบบ Switched reluctance motor	26
รูปที่ 3-11 มอเตอร์แบบ Induction motor	27
รูปที่ 3-12 มอเตอร์แบบ Induction motor	28
รูปที่ 3-13 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่ว	30
รูปที่ 3-14 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของแบตเตอรี่	35
รูปที่ 3-15 การทำงานของชุดเก็บประจุความจุสูง	37
รูปที่ 3-16 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของชุดเก็บประจุความจุสูง	38
รูปที่ 3-17 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	40
รูปที่ 3-18 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง	42
รูปที่ 3-19 เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย	44
รูปที่ 4-1 ขั้นตอนการการออกแบบและจำลองระบบขับเคลื่อน	47
รูปที่ 4-2 การจัดวางระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด	48
รูปที่ 4-3 แผนภาพทางไฟฟ้าของการจัดวางระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด	48
รูปที่ 4-4 FUDS driving cycle	56
รูปที่ 4-5 SFUDS driving cycle	57
รูปที่ 4-6 ECE-15 driving cycle	57
รูปที่ 4-7 Japan 10-15 mode cycle	58
รูปที่ 4-8 The Taipei Motorcycle Driving Cycle (TMDC)	59
รูปที่ 4-9 แบบจำลองของระบบขับเคลื่อน	62

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4-10 ผลการปรับตั้งค่าอัตราทดเพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (G คือ อัตราทดระหว่าง มอเตอร์กับล้อ)	65
รูปที่ 4-11 ผลการปรับตั้งค่าอัตราทดเพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในขณะที่ขึ้นทางชัน 8° และน้ำหนักบรรทุก 90 กิโลกรัม	66
รูปที่ 4-12 ผลการปรับตั้งค่าอัตราทดเพื่อให้เร่งความเร็วจาก 0 เป็น 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภายใน 5 วินาที.....	67
รูปที่ 4-13 จุดทำงานของมอเตอร์ตลอดวัฏจักรขับทดสอบ	69
รูปที่ 4-14 ความสามารถในการเร่งสูงสุดที่ความเร็วต่างๆ.....	70
รูปที่ 4-15 ผลการใช้กำลังไฟฟ้าตามวัฏจักรขับทดสอบ	71
รูปที่ 4-16 ผลการจำลองการจ่ายพลังงานของระบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับ ชุดเก็บประจุความจุสูง	73
รูปที่ 4-17 ผลการจำลองระดับพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูง	74
รูปที่ 4-18 ผลการจำลองการจ่ายพลังงานของระบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ ..	75
รูปที่ 4-19 ผลการจำลองระดับการประจุของแบตเตอรี่.....	75
รูปที่ 5-1 ชุดทดสอบแหล่งจ่ายพลังงาน.....	78
รูปที่ 5-2 Polarization curve ของเซลล์เชื้อเพลิง	80
รูปที่ 5-3 อัตราการใช้เชื้อเพลิงและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง.....	80
รูปที่ 5-4 การจ่ายกำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงตามวัฏจักรขับทดสอบ	81
รูปที่ 5-5 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองแรงดันไฟฟ้ากับค่าที่วัดได้จริงของเซลล์เชื้อเพลิง.....	82
รูปที่ 5-6 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าในแบบจำลองแบบความต้านทานภายใน	83
รูปที่ 5-7 ผลการทดสอบค่าความต้านทานภายในที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ ของแบตเตอรี่แบบ Lithium ion.....	85
รูปที่ 5-8 เปรียบเทียบผลทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ ของแบตเตอรี่แบบ Lithium-ion กับแบบจำลอง	85
รูปที่ 5-9 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าในแบบจำลองวงจรอีวีเนิน (ก) และวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าในแบบจำลองของ Dürr และคณะ (ข)	86
รูปที่ 5-10 เปรียบเทียบผลทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ ของแบตเตอรี่แบบ Lead acid กับแบบจำลอง	86
รูปที่ 5-11 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของแบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ.....	87

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5-12 เปรียบเทียบผลการทำนายระดับการประจุของแบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ กับแบบจำลองแบบความต้านทานภายใน (ADV model ในรูป)	88
รูปที่ 5-13 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าสำหรับแบบจำลองแบตเตอรี่	89
รูปที่ 5-14 การกำหนดการจ่ายกระแสไฟฟ้าและการเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่	90
รูปที่ 5-15 ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากระแสไฟฟ้าและระดับการประจุ	91
รูปที่ 5-16 ค่าความต้านทานภายในต่อค่ากระแสไฟฟ้าและระดับการประจุ	91
รูปที่ 5-17 ขอบเขตของระดับการประจุน้อยที่สุดที่แบตเตอรี่สามารถทำงานได้โดยไม่เกิดความเสียหายที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ	92
รูปที่ 5-18 ผลเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองกับแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ	93
รูปที่ 5-19 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของชุดเก็บประจุความจุสูง	95
รูปที่ 5-20 การวัดค่าพารามิเตอร์ของชุดเก็บประจุความจุสูงจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่	96
รูปที่ 5-21 ค่าความต้านทานภายในของชุดเก็บประจุความจุสูงจากการทดสอบโดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ	97
รูปที่ 5-22 กำลังไฟฟ้าที่กำหนดให้ชุดเก็บประจุความจุสูงจ่ายกับกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จริง	99
รูปที่ 5-23 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองและจากการวัดจริงของชุดเก็บประจุความจุสูง	99
รูปที่ 6-1 ขั้วสัญญาณและปุ่มปรับค่าของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ก) และสวิตช์หมายเลข 13 สำหรับการจำกัดกระแสไฟฟ้า (ข)	103
รูปที่ 6-2 การทำงานของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	104
รูปที่ 6-3 การทำงานของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขณะที่ไม่สามารถจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าได้	105
รูปที่ 6-4 ค่าความต้านทานของตัวต้านทานเพื่อกำหนดค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าสำหรับชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงรุ่น CH63120F-SU	105
รูปที่ 6-5 ส่วนประกอบของชุดทดสอบระบบขับเคลื่อน	107
รูปที่ 6-6 ผลทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load leveled ในวัฏจักรแรกตามวัฏจักรขับเคลื่อนทดสอบ ECE-15	110
รูปที่ 6-7 ผลทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load leveled ในวัฏจักรที่ห้าตามวัฏจักรขับเคลื่อนทดสอบ ECE-15	110

รูปที่ 6-8 ผลทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load Following โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าให้ใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นของแบตเตอรี่.....	112
รูปที่ 6-9 ผลทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load Following โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นของแบตเตอรี่.....	112
รูปที่ 6-10 แนวทางการติดตั้งระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดแบบทำงานร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูง	115
รูปที่ 6-11 ลักษณะการแบ่งจ่ายพลังงานในขณะที่สุดเก็บประจุความจุสูงมีระดับแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 34 โวลต์.....	119
รูปที่ 6-12 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง	120
รูปที่ 6-13 การแบ่งจ่ายพลังงานในสองวัฏจักรแรกของการติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด	122
รูปที่ 6-14 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของการติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด	122
รูปที่ 6-15 การแบ่งจ่ายพลังงานในสองวัฏจักรสุดท้ายของการติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด	122
รูปที่ 6-16 การแบ่งจ่ายพลังงานในสองวัฏจักรแรกของการติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด	124
รูปที่ 6-17 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของการติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด.....	124
รูปที่ 6-18 การแบ่งจ่ายพลังงานในสองวัฏจักรท้ายของการติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด	124

รูปที่ 6-19 การแบ่งจ่ายพลังงานในสองวัฏจักรแรกของการติดตั้งแบบให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด	126
รูปที่ 6-20 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของการติดตั้งแบบให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด	126
รูปที่ 6-21 การแบ่งจ่ายพลังงานในสองวัฏจักรท้ายของการติดตั้งแบบให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด	127
รูปที่ 6-22 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของการติดตั้งแบบให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด	128
รูปที่ 6-23 ผลการทดสอบการแบ่งจ่ายพลังงานของการติดตั้งแบบให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด	129
รูปที่ 7-1 การกระจายตัวของค่ากำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานกับแบตเตอรี่ (ก) และทำงานกับชุดเก็บประจุความจุสูง (ข)	142
รูปที่ 7-2 การกระจายตัวของกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ (ก) และชุดเก็บประจุความจุสูง (ข)	143
รูปที่ 7-3 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงตลอดการทำงานตามวัฏจักรขับทดสอบ	143
รูปที่ 7-4 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อระยะทางสำหรับวัฏจักรขับทดสอบทั้งสามแบบ	145
รูปที่ 7-5 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าของระบบตลอดการทำงานตามวัฏจักรขับทดสอบตามสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุด	146
รูปที่ 7-6 ค่าใช้จ่ายตามระยะเวลาใช้งานระหว่างแบตเตอรี่กับชุดเก็บประจุความจุสูง	152

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ ก-1 ผลรวมพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงกับพลังงานสะสมในแหล่งพลังงานทุติยภูมิ $(E_{FC} - \Delta E_{STORE,BATT})$	163
รูปที่ ก-2 ผลการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับ แบตเตอรี่ตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15	164
รูปที่ ก-3 ผลการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับ ชุดเก็บประจุความจุสูงตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15	164
รูปที่ ก-4 ผลการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับ แบตเตอรี่ตามวัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75	165
รูปที่ ก-5 ผลการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับ ชุดเก็บประจุความจุสูงตามวัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75	165
รูปที่ ก-6 ผลการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับ แบตเตอรี่ตามวัฏจักรขับทดสอบ NYCC	166
รูปที่ ก-7 ผลการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับ ชุดเก็บประจุความจุสูงตามวัฏจักรขับทดสอบ NYCC	166
รูปที่ ก-8 การสอบทวนแบบจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงโดยวัฏจักรขับ ทดสอบ Modified FTP-75	167
รูปที่ ก-9 ผลค่าแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงขนาดต่างๆ จากแบบจำลองโดยวัฏจักรขับ ทดสอบ Modified FTP-75	167
รูปที่ ข-1 การปรับแก้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงโดยวิธีของ Senger [44]	169
รูปที่ ข-2 การปรับแก้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงโดยวิธีของ Hu [46]	170
รูปที่ ค-1 วงจรไฟฟ้าของชุดทดลองระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด	173
รูปที่ ค-2 การเชื่อมต่อสายไฟฟ้าและการปรับตั้งสวิตช์ที่ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	174
รูปที่ ง-1 หน้าต่างโปรแกรม NexaMon OEM 2.0	175
รูปที่ ง-2 อุปกรณ์ตรวจวัดอัตโนมัติ	176
รูปที่ ง-3 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟารุ่น ACS754xCB-050 และ ACS754SCB-200 จาก Allegro Microsyste	178
รูปที่ ง-4 หน้าต่างโปรแกรม LabVIEW ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อการเชื่อมต่อและบันทึกสัญญาณระบบ ตรวจวัดอัตโนมัติ	180
รูปที่ จ-1 การกำหนด Current Directory	183

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ ๑-2 การพิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานแบบจำลองเบตเตอร์ี.....	184
รูปที่ ๑-3 หน้าต่างแบบจำลองเบตเตอร์ี.....	184
รูปที่ ๑-4 หน้าต่างแสดงผลการจำลอง	185
รูปที่ ๑-5 การพิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง	185
รูปที่ ๑-6 หน้าต่างแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง.....	186
รูปที่ ๑-7 การพิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง	186
รูปที่ ๑-8 หน้าต่างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง	187
รูปที่ ๑-9 การพิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานแบบจำลองกำลังไฟฟ้า.....	188
รูปที่ ๑-10 หน้าต่างแบบจำลองกำลังไฟฟ้า	188
รูปที่ ๑-11 หน้าต่างแสดงผลการจำลองกำลังไฟฟ้า.....	189
รูปที่ ๑-12 การพิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานแบบจำลองสมรรถนะในการเร่งความเร็ว	189
รูปที่ ๑-13 หน้าต่างแบบจำลองสมรรถนะในการเร่งความเร็ว	190
รูปที่ ๑-14 หน้าต่างแสดงผลการจำลองสมรรถนะในการเร่งความเร็ว	190
รูปที่ ๑-15 การพิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานแบบจำลองระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด.....	191
รูปที่ ๑-16 หน้าต่างแบบจำลองระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด.....	192
รูปที่ ๑-17 หน้าต่างแสดงผลการจำลองระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด.....	192

รายการสัญลักษณ์

a	คือ	ความเร่งของรถ (m/s^2)
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรถ (m^2)
C_{10}	คือ	ความจุของแบตเตอรี่ที่การจ่ายไฟฟ้า 10 ชั่วโมง (แอมแปร์-ชั่วโมง)
C_B	คือ	ความจุของแบตเตอรี่ (แอมแปร์-ชั่วโมง)
$C_{Batt / int}$	คือ	ความจุของแบตเตอรี่เมื่อเริ่มต้นใช้งาน (แอมแปร์-ชั่วโมง)
$C_{Batt / end}$	คือ	ความจุของแบตเตอรี่เมื่อหมดอายุการใช้งาน (แอมแปร์-ชั่วโมง)
C_d	คือ	สัมประสิทธิ์ความต้านทาน
C_l	คือ	การสูญเสียแบบคงที่ในมอเตอร์
C_p	คือ	Peukert Capacity (แอมแปร์-ชั่วโมง)
C_{SC}	คือ	ความจุของชุดเก็บประจุความจุสูงหนึ่งเซลล์ (ฟารัด)
$C_{SC / end}$	คือ	ความจุของชุดเก็บประจุความจุสูงเมื่อหมดอายุการใช้งาน (ฟารัด)
$C_{SC / int}$	คือ	ความจุของชุดเก็บประจุความจุสูงเมื่อเริ่มต้นใช้งาน (ฟารัด)
DOD	คือ	ค่าความลึกการคายประจุ (%)
E_{FC}	คือ	พลังงานที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายตลอดการทดสอบ (จูล)
$E_{life / Batt}$	คือ	พลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (วัตต์-ชั่วโมง)
$E_{life / SCt}$	คือ	พลังงานที่ชุดเก็บประจุความจุสูงจ่ายตลอดอายุการใช้งาน (วัตต์-ชั่วโมง)
E_S	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (โวลต์)
E_{SC}	คือ	ระดับพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูง(จูล)
$\Delta E_{STORE, BATT}$	คือ	ระดับพลังงานที่เปลี่ยนแปลงเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ (จูล)
f_r	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการกลิ้ง
F_a	คือ	แรงเพื่อสร้างความเร่ง (นิวตัน)
$F_{a,m}$	คือ	แรงเพื่อสร้างความเร่งเชิงมุมของแกนหมุนของมอเตอร์ (นิวตัน)
$F_{a,wh}$	คือ	แรงเพื่อสร้างความเร่งเชิงมุมของล้อ (นิวตัน)
F_{cl}	คือ	แรงในการขึ้นทางลาดชัน (นิวตัน)
F_d	คือ	แรงต้านทานจากอากาศ (นิวตัน)

F_r	คือ	แรงต้านทานการกลิ้ง (นิวตัน)
g	คือ	ความเร่งโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ 9.81 m/s ²
G	คือ	อัตราทดของมอเตอร์ถึงล้อ
H_{Corr}	คือ	ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ปรับแก้แล้ว (Standard liters)
H_{meas}	คือ	ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่วัดได้จากการทดสอบ (Standard liters)
I	คือ	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
I_m	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของแกนหมุนของ (kg-m ²)
I_{wh}	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของล้อ (kg-m ²)
k_c	คือ	สัมประสิทธิ์ความต้านทานในขดลวดมอเตอร์
k_i	คือ	สัมประสิทธิ์แกนเหล็กมอเตอร์
K_m	คือ	ค่าคงที่ของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับจำนวนขดลวดและขูดขดลวด
k_p	คือ	Peukert Coefficient
k_ω	คือ	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานภายนอกมอเตอร์
L_{COP}	คือ	การสูญเสียจากความต้านทานในขดลวด (วัตต์)
L_{Fr}	คือ	การสูญเสียจากความเสียดทานภายนอกมอเตอร์ (วัตต์)
L_{ir}	คือ	การสูญเสียภายในแกนเหล็ก (วัตต์)
L_{SC}	คือ	ความเหนียวน้ำ (โอม)
LHV	คือ	ค่าความร้อนต่ำของการทำปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงต่อโมล (จูลต่อโมล)
m	คือ	มวลรวมของรถและน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (กิโลกรัม)
$n_{cell,B}$	คือ	จำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่
$n_{parallel,SC}$	คือ	จำนวนการต่อขนานของขดเก็บประจุความจุสูง
$n_{series,SC}$	คือ	จำนวนการต่ออนุกรมของขดเก็บประจุความจุสูง
n_{wh}	คือ	จำนวนของของล้อ
\dot{N}	คือ	อัตราการใช้เชื้อเพลิงเชิงโมล (โมลต่อวินาที)
N_{cyc}	คือ	จำนวนวัฏจักรตลอดอายุการใช้งาน
N_{cell}	คือ	จำนวนหน่วยของขดเก็บประจุความจุสูง
N_{pack}	คือ	จำนวนของขดแบตเตอรี่

$P_{m,in}$	คือ	กำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ (วัตต์)
$P_{m,regen}$	คือ	กำลังไฟฟ้าจากการหยุดรถ (วัตต์)
$P_{m,out}$	คือ	กำลังขับจากมอเตอร์ (วัตต์)
$P_{out,FC}$	คือ	กำลังไฟฟ้าสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิง (วัตต์)
$P_{stack,FC}$	คือ	กำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์เชื้อเพลิง (วัตต์)
r	คือ	รัศมีของล้อ (เมตร)
$r_{i,B}$	คือ	ความต้านทานภายในต่อเซลล์ที่ 1 แอมแปร์-ชั่วโมง (โอhm)
R_a	คือ	ความต้านทานภายในของมอเตอร์ (โอhm)
$R_{i,B}$	คือ	ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ (โอhm)
$R_{p,SC}$	คือ	ความต้านทานภายในแบบขนาน (โอhm)
$R_{s,SC}$	คือ	ความต้านทานภายในแบบอนุกรม (โอhm)
SOC	คือ	ค่าระดับการจุก (%)
t	คือ	เวลา (วินาที)
$t_{0,B}$	คือ	เวลาเริ่มต้นขณะที่แบตเตอรี่มีประจุเต็ม
T	คือ	เวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้า (วินาที)
T_m	คือ	ค่าแรงบิดที่ได้จากมอเตอร์ (นิวตัน-เมตร)
v	คือ	ความเร็วของรถ (เมตรต่อวินาที)
V	คือ	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
$V_{cell,SC}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง 1 เซลล์ (โวลต์)
$V_{Nom,Batt}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (โวลต์)
$V_{OC,B}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเปิดวงจร (โวลต์)
V_{rate}	คือ	แรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง (โวลต์)
V_{SC}	คือ	แรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง (โวลต์)
Φ	คือ	ค่าฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux)
η_m	คือ	ประสิทธิภาพมอเตอร์
$\eta_{stack,FC}$	คือ	ประสิทธิภาพของแผงเซลล์เชื้อเพลิง
$\eta_{out,FC}$	คือ	ประสิทธิภาพสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิง
θ	คือ	มุมความลาดเอียงของพื้นถนน
ρ	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
ω	คือ	ความเร็วของมอเตอร์ (rad/s)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ปัญหามลภาวะทางอากาศและมลภาวะทางเสียงในเขตเมืองหลวง เช่น กรุงเทพมหานคร นับได้ว่าเป็นปัญหาที่สำคัญและยังต้องการการแก้ไขอยู่ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้นับเป็นที่ทราบดีว่ามีต้นกำเนิดมาจากยานพาหนะบนท้องถนน โดยเฉพาะรถจักรยานยนต์ นั้นนับได้ว่ามีเป็นจำนวนมากในเมืองเมื่อเทียบกับยานยนต์ชนิดอื่น รถจักรยานยนต์จึงเป็นต้นกำเนิดของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซพวกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเป็นมลพิษในอากาศในปริมาณมากอย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงปัญหามลภาวะทางเสียงที่เกิดจากรถจักรยานยนต์ก็เป็นปัญหาที่สำคัญอีกเช่นกัน

การปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณของมลพิษทางอากาศนั้น ส่วนหนึ่งจึงมุ่งมาที่การพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม แม้ว่ายานยนต์ไฟฟ้าจะมีข้อดี เช่น ไร้มลพิษ หรือมีระดับเสียงรบกวนต่ำ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ แต่ตลาดของยานยนต์ไฟฟ้ายังคงมีอยู่อย่างจำกัด เนื่องจากการใช้แบตเตอรี่นั้นไม่สามารถเก็บพลังงานได้มาก ทำให้ได้ระยะการขับขี่ที่สั้น รวมทั้งการเติมพลังงานด้วยการชาร์จแบตเตอรี่ใช้เวลานานมากอย่างเทียบไม่ได้กับการเติมน้ำมันลงในถังเก็บของระบบที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน นอกจากนี้การใช้งานแบตเตอรี่ในยานยนต์ก็ต้องการแบตเตอรี่พิเศษที่มีราคาสูง รวมถึงอายุการใช้งานที่จำกัดก็ทำให้ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนชุดแบตเตอรี่เป็นปัญหาได้มาก จากข้อจำกัดของระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ทางออกหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาอย่างกว้างขวางทั่วโลกคือการพัฒนาระบบยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงซึ่งถูกมองว่าเป็นทางออกในอนาคตสำหรับระบบขับเคลื่อนในยานยนต์ที่ไร้มลภาวะ

ในส่วนของการพัฒนายานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงนั้น ในปี พ.ศ. 2549 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลได้เข้าไปมีส่วนร่วมกับโครงการพัฒนา สาธิตการใช้ PEMFC (เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน) ในรถยนต์สามล้อ ซึ่งได้รับการมอบหมายจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) จากโครงการดังกล่าวซึ่งได้นำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้เป็นแหล่งพลังงานหลักเพียงแหล่งพลังงานเดียวได้พบปัญหาหลายประการ เช่นสมรรถนะที่จำกัดจากเซลล์เชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน เซลล์เชื้อเพลิงเริ่มต้นและหยุดทำงานได้ช้า ดังนั้นการพัฒนาส่วนต่อมาจึงมุ่งมาที่พัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดซึ่งมองว่าเป็นการผสมผสานข้อ

ได้เปรียบในด้านความสามารถในการเติมเต็มและกักเก็บพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงเข้ากับความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงของแบตเตอรี่

ด้วยโอกาสที่การพัฒนาจรวดยานยนต์แบบไร้มลพิษจะมีได้ต่อการแก้ปัญหามลภาวะในเมืองใหญ่ รวมถึงเป้าหมายที่จะพัฒนาองค์ความรู้ในการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ในยานยนต์จึงนำมาสู่วิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งเป็นการพัฒนาาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ โดยพิจารณาใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานปฐมภูมิและใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานทุติยภูมิ นอกจากนั้นชุดเก็บประจุความจุสูง (Supercapacitor, Ultracapacitor) ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายพลังงานชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าได้ในระดับที่สูงมาก ได้รับการพิจารณาเพื่อทดสอบเปรียบเทียบให้เป็นทางเลือกของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดแทนการใช้แบตเตอรี่ได้เช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ด้านการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานในยานยนต์ในแบบไฮบริด รวมถึงการพิจารณาเปรียบเทียบความเหมาะสมระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิสองชนิดได้แก่ แบตเตอรี่ และชุดเก็บประจุความจุสูงในการนำมาใช้งานร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาถึงข้อพิจารณาทางวิศวกรรมและความเป็นไปได้ในการนำระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดมาใช้ในรถจักรยานยนต์ โดยพิจารณาใช้เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 กิโลวัตต์ เป็นแหล่งพลังงานปฐมภูมิและใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานทุติยภูมิ รวมถึงพิจารณาการใช้ชุดเก็บประจุความจุสูงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิแทนการใช้แบตเตอรี่ โดยในเบื้องต้นได้ประเมินโดยใช้แบบจำลองสมรรถนะและภาระในการขับเคลื่อนเพื่อช่วยในการออกแบบและพิจารณาความเป็นไปได้ และส่วนต่อมาเป็นการศึกษาทดสอบอุปกรณ์ย่อยแต่ละส่วน เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของการใช้งานรวมถึงข้อพิจารณาในรายละเอียด และสุดท้ายเป็นการติดตั้งชุดทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้าพิกัดกำลัง 5 กิโลวัตต์ เพื่อการจำลองภาระการขับเคลื่อนให้แก่ระบบขับเคลื่อนที่ได้ติดตั้งขึ้น ซึ่งจะพิจารณาถึงสมรรถนะในการรับภาระตามที่

กำหนดรวมถึงการพิจารณาความเหมาะสมระหว่างการใช้แบตเตอรี่หรือการใช้ชุดเก็บประจุความจุสูงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิ

1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัยโดยย่อ

1. ศึกษาาระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้ารวมถึงระบบแบบไฮบริด
2. ศึกษาเทคโนโลยีของเซลล์เชื้อเพลิงรวมถึงข้อพิจารณาทางวิศวกรรมของการนำมาใช้งานจริงในยานยนต์
3. กำหนดสมรรถนะการขับเคลื่อนของรถจักรยานยนต์ต้นแบบ
4. สร้างแบบจำลองเพื่อช่วยในการออกแบบและประเมินความเป็นไปได้
5. ทดสอบอุปกรณ์ในส่วนย่อยเพื่อเรียนรู้ลักษณะเฉพาะ
6. ติดตั้งและทดสอบชุดทดสอบระบบขับเคลื่อน
7. จัดทำวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ต้นแบบระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ เพื่อใช้เผยแพร่และสาธิตต่อสาธารณชน
2. องค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับระบบขับเคลื่อนในยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด
3. สร้างโอกาสให้กับการใช้พลังงานทดแทนที่ปราศจากมลพิษมาใช้ในยานยนต์

1.6 เนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ ได้กล่าวถึงที่มา ความสำคัญ วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการดำเนินงาน โดยย่อ ประโยชน์ ไปจนถึงเนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์เพื่อความเข้าใจถึงกรอบความคิดและวิธีการของการวิจัย

บทที่ 2 บริทัศน์วรรณกรรม ได้แสดงให้เห็นถึงทิศทางการพัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดพร้อมทั้งสอดแทรกงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องเพื่อให้เข้าใจถึงหลักการและเหตุผลของแนวทางการพัฒนา และได้แสดงถึงลักษณะเฉพาะของการพัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์

เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ พร้อมทั้งชี้ให้เห็นช่องว่างทางวิชาการและเหตุผลที่นำมาสู่วิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 กล่าวถึงองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าซึ่งถือได้ว่าเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการวิจัยด้านระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

บทที่ 4 ศึกษาถึงกระบวนการในการออกแบบระบบขับเคลื่อนได้แก่ การกำหนดเป้าหมายทางสมรรถนะของรถจักรยานยนต์ต้นแบบ การศึกษาถึงภาระในการขับเคลื่อน และการจำลองระบบขับเคลื่อนเพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ในรถจักรยานยนต์

เมื่อได้ออกแบบระบบในขั้นต้นรวมถึงได้พิจารณาความเป็นไปได้แล้ว ในบทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบอุปกรณ์ย่อย และนำผลทดสอบที่ได้มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง และเพื่อสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับคุณลักษณะของอุปกรณ์ย่อยที่ใช้ และสามารถทำนายการทำงานได้ ไปจนถึงการทดสอบเพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลองที่สร้างขึ้น

จากที่ได้สร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับลักษณะเฉพาะและข้อพิจารณาของอุปกรณ์ย่อยในภาพกว้างแล้ว บทที่ 6 ได้ชี้เฉพาะถึงข้อพิจารณาการใช้งานของอุปกรณ์ย่อยต่างๆเพื่อการประกอบส่วนย่อยขึ้นเป็นระบบขับเคลื่อน และได้ศึกษาถึงรายละเอียดการติดตั้งระบบขับเคลื่อนในรูปแบบต่างๆ ไปจนถึงการทดสอบการจ่ายพลังงานกับระบบขับเคลื่อนที่ได้ติดตั้งขึ้น เพื่อพิจารณารูปแบบการติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบขับเคลื่อนสองชนิด คือ 1) ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ และ 2) ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง

เมื่อได้ทราบถึงรูปแบบการติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบขับเคลื่อนทั้งสองชนิดแล้ว ในบทที่ 7 ได้ทดสอบและพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อประเมินว่าแหล่งจ่ายพลังงานชนิดใดระหว่างแบตเตอรี่หรือชุดเก็บประจุความจุสูง จะเป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์

บทที่ 8 เป็นบทสรุปของวิทยานิพนธ์ ซึ่งกล่าวถึงภาพรวมของการดำเนินงานและผลสรุปที่ได้ในแต่ละส่วน รวมถึงช่องว่างทางวิชาการเพื่อเป็นข้อเสนอแนะต่องานวิจัยในอนาคต

สำหรับภาคผนวกได้แบ่งเป็นสี่ส่วน ภาคผนวก ก แสดงผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนเพิ่มเติมจากที่ไม่ได้แสดงในเนื้อหาบท ภาคผนวก ข กล่าวถึงวิธีการปรับแก้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเพื่อชดเชยแก่การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานในแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิ ภาคผนวก ค แสดงการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าในชุดทดลองระบบขับเคลื่อน ภาคผนวก ง กล่าวถึงการวัดและอุปกรณ์การวัด

ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ และสุดท้ายภาคผนวก จ แสดงวิธีการใช้งานแบบจำลองระบบขับเคลื่อนและ
อุปกรณ์ย่อยที่ได้พัฒนาขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม

2.1 ยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด

ในปัจจุบัน ด้วยปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและการขาดแคลนพลังงาน เทคโนโลยียานยนต์ได้มีการปรับตัวเพื่อสอดคล้องกับความพยายามในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1970 ที่ได้มีความพยายามในการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าขึ้นอย่างกว้างขวาง แต่เมื่อมาถึงปัจจุบัน เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าได้ปรับไปสู่ การพัฒนายานยนต์แบบไฮบริดที่นำเครื่องยนต์สันดาปภายในมาทำงานร่วมกับชุดแบตเตอรี่ โดยมีแนวคิดที่ให้เครื่องยนต์ทำงานที่พิกัดกำลังสูง ซึ่งจะทำงานได้ประสิทธิภาพที่ดีพร้อมการให้มลพิษจากไอเสียที่น้อย แล้วให้ชุดแบตเตอรี่จ่ายตามภาระเฉพาะเมื่อต้องการกำลังขับเคลื่อนต่ำ เช่น เมื่อรถออกตัวอย่างช้า หรือเพื่อขับอุปกรณ์ย่อยต่างๆ นอกจากนั้น ความพยายามที่จะปรับใช้เทคโนโลยีเครื่องยนต์สันดาปภายในให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นพร้อมลดมลภาวะก็มีความสำเร็จอยู่ในหลายส่วน เช่น การนำก๊าซธรรมชาติมาใช้ก็มีผลดีต่อเรื่องมลภาวะ รวมทั้งเป็นแหล่งพลังงานที่ยังพบว่ามีสำรองอยู่มาก การพัฒนาเครื่องยนต์ดีเซลทั้งการปรับในด้านการสันดาปเช่นการใช้หัวฉีดแรงดันสูงที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ หรือการสันดาปแบบใหม่เช่นเทคนิค HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) หรือการพัฒนาแก้ไขส่วนของไอเสียด้วยคาตาลิสต์ที่มีศักยภาพสูง แต่ในอีกทิศทางหนึ่ง การพัฒนาล่าสุดซึ่งเป็นการละทิ้งเครื่องยนต์สันดาปภายในโดยสิ้นเชิงก็คือ การพัฒนายานยนต์เซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นการพัฒนาที่เป็นการเปลี่ยนแหล่งพลังงานต้นทาง จากแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลมาสู่การใช้ไฮโดรเจนซึ่งถูกมองว่าให้รูปแบบการใช้พลังงานที่ไร้มลภาวะโดยสิ้นเชิง ในปัจจุบันทั่วโลกมีความสนใจพัฒนายานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก เช่นการพัฒนายานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ ซึ่งได้รับการมองว่าเป็นเป้าหมายสำคัญอย่างหนึ่งที่จะเปิดทางสู่การใช้ประโยชน์จากก๊าซไฮโดรเจนเนื่องจาก รถโดยสารนั้นมีรูปแบบการขับขี่ที่ค่อนข้างแน่นอน สามารถกำหนดสถานที่เติมเชื้อเพลิงและบำรุงรักษาได้ง่าย และด้วยขนาดของรถโดยสารที่มีพื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์ประกอบของระบบได้โดยสะดวก [1,2] นอกจากนั้นผู้ผลิตรถยนต์ก็ให้ความสำคัญกับการพัฒนายานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงเช่นกัน ตัวอย่างเช่น Honda ได้พัฒนารถยนต์นั่งขนาดกลางรุ่น FCX ซึ่งใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลักและทำงานร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูงในแบบไฮบริด และ Toyota ก็มีการพัฒนารถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงมาอย่างต่อเนื่องได้แก่ รุ่น FCHV ซึ่งใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลักและทำงานร่วมกับแบตเตอรี่ชนิด Ni-MH

ข้อสังเกตหนึ่งก็คือการพัฒนาของยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบันมักมาพร้อมกับการพัฒนารูปแบบยานยนต์แบบไฮบริด [3,4] โดยยานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยเซลล์เชื้อเพลิงอย่างเดียว นั้นถูกมองว่ามีข้อจำกัดในการทำงานมากจนเกินไป เนื่องจากชุดเซลล์เชื้อเพลิงจะให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ภาระต่ำกว่าพิกัดสูงสุด รวมถึงการตอบสนองต่อภาระที่จำกัด โดยระบบการทำงานแบบไฮบริดนั้นอาจทำงานร่วมกับชุดแบตเตอรี่ หรือกับชุดเก็บประจุความจุสูง (Supercapacitor, Ultracapacitor) ซึ่งจะช่วยรับภาระสูงสุดแทนชุดเซลล์เชื้อเพลิงได้ รวมถึงช่วยให้สามารถรับพลังงานจากการหยุดรถกับมาเก็บได้ (Regenerative braking) [3,5]

อย่างไรก็ตามระบบยานยนต์ไฮบริดที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานนั้นมีข้อพิจารณาการออกแบบที่แตกต่างกับยานยนต์ไฮบริดที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นหลักอย่างสิ้นเชิง [6] เนื่องจากลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่างกับเครื่องยนต์ กล่าวคือเครื่องยนต์สันดาปภายในนั้นมีจุดทำงานที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ภาระการทำงานสูง ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงมีจุดทำงานที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ภาระการทำงานต่ำ ซึ่งถือเป็นข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์ เพราะโดยมากแล้วยานยนต์มักทำงานที่ภาระต่ำมากกว่าการทำงานที่พิกัดสูงสุด

การศึกษาของ Schenck และคณะ [7] ได้ยืนยันถึงความจำเป็นของการใช้ระบบไฮบริดในยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการตอบสนองต่อภาระที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของการใช้งานในยานยนต์ และแหล่งพลังงานทุติยภูมิเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญที่เข้ามาช่วยทำงานเพื่อจ่ายภาระสูงสุด (Peak Power) คือภาระที่นอกเหนือจากภาระเฉลี่ยที่ชุดเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังสามารถลดความสำคัญของการควบคุมทางพลศาสตร์ของระบบไปได้ด้วย [8]

Corbo และคณะ [9] รวมทั้งการศึกษาต่อเนื่อง [10] ศึกษาถึงการทำงานร่วมกันของเซลล์เชื้อเพลิงและแบตเตอรี่ การศึกษาได้แสดงให้เห็นถึงการควบคุมการทำงานร่วมกันด้วยแรงดันสัมผัสระหว่างแหล่งพลังงานทั้งสอง การศึกษานี้ยังระบุถึงการไม่ขึ้นกับรูปแบบการควบคุมต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kim และคณะ [11] ซึ่งใช้รูปแบบการควบคุมที่ซับซ้อนกว่ามาก เช่นเดียวกับ Moore และคณะ [12] ผลการศึกษานี้อาจแย้งกับความเชื่อที่ว่า การควบคุมเซลล์เชื้อเพลิงให้ทำงานที่จุดทำงานที่ประสิทธิภาพสูงน่าจะมีผลดีต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิง หากเป็นเช่นนั้นแล้ว การกำหนดสัดส่วนการแจกจ่ายพลังงานในระบบไฮบริด ระหว่างชุดเซลล์เชื้อเพลิงและแหล่งพลังงานทุติยภูมิก็น่าจะเป็นปัจจัยที่สำคัญมากกว่าในการลดอัตราการใช้เชื้อเพลิง

การศึกษาของ Gao [3] ได้จำลองเปรียบเทียบระหว่างการทำงานแบบไฮบริดของเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ที่เทียบกับชุดเก็บประจุความจุสูง โดยกำหนดให้สัดส่วนกำลังของเซลล์เชื้อเพลิงต่อแหล่งเก็บพลังงานเท่ากันในทั้งสองกรณี สรุปได้ว่าการใช้ชุดเก็บประจุความจุสูงในระบบแบบไฮบริดมีข้อได้เปรียบอย่างเด่นชัด โดยลักษณะเฉพาะของการจ่ายกำลังและน้ำหนักเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้แบตเตอรี่เสียเปรียบ Mierlo และคณะ [13] แสดงถึงรูปแบบการจัดวางระบบไฮบริดของเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูงที่หลากหลาย พร้อมการจำลองการทำงานและแนวทางการปรับตั้ง

2.2 ระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์

รถจักรยานยนต์นั้นนับว่าเป็นรูปแบบการเดินทางหลักสำหรับเมืองหลวงของหลายประเทศในเอเชีย โดยมีอัตราส่วนถึง 50 % [14] และในประเทศไทยหลังจากช่วงวิกฤตภาคเศรษฐกิจยอดการจำหน่ายรถจักรยานยนต์เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วมากคือจากที่ประมาณเก้าหมื่นคันต่อปีในปี พ.ศ. 2542 มาเป็นยอดการจำหน่ายประมาณหนึ่งแสนแปดหมื่นต่อปีในปี พ.ศ. 2547 และในเดือนมีนาคมปี พ.ศ. 2548 พบว่ามีจำนวนรถจักรยานยนต์ที่จดทะเบียนเป็นจำนวนสูงถึงร้อยละ 64 ของรถยนต์ที่จดทะเบียนทั้งหมดในประเทศไทย และการที่รถจักรยานยนต์มีจำนวนมากในเมืองนั้น รถจักรยานยนต์จึงเป็นต้นกำเนิดของก๊าซ และก๊าซพวกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเป็นมลพิษในอากาศเป็นปริมาณมาก รวมถึงปัญหามลภาวะทางเสียงที่เกิดจากรถจักรยานยนต์ก็เป็นปัญหาที่สำคัญอีกเช่นกัน

จากปัญหาในด้านต่างๆ จากการใช้รถจักรยานยนต์ในเมือง ได้มีความพยายามผลักดันรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ปราศจากมลพิษออกสู่ตลาด เช่นในประเทศไต้หวัน [15] แต่กลับไม่ได้การตอบรับที่ดีนักเนื่องจากการใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานทำให้ได้ระยะการขับขี่ที่ไม่ดีนัก รวมถึงข้อจำกัดของเวลาและสถานีสำหรับการเติมพลังงาน ดังนั้นแนวทางการพัฒนารถจักรยานยนต์ที่ไร้มลพิษจึงหันมาสู่การพัฒนาจักรยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงเช่นเดียวกับที่มีการพัฒนาระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดในยานยนต์ขนาดกลางและขนาดใหญ่

อย่างไรก็ตามการออกแบบระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์นั้นจะมีข้อพิจารณาที่ต่างกับการออกแบบสำหรับรถยนต์ ซึ่งเห็นได้จากการกำหนดขนาดของชุดเซลล์เชื้อเพลิงในรถยนต์ เช่น FCX จาก Honda หรือ FCHV จาก Toyota มักกำหนดให้มีพิกัดกำลังเท่ากับกำลังของมอเตอร์ เพื่อให้สามารถรองรับการขับขี่ได้ทุกรูปแบบ [16] โดยไม่ได้ให้ความสำคัญกับขนาดของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิมากนัก เพราะกรอบความคิดของ

การออกแบบสำหรับรถยนต์ที่ไม่ต้องคำนึงถึงด้านราคามากนัก รวมถึงในรถยนต์นั้นมีพื้นที่สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ได้อย่างเพียงพอ แต่ในการออกแบบสำหรับรถจักรยานยนต์นั้นราคาและพื้นที่ในการติดตั้งถือเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษ ดังนั้นการกำหนดขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงจึงต้องถูกกำหนดที่กำลังเพื่อการขับเคลื่อนด้วยความเร็วคงที่ (Cruising power) แล้วจึงกำหนดขนาดของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิให้สามารถรองรับภาระในส่วนเกินได้ [17]

จากการคำนวณค่ากำลังขับเคลื่อนของรถจักรยานยนต์และรถยนต์โดยใช้วิธีที่แสดงในบทที่ 4 ซึ่งได้ตรวจสอบความถูกต้องโดยเทียบกับงานวิจัยของ Lin [17] พบว่าเมื่อคิดต่อหน่วยมวลและระยะทางที่เท่ากันแล้วรถจักรยานยนต์ต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนมากกว่ารถจักรยานยนต์ดั่งตารางที่ 2-1 ซึ่งอธิบายได้โดยการพิจารณาค่ากำลังขับเคลื่อน ซึ่งเห็นได้ว่าประกอบด้วยสามส่วน คือ 1) กำลังเพื่อสร้างความเร่ง 2) กำลังเพื่อเอาชนะแรงต้านทานการกลิ้ง และ 3) กำลังเพื่อเอาชนะแรงต้านทานการไหลของอากาศ ซึ่งกำลังเพื่อเอาชนะแรงลากจากอากาศและกำลังเพื่อเอาชนะแรงต้านทานการกลิ้งของรถจักรยานยนต์นี้เมื่อคิดต่อหน่วยมวลจะมีค่ามากกว่าในรถยนต์ดั่งตารางที่ 2-1 ซึ่งบ่งชี้ถึงการออกแบบระบบขับเคลื่อนสำหรับรถจักรยานยนต์จะต้องรองรับพลังงานต่อมวลที่มากกว่า

ตารางที่ 2-1 พลังงานในการขับเคลื่อนต่อหน่วยมวลต่อระยะทาง (J/km/kg)

	E ACC.		E ROLL.		E DRAG.		TOTAL	
	Scooter	Car	Scooter	Car	Scooter	Car	Scooter	Car
ECE-15	3.2	3.2	98.1	62.8	181.5	23.2	282.8	89.2
Modified FTP-75	4.6	4.6	98.1	62.8	201.1	25.8	303.8	93.2
NYCC	11	11	98.1	62.8	99.2	12.7	208.3	86.5

แม้ว่าข้อพิจารณาของการออกแบบระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์จะแตกต่างกันกับการออกแบบสำหรับรถยนต์ แต่จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังมีงานวิจัยที่ศึกษาโดยจำเพาะเจาะจงถึงระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ยังมีอยู่อย่างจำกัด [9,10,17,18] และยังคงมีคำถามอยู่ในหลายประเด็น เช่น สัดส่วนการแจกจ่ายพลังงานในระบบไฮบริด การกำหนดขนาดโดยพิจารณาขนาดและน้ำหนัก การพิจารณาด้านระยะการขับเคลื่อนและการประหยัดพลังงาน ผลของการนำพลังงานจากการหยุดรถ

กลับมาใช้สำหรับการจราจรในเมือง และ การพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่กับชุดเก็บประจุความจุสูงอย่างสมเหตุสมผล

จากช่องว่างทางวิชาการดังกล่าวประกอบกับความต้องการพัฒนาองค์ความรู้ในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด เพื่อเป็นส่วนเติมเต็มในโครงการพัฒนาสาธิตการใช้ PEMFC (เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน) ในรถยนต์สามล้อซึ่งได้รับการมอบหมายจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) จึงนำมาสู่วิทยานิพนธ์นี้ซึ่งเป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ขนาดเล็ก โดยพิจารณาใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนพิกัด 1.2 กิโลวัตต์ เป็นแหล่งพลังงานปฐมภูมิ และใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิ นอกจากนั้นชุดเก็บประจุความจุสูงได้ถูกมองว่าสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิแทนที่แบตเตอรี่ได้ และทำยที่สุดได้พิจารณาเปรียบเทียบความเหมาะสมระหว่างแบตเตอรี่กับชุดเก็บประจุความจุสูง



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

3.1 ลักษณะของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าประกอบด้วย มอเตอร์ขับเคลื่อน ชุดควบคุม ระบบส่งกำลัง และแหล่งจ่ายพลังงาน โดยมอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนแทนเครื่องยนต์ของระบบขับเคลื่อนที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นต้นกำลัง ซึ่งจะใช้มอเตอร์ตัวเดียวรับภาระการขับเคลื่อนทั้งหมดหรือใช้มอเตอร์หลายตัวก็ได้ตามแต่การออกแบบ โดยมอเตอร์จะขับผ่านระบบส่งกำลังซึ่งก็คือชุดเฟืองทดความเร็วและแรงบิดจะถูกควบคุมโดยชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Controller) ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายไปยังมอเตอร์ให้เหมาะสมกับภาระซึ่งวิธีการควบคุมนั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของมอเตอร์ในแต่ละแบบแตกต่างกันออกไป ในส่วนของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้านั้นอาจเป็น แบตเตอรี่ ชุดเก็บประจุความจุสูง (Supercapacitor, Ultracapacitor) หรือเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) โดยแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะในการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น แบตเตอรี่มีความสามารถในการให้กำลังไฟฟ้าได้ดีหรือมีความหนาแน่นเชิงกำลัง (Power density) สูง ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีความสามารถในการจ่ายพลังงานได้ดีหรือมีความหนาแน่นเชิงพลังงาน (Energy density) สูง

ตามที่ได้มีหลายฝ่ายพยายามที่จะพัฒนาระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้ามาใช้นั้นเนื่องมาจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น มีปัญหามลภาวะทางอากาศจากก๊าซไอเสียจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน รวมถึงมลภาวะทางเสียงจากเครื่องยนต์ ประกอบกับราคาน้ำมันมีอัตราสูงขึ้นมาโดยตลอด เป้าหมายการพัฒนาจึงมุ่งมาที่ การพัฒนาระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า เนื่องจากระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้านั้นมีลักษณะเฉพาะที่เป็นข้อได้เปรียบหลายอย่างแตกต่างไปจากระบบขับเคลื่อนที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นต้นกำลังดังนี้

- ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบขับเคลื่อนที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยคิดจากการนำน้ำมันดิบมาใช้แปลงเป็นพลังงานในที่สุด แม้จะเห็นว่าการใช้ไฟฟ้านั้นต้นทางของพลังงานก็คือน้ำมันดิบเช่นเดียวกันแต่ว่าขั้นตอนการแปรูปน้ำมันดิบมาเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นมีประสิทธิภาพมากกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายในดังแสดงในตารางที่ 3-1 [19] ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในแต่ละขั้นตอนของการแปลงพลังงานจากน้ำมันดิบจนถึงพลังงานขับเคลื่อนที่ล้อของ

ระบบที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICEV) กับระบบยานยนต์ไฟฟ้า (EV) นอกจากนั้นวัตถุดิบในการผลิตไฟฟ้านั้นอาจมาจากแหล่งอื่นได้อีก เช่น เชื้ออนน้ำ หรือพลังงานลม

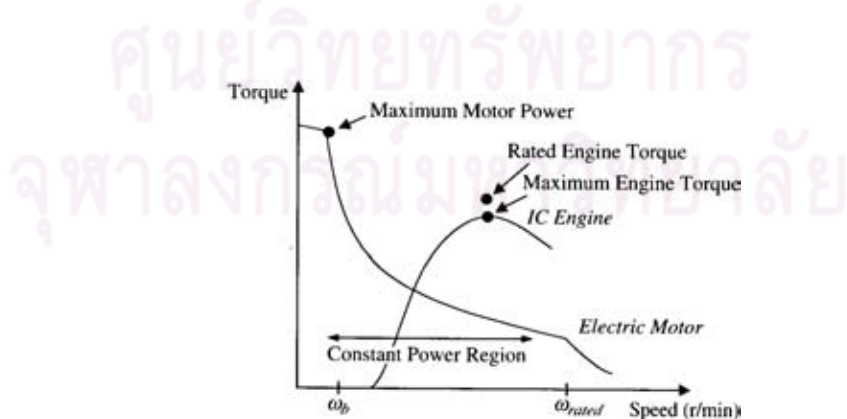
ตารางที่ 3-1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานจากน้ำมันดิบจนถึงพลังงานขับเคลื่อนที่ล้อของระบบที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICEV) กับระบบยานยนต์ไฟฟ้า (EV)

ICEV	Efficiency (%)		EV	Efficiency (%)	
	Max	Min		Max	Min
Crude oil			Crude oil		
Refinery (petroleum)	90	85	Refinery (fuel oil)	97	95
Distribution to fuel tank	99	95	Electricity generation	40	33
engine	22	20	Transmission to wall outlet	92	90
Transmission / axle wheels	98	95	Battery charger	90	85
			Battery (lead acid)	75	75
			Motor/controller	85	80
			Transmission / axle wheels	98	95
Overall efficiency (Crude oil to wheel)	19	15	Overall efficiency (Crude oil to wheel)	20	14

- ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสามารถใช้พลังงานที่สูญเสียจากการหยุดรถมาใช้ใหม่ได้ (Regenerative braking) โดยในขณะที่เบรกมอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นเครื่องผลิตไฟฟ้า (Generator) ผลิตไฟฟ้ากลับมาประจุ (Charge) ในแบตเตอรี่ ซึ่งจะมีประโยชน์มากหากการขับที่จะต้องมีการหยุดรถบ่อย เช่นในเมืองหลวง
- เสียงที่เกิดจากการทำงานของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าในเครื่องยนต์มาก ทำให้ช่วยลดมลภาวะทางเสียงลงไปได้
- การใช้ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้านั้นปราศจากการเกิดมลพิษทางอากาศในบริเวณที่ใช้งานอย่างสิ้นเชิง แม้ว่าต้นทางของพลังงานส่วนหลักแล้วก็คือการเผาผลาญน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า

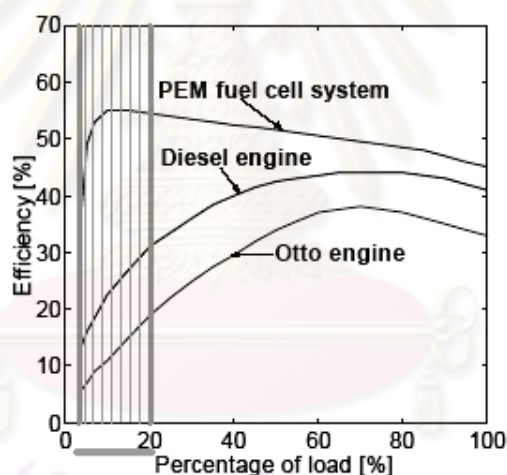
เช่นกัน แต่ว่าโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่อยู่ห่างไกลแหล่งชุมชนและการเผาผลาญน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดมลพิษทางอากาศน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน

- ด้วยลักษณะเฉพาะของการแปรเปลี่ยนแรงบิดต่อความเร็วรอบของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้านั้นมีความได้เปรียบระบบขับเคลื่อนที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในอยู่มาก กล่าวคือ ลักษณะการแปรเปลี่ยนแรงบิดของเครื่องยนต์นั้น ที่ความเร็วรอบต่ำจะมีแรงบิดน้อยและจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบไปสูงสุดที่ความเร็วรอบค่าหนึ่งและจากนั้นหากเพิ่มความเร็วรอบขึ้นไปอีกแรงบิดจะตกลงดังรูปที่ 3-1 [19] ในการออกตัวและทำความเร็วจึงจำเป็นที่จะต้องใช้ชุดเฟืองทดแบบหลายอัตราทดเพื่อปรับให้ทำงานที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์อยู่ในช่วงที่มีแรงบิดเพียงพอและช่วยในการออกตัว ในขณะที่ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้านั้นแรงบิดจะค่าสูงสุดในขณะหยุดนิ่งและมีช่วงกำลังสูงสุดกว้าง ด้วยลักษณะเฉพาะของแรงบิดต่อความเร็วของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าเป็นดังนี้จึงไม่จำเป็นที่จะต้องใช้ชุดเฟืองทดแบบหลายอัตราทดเข้ามาช่วยเหมือนในระบบขับเคลื่อนที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน เพียงแต่ใช้เฟืองอัตราทดเดียวหรือขับโดยตรงโดยไม่ใช้เฟืองทดก็ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ การที่ไม่ต้องใช้ชุดเฟืองนี้ก็เป็น การลดขั้นตอนการส่งกำลังและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางกลได้



รูปที่ 3-1 การเปลี่ยนแปลงของแรงบิดต่อความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์และเครื่องยนต์

- นอกจากนั้นแล้ว หากพิจารณาเฉพาะที่ระบบขับเคลื่อนที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงาน เซลล์เชื้อเพลิงยังมีลักษณะพิเศษที่วาระดับของประสิทธิภาพยังมีค่าสูงในช่วงกว้างมากเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ลักษณะพิเศษนี้มีความสำคัญมาก เนื่องจากกำลังขับเคลื่อนที่ต้องการสำหรับการขับเคลื่อนในเมืองโดยส่วนมากคิดเป็นเพียง 10 - 20% ของภาระสูงสุดเท่านั้น หากพิจารณาถึงการเปรียบเทียบในรูปที่ 3-2 [20] ถึงแม้ค่าสูงสุดของประสิทธิภาพของแหล่งพลังงานในการขับเคลื่อนทั้งสามอาจดูไม่ต่างกันมากนัก แต่จะพบว่าการทำงานของเครื่องยนต์จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำเป็นอย่างมากที่ภาระการทำงานที่ต่ำ ในขณะที่ยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่าอย่างชัดเจน



รูปที่ 3-2 ประสิทธิภาพของแหล่งพลังงานสามประเภทเทียบกับสัดส่วนของภาระขับเคลื่อน

ถึงแม้ว่าระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าจะมีลักษณะเฉพาะที่มีความได้เปรียบกว่าระบบขับเคลื่อนที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน แต่ยังคงมีข้อจำกัดอยู่หลายประการเช่น

- ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าต้องใช้เวลานานมากในการประจุไฟฟ้าในแต่ละครั้งให้กับแบตเตอรี่ เมื่อเทียบกับการเติมเชื้อเพลิงในถังเก็บของระบบขับเคลื่อนที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในนั้นระยะเวลาแตกต่างกันมาก ถึงแม้ว่าจะเป็นระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานก็ยังมีข้อจำกัดในการจัดเก็บก๊าซไฮโดรเจนและยังต้องมีการพัฒนา

ระบบพื้นฐานของสังคมให้มีการรองรับการใช้ก๊าซไฮโดรเจนให้เหมือนกับ สถานีจ่ายน้ำมันที่มีความแพร่หลายอยู่แล้วในปัจจุบัน

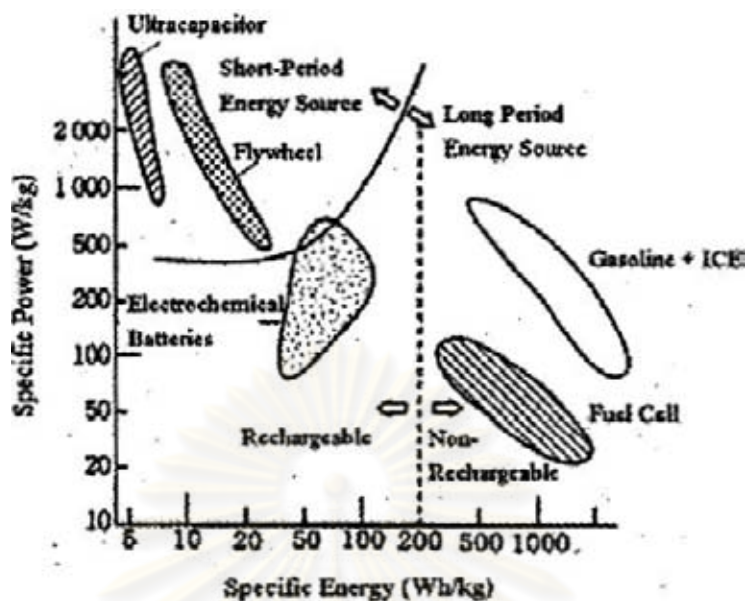
- ระบบขับเคลื่อนที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในมีความสามารถในการกักเก็บพลังงานพร้อมกับมีความสามารถในการให้กำลังขับเคลื่อนเพียงพอต่อการใช้งานโดยทั่วไป รวมถึงการขับขี่ในระยะทางไกล ในขณะที่ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่มีความสามารถในการเก็บพลังงานน้อยกว่าเครื่องยนต์อยู่มาก

3.2 ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแบบไฮบริด

3.2.1 ความจำเป็นของระบบไฮบริด

ถึงแม้ว่าระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าจะมีข้อได้เปรียบระบบขับเคลื่อนที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในดังกล่าวข้างต้น แต่จากข้อจำกัดของแหล่งจ่ายพลังงานหลายประการ เช่น ประการแรก โดยทั่วไปแล้วแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีความสามารถในการให้กำลังไฟฟ้าที่ดีจะมีความสามารถในการเก็บพลังงานที่ต่ำเช่นแบตเตอรี่หรือชุดเก็บประจุความจุสูง แต่หากเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่มีความสามารถในการเก็บพลังงานที่ดีก็มีความสามารถในการให้กำลังที่จำกัด เช่นเซลล์เชื้อเพลิงดังรูปที่ 3-3 [21] นอกจากนี้ หากพิจารณาเฉพาะระบบขับเคลื่อนที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานแล้ว เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถรับพลังงานย้อนกลับเข้ามาเก็บได้เหมือนแบตเตอรี่ ดังนั้นการประหยัดพลังงานด้วย Regenerative braking จึงเป็นไปได้ด้วยการใช้ชุดเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานแต่เพียงอย่างเดียว

ดังนั้นการพัฒนา ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้านั้นส่วนหนึ่งจะมุ่งไปที่การผสมผสานลักษณะเด่นเฉพาะของแหล่งจ่ายพลังงานชนิดต่างๆ เข้าไว้ด้วยกันเรียกว่าระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแบบไฮบริด (Hybrid electric propulsion system)



รูปที่ 3-3 แผนภาพ Ragone สำหรับแหล่งพลังงานชนิดต่างๆ

หากกล่าวถึงยานยนต์ไฮบริด (Hybrid vehicle) นั้นส่วนหนึ่งจะหมายถึงยานยนต์ที่ใช้กำลังในการขับเคลื่อนผสมกันระหว่างการใช้เครื่องยนต์กับการใช้ไฟฟ้า ซึ่งนำเอาข้อดีของเครื่องยนต์กับข้อดีของระบบไฟฟ้ามาใช้ร่วมกัน โดยเครื่องยนต์มีความสามารถในการกักเก็บพลังงานที่ดีสามารถวิ่งได้ระยะทางที่ไกลและใช้กำลังจากมอเตอร์มาช่วยเสริม ในการขับเคลื่อน เครื่องยนต์จะทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนและกำลังส่วนหนึ่งของเครื่องยนต์ก็จะส่งไปผลิตกระแสไฟฟ้ามาประจุเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ และเมื่อต้องการใช้ภาระที่มากเช่นการเร่งความเร็วหรือขึ้นทางลาดชันแบตเตอรี่จะส่งกระแสไฟฟ้ามาขับเคลื่อนเพื่อเสริมกำลังให้กับเครื่องยนต์ ในความหมายของยานยนต์ไฮบริดในอีกแนวทางหนึ่ง หมายถึงยานยนต์ที่มีแหล่งจ่ายพลังงานมากกว่าสองแหล่งขึ้นไป วิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นที่ระบบไฮบริดที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงานชนิดอื่น

3.2.2 แนวคิดการจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแบบไฮบริด

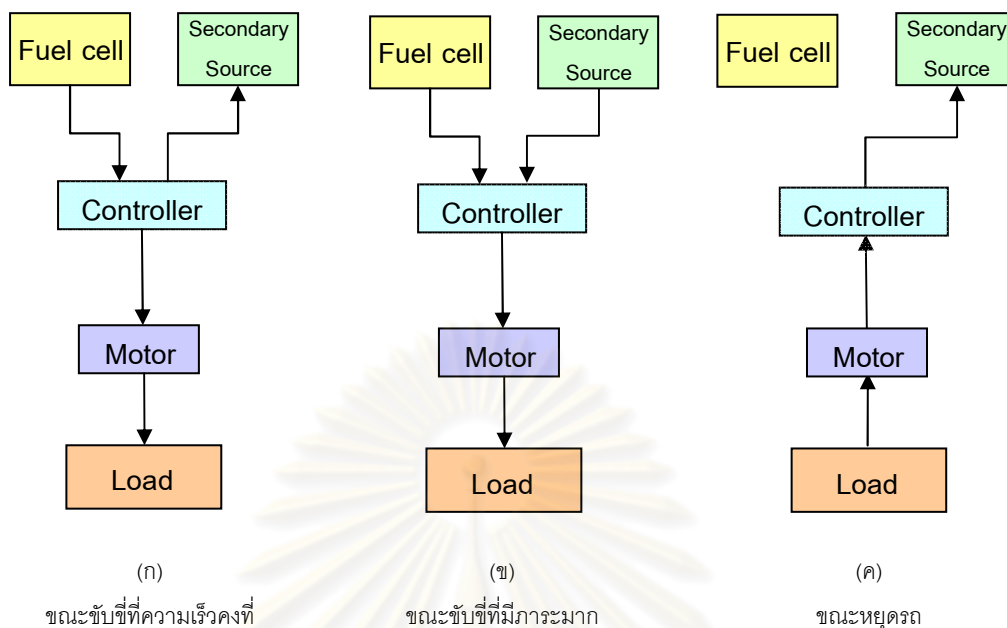
ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแบบไฮบริดที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานหลักนั้นโดยแนวคิดคือใช้เซลล์เชื้อเพลิงทำหน้าที่จ่ายพลังงานในช่วงการขับเคลื่อนหรือความเร็วคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถมีความหนาแน่นเชิงพลังงานมากกว่าแบตเตอรี่กว่า 10 เท่า คือจากที่ระดับ 100 วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมขึ้นมาถึงระดับ 1000 วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมดังนั้น

ข้อจำกัดของระยะการขับเคลื่อนทั้งปัญหาของการชาร์จแบตเตอรี่ที่ยาวนานสามารถถูกลดระดับความสำคัญลงได้ แต่เซลล์เชื้อเพลิงมีความสามารถในการจ่ายกำลังได้จำกัดจึงจำเป็นต้องใช้แหล่งพลังงานอีกส่วนหนึ่งเข้ามาช่วยเสริมในช่วงที่มีภาระมาก นอกจากนั้นภายในชุดเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกเข้ามาใช้ในการเริ่มต้นทำงาน เช่น ใช้ปั๊มน้ำ, อัดอากาศ, ใช้ในชุดควบคุมเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งแหล่งพลังงานทุติยภูมิจะเข้ามาช่วยได้โดยเฉพาะในช่วงการเริ่มทำงาน

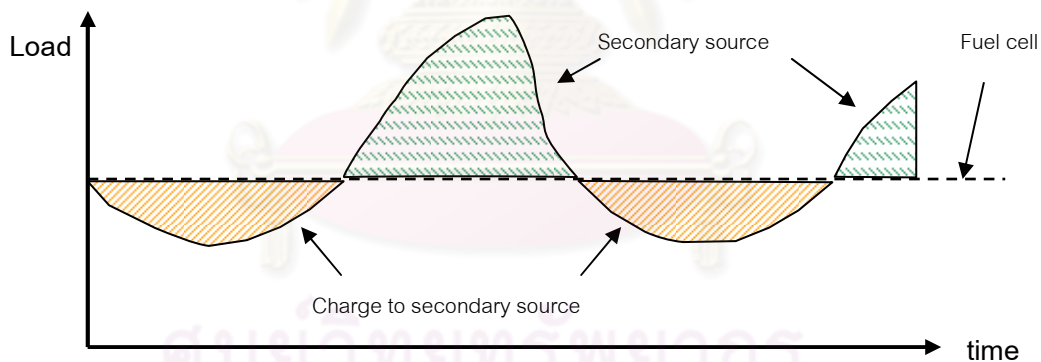
การทำงานนั้นสามารถพิจารณาแบ่งช่วงการทำงานตามการขับเคลื่อนได้ดังรูปที่ 3-4 และ รูปที่ 3-5 และอธิบายได้ดังนี้

- ในช่วงขับเคลื่อนด้วยความเร็วคงที่ พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนจะมาจากเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากในการขับเคลื่อนด้วยความเร็วคงที่ กำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนเพียงพอเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานในกลไกขับเคลื่อนและแรงต้านทานจากอากาศซึ่งใช้กำลังไม่มากนัก เซลล์เชื้อเพลิงจึงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอ นอกจากนั้นกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะถูกส่งไปประจุในแหล่งพลังงานทุติยภูมิ เช่น แบตเตอรี่ หรือชุดเก็บประจุความจุสูง
- ในช่วงที่มีภาระมาก เป็นช่วงการทำงานที่มีการเร่งความเร็วหรือขึ้นทางลาดชัน ช่วงภาระมากนี้เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถให้กำลังไฟฟ้าได้เพียงพอ แหล่งพลังงานทุติยภูมิก็จะจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ามาเสริมเพื่อให้มีกำลังในการขับเคลื่อนได้อย่างเพียงพอ
- ในช่วงการหยุดรถ เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถนำพลังงานสูญเสียจากการหยุดรถมาเก็บไว้ได้ แต่ถ้าวางการทำงานที่มีแหล่งพลังงานทุติยภูมิมาทำงานร่วมกันแล้ว พลังงานสูญเสียจากการหยุดรถสามารถนำมาประจุเก็บในแหล่งพลังงานทุติยภูมิได้

ศูนย์บริการเทคโนโลยี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-4 การส่งถ่ายพลังงานที่การขับขี่ต่างๆ

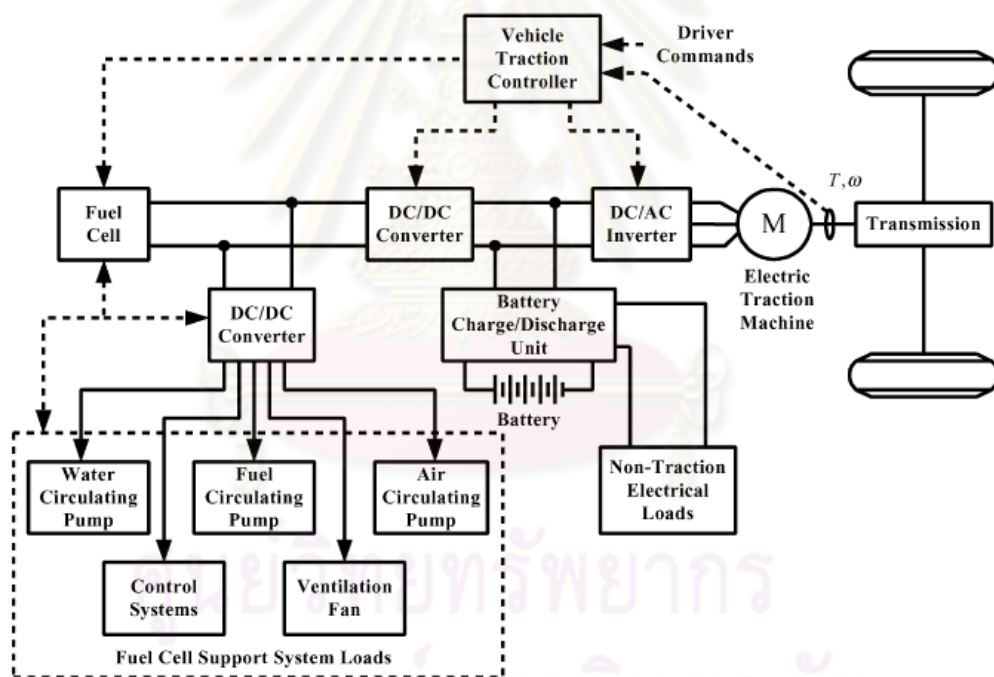


รูปที่ 3-5 การจ่ายและประจุพลังงานที่การขับขี่ต่างๆ

3.2.3 การจัดวางระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด

รูปที่ 3-6 [5] แสดงถึงส่วนประกอบสำคัญต่างๆ ของตัวอย่างของระบบยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิง โดยประกอบด้วยหน่วยเซลล์เชื้อเพลิงพร้อมชุดอุปกรณ์เสริม หน่วยเซลล์เชื้อเพลิงจะส่งแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่แผงไฟฟ้าแรงดันต่ำ (Low voltage bus) และด้วยแรงดันที่อาจไม่เท่ากันของ

อุปกรณ์ต่างๆ จะเห็นได้ว่าระบบต้องการชุดแปลงแรงดันไฟฟ้า (DC/DC converter) จำนวนหนึ่ง เช่น แปลงแรงดันที่ได้รับจากหน่วยเซลล์เชื้อเพลิงให้พอดีกับค่าแรงดันที่จำเป็นสำหรับชุดอุปกรณ์เสริม นอกจากชุดเซลล์เชื้อเพลิง ก็ยังมีชุดแบตเตอรี่ที่ประกอบด้วยหน่วยแบตเตอรี่ที่มาพร้อมกับชุดควบคุมการชาร์จไฟและจ่ายไฟ ซึ่งในที่นี้จะอยู่บนแผงไฟฟ้าแรงดันสูง (High voltage bus) ซึ่งพร้อมจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์ขับเคลื่อนโดยผ่านชุดแปลงไฟจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ (DC/AC inverter) เพื่อขับมอเตอร์กระแสสลับในกรณีนี้ หากเป็นมอเตอร์กระแสตรง ก็จะเป็นชุดแปลงแรงดันไฟฟ้า (DC/DC converter) ที่ปรับค่าแรงดันให้เหมาะสมกับมอเตอร์ขับเคลื่อนเข้าแทนที่ โดยทั้งหมดนี้ ต้องการระบบควบคุมที่ชาญฉลาดในการควบคุมระบบต่างๆ อีกชั้นหนึ่งเพื่อให้การทำงานของส่วนประกอบย่อยต่างๆ นี้ ทำงานประสานกันอย่างเหมาะสมตามแต่ผู้ขับขี่ยานยนต์ต้องการ



รูปที่ 3-6 ระบบยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิง

3.3 ส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

3.3.1 มอเตอร์ขับเคลื่อน

มอเตอร์ขับเคลื่อนเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายพลังงานมาเป็นกำลังในการขับเคลื่อนยานยนต์ ในการใช้งานมอเตอร์แต่ละชนิดก็มีลักษณะการทำงานและวิธีการควบคุมแตกต่างกันออกไปซึ่งการที่จะเลือกใช้มอเตอร์ในแต่ละชนิดหรือขนาดจะต้องมีความเข้าใจในหลักการทำงานและลักษณะเฉพาะของแต่ละชนิดว่ามีความสอดคล้องเหมาะสมกับการใช้งานอย่างไร

ในอดีตนั้นมอเตอร์ขับเคลื่อนแบบกระแสตรง (DC motor) ได้ถูกนำมาใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์อย่างมากเนื่องจากลักษณะของแรงบิดต่อความเร็วรอบนั้นเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นมอเตอร์ขับเคลื่อน นอกจากนั้นระบบควบคุมมอเตอร์ก็ไม่ซับซ้อน แต่เนื่องจากโครงสร้างที่ยังคงใช้แปรงถ่าน (Brush) กับคอมมูเตเตอร์ (Commutator) จึงทำให้มีปัญหาเกี่ยวกับการบำรุงรักษา ในปัจจุบันได้มีการพัฒนามอเตอร์ที่ไม่ใช้แปรงถ่านกับคอมมูเตเตอร์ ซึ่งมีข้อดีคือ มีประสิทธิภาพสูง, ความหนาแน่นเชิงกำลังที่สูง, ทนทาน, ง่ายต่อการบำรุงรักษา จึงเริ่มมีการใช้มอเตอร์แบบไม่ใช้แปรงถ่านกับคอมมูเตเตอร์ในงานขับเคลื่อนยานยนต์มากขึ้น เช่น Induction motor เป็นมอเตอร์แบบไม่ใช้แปรงถ่านกับคอมมูเตเตอร์ชนิดหนึ่งและใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์อย่างมากเพราะมีความทนทานและไม่ต้องการบำรุงรักษามากนัก และ Brushless DC motor ก็มีแนวโน้มว่าจะถูกนำมาใช้ขับเคลื่อนยานยนต์มากขึ้นเพราะการที่แม่เหล็กถาวรทำให้มีประสิทธิภาพที่สูง นอกจากนั้น Switched reluctance motor ก็มีความเป็นไปได้สูงที่จะนำมาใช้งานมากขึ้นเนื่องจากโครงสร้างที่ผลิตได้ง่ายและมีความทนทาน และในอุตสาหกรรมรถยนต์นั้นก็มีการเลือกใช้ชนิดของมอเตอร์แบบต่างๆ ดังตารางที่ 3-2 [19]

ตารางที่ 3-2 ชนิดของมอเตอร์ที่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้ารุ่นต่างๆ

HEV Model	Propulsion System
PSA Peugeot-Citroën / Berlingo (France)	DC Motor
Holden /ECOMmodore (Australia)	Switched Reluctance Motor
Nissan/Tino (Japan)	Brushed DC motor

ตารางที่ 3-2 ต่อ ชนิดของมอเตอร์ที่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้ารุ่นต่างๆ

HEV Model	Propulsion System
Honda/Insight (Japan)	Brushed DC motor
Toyota/Prius (Japan)	Brushed DC motor
Renault/Kangoo (France)	Induction Motor
Chevrolet/Silverado (USA)	Induction Motor
DaimlerChrysler/Durango (Germany/USA)	Induction Motor
BMW/X5 (Germany)	Induction Motor

การนำมอเตอร์มาใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์นั้นมอเตอร์จะต้องมีคุณสมบัติและสมรรถนะที่เหมาะสมกับการขับเคลื่อนยานยนต์ซึ่งมอเตอร์ที่นำมาใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ควรมีลักษณะดังนี้ [22]

- มีความหนาแน่นเชิงกำลังที่สูง
- มีแรงบิดที่สูงในขณะที่ความเร็วรอบต่ำเพื่อใช้ในการออกตัว และมีกำลังที่สูงพอในขณะความเร็วรอบสูง
- มีช่วงความเร็วที่ให้แรงบิดสูงสุด และช่วงความเร็วที่ให้กำลังสูงสุดกว้าง
- ตอบสนองต่อแรงบิดได้อย่างรวดเร็ว
- มีช่วงความเร็วและแรงบิดที่ให้ประสิทธิภาพสูงกว้าง
- มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานจากการหยุดรถกลับมาเก็บสูง
- มีความทนทานต่อสภาวะการทำงานต่างๆ
- มีราคาที่เหมาะสม

3.3.1.1 Brushed DC motor

ส่วนประกอบอย่างง่ายของ Brushed DC motor ประกอบไปด้วย แกนหมุน (Rotor) ซึ่งมีขดลวดไฟฟ้า (Armature) ซึ่งรับกระแสไฟฟ้าโดยคอมมิวเตเตอร์ที่ติดอยู่กับปลายของขดลวดและจะหมุนไปพร้อมกับชุดแกนหมุน โดยตัวคอมมิวเตเตอร์จะสัมผัสกับแปรงถ่านเพื่อรับกระแสไฟฟ้าจากแปรงถ่าน ที่ตัวโครงของมอเตอร์มีแม่เหล็กซึ่งยึดติดอยู่กับที่โดยจะใช้เป็นแม่เหล็กถาวร

(Permanent Magnet) หรือใช้แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) โดยใช้ไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดอีกชุดที่ยึดติดอยู่กับที่เรียกว่าสเตเตอร์ (Stator) ก็ได้

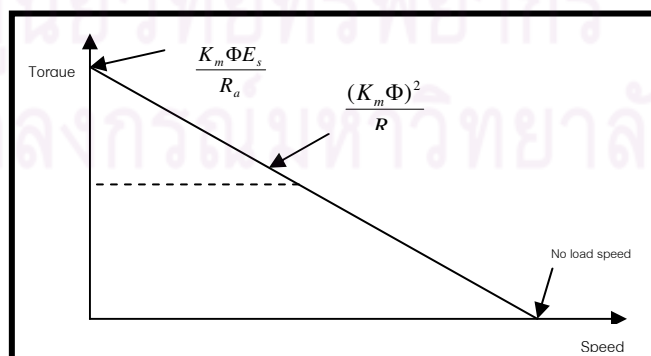
การทำงานโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขั้วไฟฟ้าของมอเตอร์ซึ่งขั้วไฟฟ้านี้ต่ออยู่กับแปลงถ่านและแปลงถ่านซึ่งสัมผัสอยู่กับคอมมิวเตเตอร์นั้นก็จะส่งกระแสไฟฟ้าผ่านต่อไปยังคอมมิวเตเตอร์และขดลวดในแกนหมุนต่อไป เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในขดลวดซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงผลักดันให้เกิดการเคลื่อนที่ของแกนหมุน ในการใช้งานนั้นหากมอเตอร์มีขดลวดเพียงชุดเดียวดังกล่าวนี้แรงบิดที่ได้นั้นจะไม่สม่ำเสมอจึงต้องมีขดลวดและคอมมิวเตเตอร์หลายชุดเพื่อให้มีแรงบิดที่ได้รับอย่างสม่ำเสมอ และในแต่ละชุดจะต้องมีขดลวดจำนวนหลายเส้นเพื่อให้มีแรงที่เกิดจากชุดขดลวดมากเพียงพอ

ลักษณะของแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์อธิบายได้โดยสมการ 3-1 [19] และรูปที่ 3-7 [23]

$$T_m = \frac{K_m \Phi E_s}{R_a} - \frac{(K_m \Phi)^2}{R_a} \omega \quad (3-1)$$

โดย

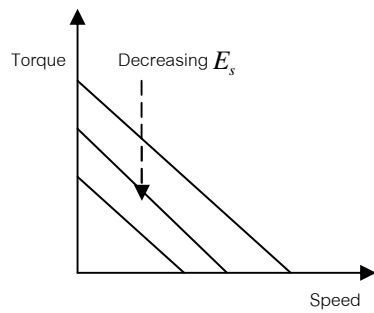
T_m	คือ	ค่าแรงบิดที่ได้จากมอเตอร์
K_m	คือ	ค่าคงที่ของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับจำนวนขดลวดและชุดขดลวด
E_s	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์
Φ	คือ	ค่าฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) ผ่านขดลวด
R_a	คือ	ความต้านทานภายในของมอเตอร์
ω	คือ	ความเร็วของมอเตอร์



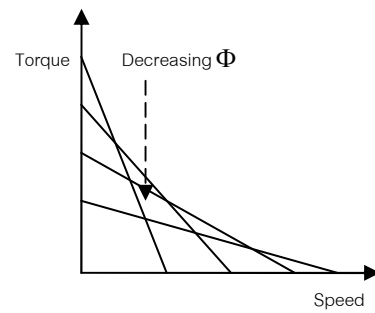
รูปที่ 3-7 ลักษณะแรงบิดและความเร็วมอเตอร์

จากการที่แกนหมุนหมุนผ่านสนามแม่เหล็กนั้นสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำขดลวดในแกน หมุนให้เกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back voltage) ขึ้นในขดลวดต้านกับแรงดันไฟฟ้าจาก แหล่งจ่ายทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านภายในขดลวดลดลงจึงส่งผลให้แรงบิดลดลง ซึ่งในรูปที่ 3-7 จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วเป็นศูนย์นั้นไม่มีการเคลื่อนที่ของขดลวดตัดกับสนามแม่เหล็กจึงไม่มี แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ กระแสไฟฟ้าจึงไหลผ่านขดลวดได้เต็มที่จึงเกิดแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วเป็น ศูนย์ ในขณะที่ความเร็วสูงสุดนั้นแกนหมุนหมุนผ่านสนามแม่เหล็กที่ความเร็วสูงจึงเกิด แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับมากซึ่งเท่ากับแรงดันจากแหล่งจ่ายจึงไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านภายใน ขดลวดจึงไม่มีแรงบิดเกิดขึ้นที่ความเร็วนี้ซึ่งเรียกว่าความเร็วเมื่อไม่มีภาระ (No load speed) แต่ ในมอเตอร์ขนาดใหญ่ที่ค่าแรงบิดสูงสุดจะไม่ใช่ไปดังสมการที่ 3-1 เพราะที่ความเร็วต่ำนั้น กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะถูกจำกัดจากระบบควบคุม, ความต้านทานภายในแบตเตอรี่ เป็นผลให้ได้ค่าแรงบิดที่ความเร็วต่ำนั้นถูกจำกัดดังแสดงโดยเส้นประในรูปที่ 3-7

จากสมการที่ 3-1 เห็นได้ว่าสามารถควบคุมการทำงานได้โดยการแปรเปลี่ยนค่า แรงดันไฟฟ้า (E_s) หรือโดยการแปรเปลี่ยนค่าฟลักซ์แม่เหล็ก (Φ) ซึ่งการแปรเปลี่ยนค่าฟลักซ์ แม่เหล็กนั้นทำได้เฉพาะมอเตอร์ที่เข้าแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการต่อวงจรของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้านั้น ทำได้ทั้งแบบอนุกรม (Series motor) หรือแบบขนาน (Shunt motor) ซึ่งสองแบบนี้ อาจทำให้การ ควบคุมได้ไม่สมบูรณ์นักจึงมีการใช้แบบที่มีการจ่ายไฟฟ้าแยกเป็นอิสระออกจากกันระหว่างการ จ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดในแกนหมุนกับการจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Separately excited motor) ซึ่งสามารถควบคุมมอเตอร์ได้อย่างยืดหยุ่น หากพิจารณาสมการที่ 3-1 พบว่า หากแปรเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้า (E_s) ผลคือค่าแรงบิดจะเปลี่ยนไปโดยที่ค่าความชันของเส้น แรงบิดต่อความเร็วเท่าเดิมดังรูปที่ 3-8 ก [23] แต่หากแปรเปลี่ยนค่าฟลักซ์แม่เหล็ก (Φ) ซึ่งก็คือ การแปรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้านั้นพบว่าค่าแรงบิดและค่าความชัน ของเส้นแรงบิดต่อความเร็วก็จะแปรเปลี่ยนไปด้วยดังรูปที่ 3-8 ข [23] อย่างไรก็ตามการใช้มอเตอร์ แบบใช้ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้านั้นต้องสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นการ ลดประสิทธิภาพของมอเตอร์ลงจากการใช้แบบแม่เหล็กถาวร แต่การใช้แบบขดลวด แม่เหล็กไฟฟ้านั้นสามารถควบคุมให้มอเตอร์ทำงานอยู่ในช่วงการทำงานที่มีประสิทธิภาพได้



(ก)

ผลของการแปรเปลี่ยนค่า E_s 

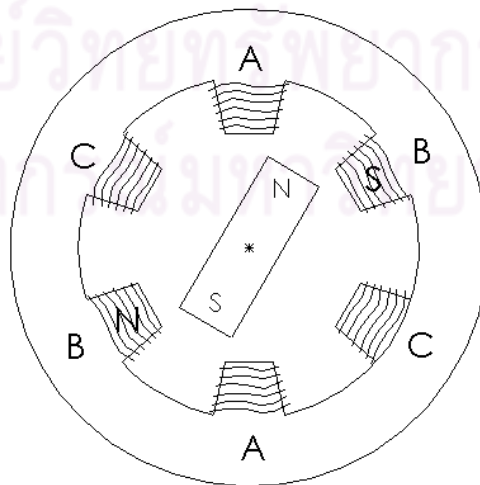
(ก)

ผลของการแปรเปลี่ยนค่า Φ

รูปที่ 3-8 ผลของการแปรเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้า (E_s) และฟลักซ์แม่เหล็ก (Φ)

3.3.1.2 Brushless DC motor

Brushless DC motor ใช้แกนหมุนเป็นแม่เหล็กถาวรและที่โครงของมอเตอร์จะมีขดลวดสเตเตอร์จำนวนหลายชุดทำหน้าที่เป็นขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการทำงานคือจะจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์เกิดเป็นสนามแม่เหล็กดึงดูดให้แกนหมุนซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรมาอยู่ในแนวของสนามแม่เหล็กของขดลวดที่จ่ายไฟฟ้าเข้าไป แล้วจึงสลับกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดชุดต่อไปอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการหมุนของแกนหมุนต่อไปอย่างต่อเนื่องตามการสลับกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดชุดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-9 [23]



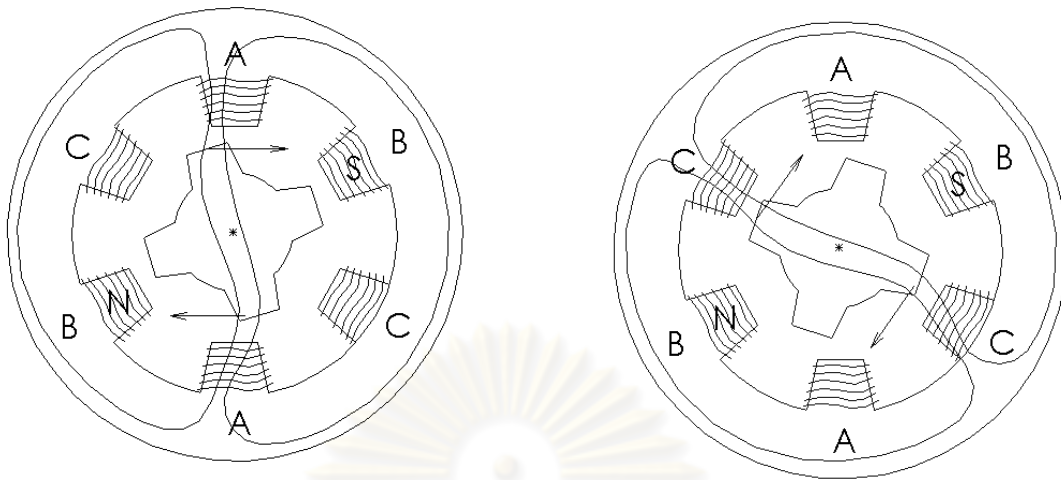
รูปที่ 3-9 มอเตอร์แบบ Brushless DC motor

กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Brushless DC motor แท้จริงแล้วเป็นกระแสสลับแต่แปลงมาจากแหล่งจ่ายที่เป็นกระแสตรง และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดจะต้องมีการสลับให้สอดคล้องกับตำแหน่งของแกนหมุนจึงต้องมีเซนเซอร์ (Sensor) สำหรับตรวจจับตำแหน่งของแกนหมุน ระบบควบคุมมอเตอร์แบบ Brushless DC motor จึงซับซ้อนกว่าระบบควบคุมมอเตอร์แบบ Brushed DC motor แต่สามารถควบคุมมอเตอร์ได้อย่างยืดหยุ่น โดยแรงบิดสามารถควบคุมโดยการแปรเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดและความเร็วนั้นก็ควบคุมได้โดยความถี่ของการสลับกระแสไฟฟ้า

ลักษณะของแรงบิดต่อความเร็วรอบมีลักษณะที่คล้ายกับของ Brushed DC motor และจากที่แกนหมุนเป็นแม่เหล็กถาวรเมื่อทำงานที่ความเร็วสูงจึงมีแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back voltage) เช่นเดียวกับ Brushed DC motor แต่จากที่การทำงานโดยไม่ต้องใช้แปลงถ่านนั้นจึงไม่มีการสูญเสียในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าระหว่างแปลงถ่านกับคอมมูเตเตอร์และใช้แกนหมุนเป็นแม่เหล็กถาวรจึงไม่มีการสูญเสียจากการเหนี่ยวนำในแกนหมุน Brushless DC motor จึงมีประสิทธิภาพดีและมีความทนทาน แต่มีราคาแพงจากการที่ต้องใช้แกนหมุนเป็นแม่เหล็กที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูง รวมถึงระบบควบคุมที่ซับซ้อน

3.3.1.3 Switched reluctance motor

ที่โครงมอเตอร์ใช้ขดลวดสเตเตอร์เป็นขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับ Brushless DC motor แต่ที่แกนหมุนใช้เป็นแกนเหล็กอ่อนแทนแม่เหล็กถาวร การทำงานอาศัยหลักการที่ว่าแกนเหล็กอ่อนจะพยายามเคลื่อนมาอยู่ในตำแหน่งที่มีความต้านทานของแม่เหล็ก (Reluctance) น้อยที่สุด การทำงานโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์ในชุดหนึ่งก่อนทำให้เกิดสนามแม่เหล็กตัดผ่านแกนเหล็กอ่อน จึงทำให้แกนเหล็กอ่อนเคลื่อนมาอยู่ในแนวของขดลวดสเตเตอร์ที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความต้านทานของแม่เหล็กน้อยที่สุด จากนั้นจะสลับกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดชุดต่อไป แกนหมุนจึงหมุนไปยังตำแหน่งใหม่ที่มีความต้านทานของแม่เหล็กน้อยที่สุดอย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 3-10 [23]



รูปที่ 3-10 มอเตอร์แบบ Switched reluctance motor

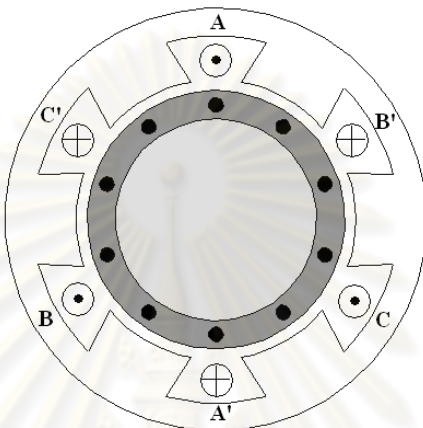
การควบคุมมอเตอร์นั้นต้องใช้เซนเซอร์ในการจับตำแหน่งของแกนหมุนเช่นเดียวกับ Brushless DC motor และต้องสลับการจ่ายไฟฟ้าไปยังขดลวดแต่ละชุดให้สอดคล้องกับการหมุนของแกนหมุน แต่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไม่ได้เป็นกระแสสลับแต่เป็นกระแสตรงแบบเปิด/ปิด ซึ่งควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการเปิด/ปิดกระแสไฟฟ้าในแต่ละครั้ง

แกนหมุนของมอเตอร์เป็นแกนเหล็กอ่อนจึงไม่มีแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back voltage) ช่วยให้สามารถทำงานที่ความเร็วสูงกว่าชนิดอื่น และมีความทนทานเนื่องจากโครงสร้างที่ง่ายของมอเตอร์ โดยทั่วไปแล้วจะมีประสิทธิภาพสูงสุดน้อยกว่าชนิดอื่นแต่การทำงานมีช่วงของประสิทธิภาพสูงกว้างและจากการที่ใช้แกนหมุนของมอเตอร์เป็นแกนเหล็กอ่อน (ไม่ใช่แม่เหล็กถาวร) จึงสามารถผลิตได้ง่ายและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ

3.3.1.4 Induction motor

Induction motor เป็นมอเตอร์ที่มีใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมและมีขนาดที่หลากหลายให้เลือกใช้มาก รูปที่ 3-11 [23] แสดงโครงสร้างของมอเตอร์ประกอบไปด้วยขดลวดสเตเตอร์แบบ สามเฟส (3 Phase) ที่ทำงานเป็นขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้ายึดติดกับโครงของมอเตอร์ และแกนหมุนของมอเตอร์ประกอบไปด้วยแท่งตัวนำซึ่งบรรจุอยู่ในแกนเหล็กอ่อนโดยเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองของแต่ละแท่งเข้าด้วยกัน การทำงานโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้กับ

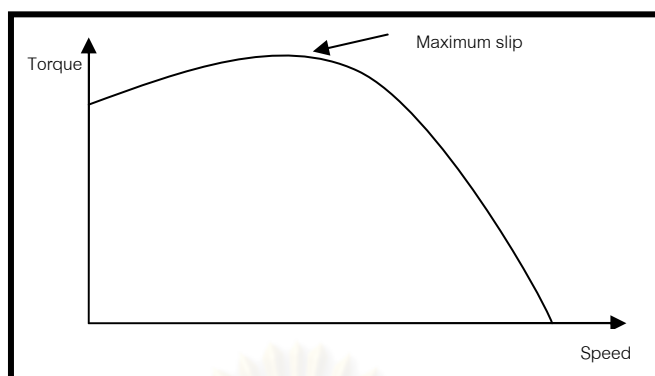
ขดลวดสเตเตอร์ ทำให้เกิดเสมือนว่ามีสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่หมุนอยู่โดยรอบแกนหมุน เกิดการตัดกันระหว่างสนามแม่เหล็กกับแท่งตัวนำ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในแท่งตัวนำของแกนหมุนและเกิดแรงผลักดันให้เกิดการหมุนในลักษณะที่เหมือนกับว่าแกนหมุนเคลื่อนที่ตามการหมุนของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3-11 มอเตอร์แบบ Induction motor

เมื่อแกนหมุนหมุนจนมีความเร็วเข้าใกล้กับความเร็วของสนามแม่เหล็กจะไม่มี การตัดกันของสนามแม่เหล็กกับแท่งตัวนำจึงไม่เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำ ที่ความเร็วนี้จึงไม่มีแรงบิดเกิดขึ้น ลักษณะของแรงบิดต่อความเร็วแสดงในรูปที่ 3-12 แรงบิดจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วจนถึงจุดที่มีความแตกต่างของความเร็วการหมุนของสนามแม่เหล็กกับแกนหมุนแตกต่างกันมากที่สุดจากนั้นแรงบิดก็จะลดลง การใช้งานนั้นความเร็วการหมุนของสนามแม่เหล็กจะเร็วกว่าแกนหมุนเล็กน้อยจึงสามารถควบคุมได้โดยการปรับความเร็วการหมุนของสนามแม่เหล็กซึ่งปรับได้โดยการปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้า และสามารถควบคุมแรงบิดโดยปรับความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยปรับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด

จากการที่เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าในแกนหมุน จึงมีการสูญเสียพลังงานไปในส่วนนี้ ประสิทธิภาพจึงต่ำกว่า Brushless DC motor และ Switched reluctance motor อยู่เล็กน้อย



รูปที่ 3-12 มอเตอร์แบบ Induction motor

3.3.1.5 ประสิทธิภาพของมอเตอร์

ข้อพิจารณาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของมอเตอร์นั้นนอกจากจะมองว่าจะใช้มอเตอร์ชนิดใดแล้ว ยังมีส่วนที่สำคัญกว่าที่ควรพิจารณาเพราะว่าประสิทธิภาพของมอเตอร์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายส่วนดังนี้

- มอเตอร์ที่มีขนาดกำลังมากกว่าจะมีประสิทธิภาพดีกว่ามอเตอร์ที่มีขนาดกำลังน้อย
- มอเตอร์ความเร็วสูงจะมีประสิทธิภาพดีกว่ามอเตอร์ที่ทำงานในความเร็วต่ำ เนื่องจากมอเตอร์ที่ความเร็วต่ำจะต้องใช้แรงบิดมากกว่าเพื่อให้ได้กำลังที่เท่ากันและการสูญเสียพลังงานนั้นจะแปรตามแรงบิดของมอเตอร์มากกว่าความเร็ว
- การระบายความร้อนของมอเตอร์ที่ดีมีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ดีขึ้นเนื่องจากความต้านทานของขดลวดภายในมอเตอร์จะแปรตามอุณหภูมิ
- ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะมีค่าสูงสุดที่ช่วงความเร็วหนึ่งเท่านั้นหากให้มอเตอร์ทำงานในช่วงที่ต่างออกไปก็จะมีประสิทธิภาพลดลง

นอกจากข้อพิจารณาเกี่ยวกับประสิทธิภาพแล้วยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นอีกเช่น รูปทรง น้ำหนักและราคา ที่ต้องเลือกให้เหมาะสมกับงาน

3.3.2 แบตเตอรี่

การเลือกใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานให้กับระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้านั้น จำเป็นที่จะต้องมีความเข้าใจถึงการทำงานและคุณลักษณะต่างๆ ของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ เพื่อที่จะสามารถกำหนดชนิดและขนาดของแบตเตอรี่ที่จะนำมาใช้งานได้อย่างเหมาะสม โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงค่าตัวแปรลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่ที่สำคัญ และการทำงานของแบตเตอรี่รวมถึงการจำลองแบตเตอรี่ โดยพิจารณาเฉพาะกรณีของแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่วเพื่อทำความเข้าใจเบื้องต้น

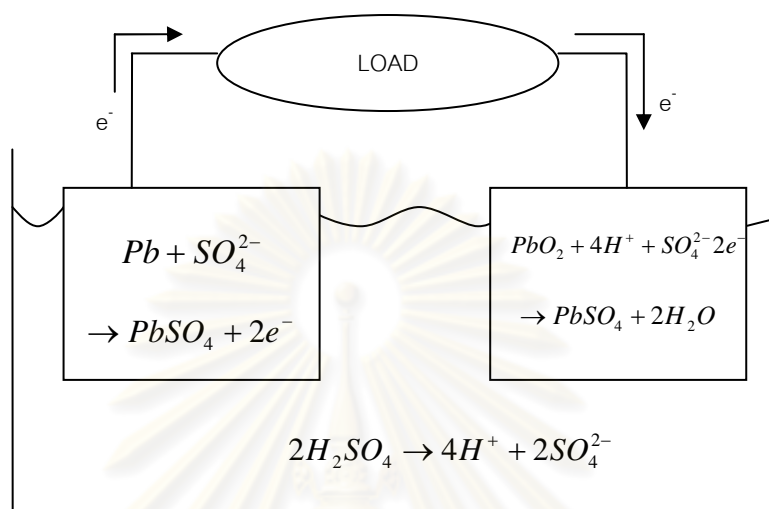
3.3.2.1 การทำงานของแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่ว

ส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ประกอบด้วยเซลล์ย่อยหลายเซลล์ซึ่งแต่ละเซลล์ประกอบไปด้วยแผ่นอิเล็กโทรดบวก (Positive Electrode) และแผ่นอิเล็กโทรดลบ (Negative Electrode) โดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา โดยจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อสร้างเป็นพลังงานไฟฟ้า

แบตเตอรี่ในแต่ละชนิดจะมีแผ่นอิเล็กโทรดและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แตกต่างกันไปตามชนิดของแบตเตอรี่ชนิดนั้น แต่หลักการทำงานโดยพื้นฐานมีลักษณะที่เหมือนกัน โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดน้ำกรด-ตะกั่ว (Lead-acid) เพื่อทำความเข้าใจการทำงานของแบตเตอรี่

แผ่นอิเล็กโทรดลบของแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่วทำด้วยแผ่นตะกั่ว (Pb) ที่มีลักษณะพรุน ส่วนแผ่นอิเล็กโทรดบวกทำด้วยแผ่นตะกั่วไดออกไซด์ (PbO_2) โดยแผ่นทั้งสองจะแช่อยู่ในน้ำกรดกำมะถัน (Sulphuric acid, H_2SO_4) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยส่วนประกอบแสดงในรูปที่ 3-13 เมื่อมีการต่อขั้วไฟฟ้าทั้งสองเข้ากับภาระ สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะแตกตัวได้ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) และไฮโดรเจนไอออน (H^+) โดยซัลเฟตไอออนจะทำปฏิกิริยากับแผ่นอิเล็กโทรดลบได้เป็นตะกั่วซัลเฟต (Lead sulphate, $PbSO_4$) และได้อิเล็กตรอนวิ่งผ่านตัวนำและภาระไปยังแผ่นอิเล็กโทรดบวก และที่แผ่นอิเล็กโทรดบวก ตะกั่วไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนและอิเล็กตรอนได้เป็นตะกั่วซัลเฟต และน้ำ เมื่อเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ได้น้ำจากการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นจึงทำให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์มีความเข้มข้นลดลง นอกจากนั้นที่แผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองจะเกิดเป็นตะกั่วซัลเฟตมากขึ้น และเมื่อถึงจุดหนึ่งที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์มีความเข้มข้นน้อยและเกิดตะกั่วซัลเฟตที่แผ่นอิเล็กโทรดมาก การเกิดปฏิกิริยาจะหยุดลงซึ่งหมายถึงแบตเตอรี่หมดพลังงาน ซึ่งสามารถประจุไฟฟ้าใหม่ได้โดยง่าย

กระแสไฟฟ้าย้อนกลับให้กับแบตเตอรี่ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีย้อนกลับแบตเตอรี่จึงสามารถจ่ายพลังงานต่อไปได้



รูปที่ 3-13 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่ว

3.3.2.2 ความจุแบตเตอรี่

โดยทั่วไปนั้นการบอกความจุของแบตเตอรี่ (Capacity) จะบอกเป็นหน่วย แอมแปร์-ชั่วโมง (Amp-Hour) และอัตราการจ่ายไฟฟ้าของความจุที่ระบุ เช่นแบตเตอรี่ขนาด 10 แอมแปร์-ชั่วโมงที่อัตรา 10 ชั่วโมง จะหมายถึงแบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 1 แอมแปร์ ในช่วงเวลา 10 ชั่วโมง โดยหากแบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้ามากกว่า 1 แอมแปร์ เช่นจ่ายไฟฟ้า 10 แอมแปร์ แบตเตอรี่จะไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ถึง 1 ชั่วโมง หรือในทางตรงกันข้ามหากแบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 1 แอมแปร์ เช่นจ่ายไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า 20 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความจุของแบตเตอรี่นั้นขึ้นอยู่กับอัตราการจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยหากแบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้ามากจะทำให้ได้ความจุของแบตเตอรี่มีค่าน้อย หรือหากแบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าน้อยจะทำให้ได้ความจุของแบตเตอรี่มาก

3.3.2.3 ความหนาแน่นเชิงพลังงาน พลังงานจำเพาะ และกำลังจำเพาะ

ความหนาแน่นเชิงพลังงาน (Energy density) เป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานไฟฟ้าที่เก็บในแบตเตอรี่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานจำเพาะ (Specific energy) เป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานไฟฟ้าที่เก็บในแบตเตอรี่ต่อหนึ่งหน่วยมวลโดยค่าทั้งสองนั้นเป็นค่าที่ช่วยในการประมาณน้ำหนักและปริมาตรของแบตเตอรี่ที่เชื่อว่ามีความหนาแน่นและน้ำหนักเหมาะสมเพียงใด อย่างไรก็ตามพลังงานสะสมของแบตเตอรี่นั้นยังขึ้นอยู่กับอัตราการจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยเช่นกัน

ค่ากำลังจำเพาะ (Specific power) แสดงถึงความสามารถในการให้กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ต่อหนึ่งหน่วยมวลโดยกำลังที่ได้จากแบตเตอรี่นั้นจะแปรเปลี่ยนขึ้นอยู่กับภาระที่นำมาต่อกับแบตเตอรี่แต่อาจถูกจำกัดโดยการจำกัดค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อป้องกันแบตเตอรี่เสียหาย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแบตเตอรี่ที่ทำงานที่พลังงานจำเพาะสูงจะมีกำลังจำเพาะที่ต่ำ หรือหากแบตเตอรี่ทำงานที่กำลังจำเพาะสูงก็จะได้พลังงานจำเพาะที่ต่ำ

3.3.2.4 ประสิทธิภาพการประจุ

พลังงานไฟฟ้าที่ให้แก่แบตเตอรี่ในการประจุนั้น แบตเตอรี่ไม่สามารถนำมาเก็บได้ทั้งหมด แต่จะขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ อุณหภูมิ อัตราการประจุ และระดับการประจุ (State of charge) เช่นในขณะที่แบตเตอรี่มีระดับการประจุอยู่ที่ระหว่าง 20-80% ประสิทธิภาพการประจุจะมีค่าใกล้เคียงกับ 100% แต่หากระดับการประจุอยู่ในช่วงที่แบตเตอรี่ใกล้เต็ม ประสิทธิภาพจะต่ำลงเนื่องจากในช่วงนี้แต่ละเซลล์ของแบตเตอรี่อาจประจุเต็มไม่พร้อมกัน ซึ่งในเซลล์ที่เต็มแล้วก็ยังคงมีกระแสไหลเข้าไปประจุอยู่ทำให้สูญเสียพลังงานไปจากการประจุเกินที่เซลล์ดังกล่าวนั้น ในขณะที่ยังคงต้องทำการประจุอยู่เนื่องจากบางเซลล์ยังมีการประจุไม่เต็ม

3.3.2.5 อัตราการคายประจุไฟฟ้าในตัวเอง

แบตเตอรี่หากถูกเก็บไว้นานโดยไม่ได้ใช้งานจะเกิดการคายประจุไฟฟ้าในตัวเอง (Self discharge rate) โดยการเกิดปฏิกิริยาภายในของแผ่นอิเล็กโทรดกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่นในแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่ว ที่แผ่นตะกั่วและแผ่นตะกั่วไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดกำมะถันโดยตรงทำให้เกิดตะกั่วซัลเฟตขึ้นที่แผ่นทั้งสองและได้ก๊าซไฮโดรเจน ออกซิเจน และน้ำ ซึ่ง

ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้สูญเสียระดับการประจุไป โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ และอุณหภูมิโดยยิ่งอุณหภูมิสูงจะทำให้อัตราการคายประจุไฟฟ้าในตัวเองสูง

3.3.2.6 การเลือกใช้งานแบตเตอรี่

นอกจากแบตเตอรี่ชนิดน้ำกรด-ตะกั่วแล้วยังมีแบตเตอรี่อยู่อีกหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดนั้นมีข้อได้เปรียบและข้อจำกัดแตกต่างกันออกไป โดยแบตเตอรี่ชนิดน้ำกรด-ตะกั่ว มีข้อดีคือราคาถูก เนื่องจากวัสดุที่ใช้ผลิตหาได้ง่ายและมีราคาถูก รวมถึงมีขนาดความจุหลากหลายให้เลือกใช้มาก แต่ก็มีข้อจำกัดคือมีอายุการใช้งานที่น้อยและต้องใช้เวลาในการประจุนรวมทั้งยังต้องมีการบำรุงรักษาโดยการเติมน้ำกลั่นให้กับแบตเตอรี่ตลอดอายุการใช้งาน โดยต่อมาจึงมีการพัฒนาแบตเตอรี่น้ำกรด-ตะกั่วแบบผนึก (Sealed lead-acid battery) ซึ่งมีอายุการใช้งานที่นานขึ้นและไม่ต้องมีการบำรุงรักษา นอกจากนี้มีแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม (Nickel Cadmium battery) ซึ่งมีข้อดีคือมีพลังงานจำเพาะสูงกว่าแบตเตอรี่น้ำกรด-ตะกั่วมาก มีกำลังจำเพาะสูง อายุการใช้งานที่นาน สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง และมีการคายประจุในตัวเองน้อย แต่ยังคงมีราคาแพงมากเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่น้ำกรด-ตะกั่ว ต่อมาได้มีแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ (Nickel Metal Hydride battery) ซึ่งมีข้อดีคือ มีพลังงานจำเพาะและกำลังจำเพาะสูงกว่าแบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม สามารถประจุพลังงานได้ภายในเวลาน้อย และอายุการใช้งานที่นาน แต่ก็มีข้อจำกัดที่มีอัตราการคายประจุในตัวเองมาก และมีราคาที่สูง

แบตเตอรี่อีกชนิดหนึ่งคือแบตเตอรี่ลิเทียม (Lithium battery) ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่มีพลังงานจำเพาะและกำลังจำเพาะที่สูงมาก มีอัตราการคายประจุในตัวเองน้อยมากและมีอายุการใช้งานที่นาน แบตเตอรี่ลิเทียมมีอยู่ด้วยกันสองชนิดคือแบตเตอรี่ลิเทียม-โพลีเมอร์ (Lithium Polymer battery) และลิเทียม-ไอออน (Lithium ion battery) ใช้แพร่หลายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่ในพิกัดความจุพลังงานที่สูงมากนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลายและมีราคาแพงมาก จึงยังไม่เป็นที่แพร่หลายในงานขับเคลื่อนยานยนต์

แบตเตอรี่อีกชนิดหนึ่งคือแบตเตอรี่อะลูมิเนียม-แอร์ (Aluminium-Air) ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้ากลับคือเพื่อประจุไฟฟ้าได้แต่ใช้การถอดเปลี่ยนแผ่นอิเล็กโทรดซึ่งเป็นแผ่นอะลูมิเนียม เป็นแบตเตอรี่ที่มีพลังงานจำเพาะสูง แต่มีกำลังจำเพาะต่ำมากจึงไม่เหมาะกับการใช้ในยานยนต์ ต่อมาจึงมีการใช้แบตเตอรี่ชนิดซิงค์-แอร์ (Zinc-Air) ซึ่งมีสมรรถนะโดยรวมสูงกว่าชนิดอะลูมิเนียม-แอร์ โดยเฉพาะในด้านกำลังจำเพาะมีค่าสูงกว่าแบตเตอรี่อะลูมิเนียม-แอร์ มาก การทำงานของแบตเตอรี่ชนิดซิงค์-แอร์ เหมือนกันกับแบตเตอรี่ชนิดอะลูมิเนียม-แอร์ แต่ใช้แผ่น

อิเล็กโทรดลบเป็นแผ่นสังกะสีแทนแผ่นอะลูมิเนียม และการประจุนอกจากจะต้องเปลี่ยนแผ่นอิเล็กโทรดลบแล้วยังต้องเปลี่ยนสารอิเล็กโทรไลต์ ด้วย จากการใช้การเปลี่ยนแผ่นอิเล็กโทรดและสารอิเล็กโทรไลต์ ดังกล่าวจึงช่วยให้ลดปัญหาเรื่องเวลาในการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ไปได้ จึงอาจเป็นแหล่งพลังงานอีกทางหนึ่งที่จะนำมาใช้ในยานยนต์ แต่ในปัจจุบันยังไม่เป็นที่แพร่หลาย

การเลือกใช้แบตเตอรี่นั้นจะต้องคำนึงถึงขนาดความจุให้เหมาะสมกับภาระที่ใช้รวมถึงขนาดและน้ำหนักของแบตเตอรี่ที่เชื่อว่าจะมีความเหมาะสมหรือไม่ และต้องคำนึงถึงราคาและอายุการใช้งานโดยเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายโดยรวมตลอดอายุการใช้งาน โดยตารางที่ 3-3 [23] เปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่แต่ละชนิด

ตารางที่ 3-3 ลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่แต่ละชนิด

Parameter	Lead acid	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion	Al-air	Zn-air
Specific energy	20-35 Wh/kg	40-55 Wh/kg	~65 Wh/kg	90 Wh/kg	225 Wh/kg	230 Wh/kg
Energy density	54-95 Wh/L	70-90 Wh/L	~150 Wh/L	153 Wh/L	195 Wh/L	270 Wh/L
Specific power	~ 250 W/kg	~ 125 W/kg	200 W/kg	300 W/kg	10 W/kg	~ 105 W/kg
Nominal cell voltage	2 V	1.2 V	1.2 V	3.5 V	1.4 V	1.2 V
Charge efficiency	~ 80%	Good	Good	Very good	-	-
Internal resistance	0.022 / 1 Ah cell	0.06 / 1 Ah cell	0.06 / 1 Ah cell	Very low	High	Medium
Commercially	available	Small size	Small size	Small size	Stationary system	Very few
Operating temperature	Ambient	-40°C - 80°C	Ambient	-40°C - 80°C	Ambient	-Ambient
Self discharge	~ 2% / day	~ 0.5% / day	~ 5% / day	~ 10% / month	Very high	High
Number of life cycles	> 800 at 80%	1200 at 80%	1000 at 80%	> 1000	> 1000	> 2000
Recharge time	8 h	1 h	1 h	2-3 h	10 min (replacing fuel)	10 min (replacing fuel)

3.3.2.7 แบบจำลองแบตเตอรี่

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของแบตเตอรี่น้ำกรด-ตะกั่วและรูปแบบการจำลองแบตเตอรี่ที่ใช้ในการประเมินระบบขับเคลื่อนเบื้องต้น แบบจำลองที่ใช้ในหัวข้อนี้ อ้างอิงจาก Larminie และ Lowry [23] อย่างไรก็ตาม บทที่ 5 ได้แสดงการศึกษาเพิ่มเติมของ

แบบจำลองของแบตเตอรี่ รวมถึงการพัฒนาแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่ให้ผลการจำลองที่แม่นยำมากขึ้น

จากหัวข้อที่ 3.3.2.2 แสดงให้เห็นว่าความจุของแบตเตอรี่นั้นแปรตามอัตราการจ่ายกระแสไฟฟ้า ดังนั้นความจุของแบตเตอรี่จะต้องระบุว่าเป็นความจุในช่วงเวลาการจ่ายไฟฟ้าเท่าไร ดังนั้นในการกำหนดความจุของแบตเตอรี่จึงใช้ค่า Peukert Capacity ในการอ้างถึงความจุของแบตเตอรี่ดังสมการที่ 3-2

$$C_p = I^{k_p} T \quad (3-2)$$

โดย

C_p	คือ	Peukert Capacity (แอมแปร์-ชั่วโมง)
k_p	คือ	Peukert Coefficient
I	คือ	กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (แอมแปร์)
T	คือ	เวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้า (ชั่วโมง)

ตัวแปรที่จะบอกถึงระดับพลังงานในแบตเตอรี่นั้นแสดงได้โดยค่าระดับการประจุ (State of charge) ดังสมการที่ 3-3 ซึ่งจะบอกถึงระดับพลังงานในแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่โดยมากจะบอกเป็นร้อยละเทียบกับความจุ หรือบอกถึงระดับพลังงานโดยค่าความลึกการคายประจุ (Depth of discharge) ดังสมการที่ 3-4

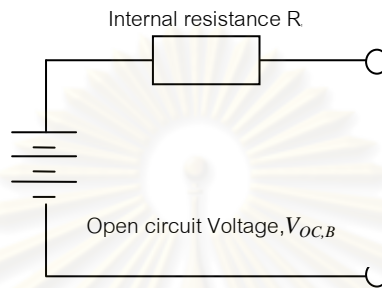
$$SOC = 1 - \frac{\int_{t_0}^t I^{k_p} dt}{C_p} \quad (3-3)$$

$$DOD = \frac{\int_{t_0,B}^t I^{k_p} dt}{3600 C_p} \quad (3-4)$$

โดย

SOC	คือ	ค่าระดับการจุ (State of charge)
DOD	คือ	ค่าความลึกการคายประจุ (Depth of discharge)
t	คือ	เวลา (วินาที)
$t_{0,B}$	คือ	เวลาเริ่มต้นขณะที่แบตเตอรี่มีประจุเต็ม

การจำลองการทำงานของแบตเตอรี่ทำได้โดยใช้วงจรไฟฟ้าเทียบเท่า (Equivalent circuit) ดังรูปที่ 3-14 โดยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเทียบได้กับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเปิดวงจร (Open circuit Voltage, $V_{OC,B}$) ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับค่าความลึกการคายประจุตั้งสมการที่ 3-5 ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่ว



รูปที่ 3-14 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของแบตเตอรี่

$$V_{OC,B} = n_{cell,B} [2.15 - DOD(2.15 - 2)] \quad (3-5)$$

โดย

$V_{OC,B}$ คือ แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเปิดวงจร (โวลต์)

$n_{cell,B}$ คือ จำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่

ความต้านทานภายในแบตเตอรี่ (Internal resistance) ในแบบจำลองแบบเชิงเส้นนั้นจะกำหนดให้ความต้านทานภายใน ขึ้นอยู่กับขนาดความจุของแบตเตอรี่และจำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่ตั้งสมการที่ 3-6

$$R_{i,B} = r_{i,B} \frac{n_{cell,B}}{C_{10}} \quad (3-6)$$

โดย

$R_{i,B}$ คือ ความต้านทานภายใน (โอห์ม)

$r_{i,B}$ คือ ความต้านทานภายในต่อเซลล์ที่ 1 แอมแปร์-ชั่วโมง (โอห์ม)

C_{10} คือ ความจุของแบตเตอรี่ที่การจ่ายไฟฟ้า 10 ชั่วโมง (แอมแปร์-ชั่วโมง)

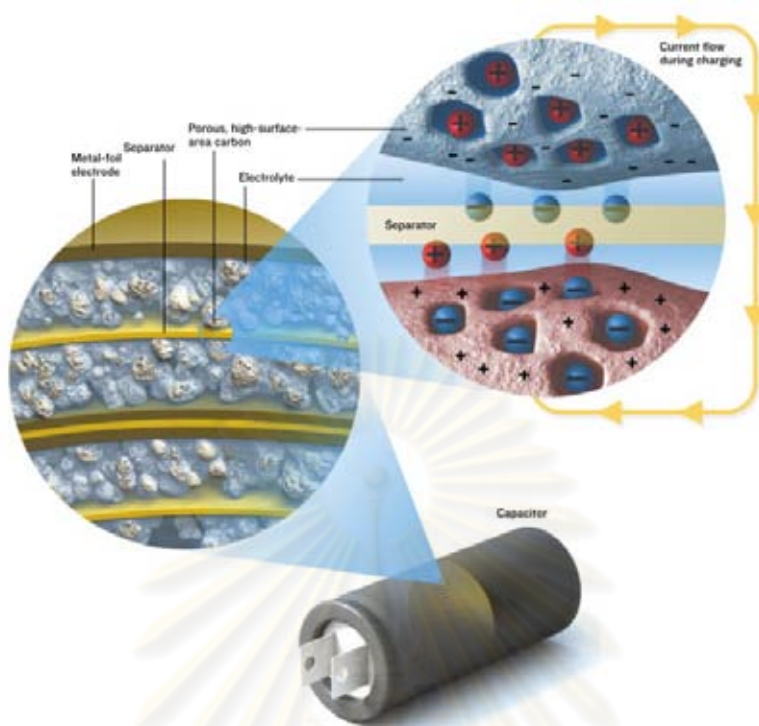
ความต้านทานภายในแบตเตอรี่ ในแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นนั้นความต้านทานภายใน นอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดความจุของแบตเตอรี่และจำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่แล้วยังขึ้นอยู่กับค่า ความลึกการคายประจุ และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายด้วยดังสมการที่ 3-7

$$R_{i,B} = r_{i,B}(DOD, I) \frac{n_{cell,B}}{C_{10}} \quad (3-7)$$

3.3.3 ชุดเก็บประจุความจุสูง

ชุดเก็บประจุความจุสูงสามารถใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแหล่งจ่ายอื่นให้กับ ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า เพื่อทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าค่าสูงในช่วงเวลาสั้น หรือใช้รองรับ พลังงานสูญเสียจากการหยุดรถได้อย่างดี เนื่องจากชุดเก็บประจุความจุสูงมีประสิทธิภาพในการ ประจุและคายประจุที่ดีและมีค่ากำลังจำเพาะที่สูงดังรูปที่ 3-3 แต่ไม่สามารถใช้ชุดเก็บประจุความ จุสูงเป็นแหล่งจ่ายได้เพียงลำพังเนื่องจากมีค่าพลังงานจำเพาะที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับแหล่งจ่ายอื่น ดังนั้นการใช้งานชุดเก็บประจุความจุสูงจึงใช้ในรูปแบบไฮบริดร่วมกับแหล่งจ่ายอื่นเพื่อรองรับภาระ ค่าสูงในช่วงเวลาสั้น ซึ่งแหล่งจ่ายอื่นไม่สามารถจ่ายพลังงานได้เพียงพอ

หลักการทำงานพื้นฐานของของชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นไม่แตกต่างกับตัวเก็บประจุ ขนาดเล็กในวงจรอิเล็กทรอนิกส์คือใช้การแยกประจุบวกและลบออกจากกันในการเก็บพลังงาน แต่ ชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นจะมีโครงสร้างภายในที่ต่างออกไปดังรูปที่ 3-15 [24] ซึ่งใช้วัสดุคาร์บอน พูนเป็นอิเล็กโทรดแช่อยู่ในสารอิเล็กโทรไลต์ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อชาร์จให้แก่อุปกรณ์ ประจุความจุสูง ประจุบวกและลบจะถูกแยกออกจากกันที่ผิวระหว่างวัสดุคาร์บอนพูนกับสาร อิเล็กโทรไลต์ และด้วยความพูนของวัสดุคาร์บอนนี้จึงทำให้มีพื้นที่ผิวมากจึงสามารถเก็บพลังงาน ได้มากกว่าตัวเก็บประจุชนิดอื่น

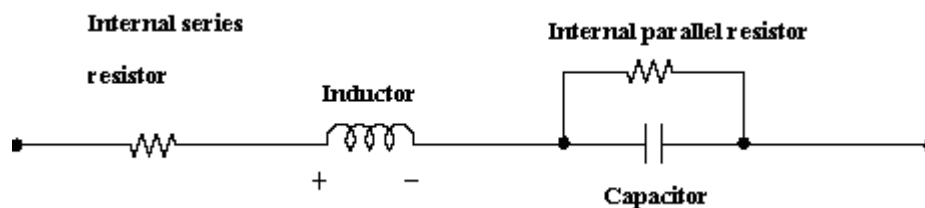


รูปที่ 3-15 การทำงานของซูดเก็บประจุความจุสูง

3.3.3.1 แบบจำลองซูดเก็บประจุความจุสูง

แบบจำลองที่ใช้ในหัวข้อนี้ได้อ้างอิงจาก Ehsani และคณะ [25] ซึ่งจะนำมาใช้ในการประเมินระบบขับเคลื่อนเบื้องต้นในบทที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในนั้นใช้ค่าที่กำหนดจากผู้ผลิต อย่างไรก็ตามในบทที่ 5 ได้แสดงการพัฒนาแบบจำลองเชิงประจักษ์ซึ่งให้ผลการทำนายที่แม่นยำมากขึ้น

แบบจำลองของซูดเก็บประจุความจุสูงนั้นจะใช้วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าดังรูปที่ 3-16 ซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานภายในแบบอนุกรม (Internal series resistance) ซึ่งเทียบได้กับการลดลงของแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายพลังงาน และตัวเหนี่ยวนำ (Inductance) ซึ่งมีผลต้านทานสูงก็เมื่อต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าสูง และความต้านทานภายในแบบขนาน (Internal parallel resistance) ซึ่งเทียบได้กับการสูญเสียจากการคายประจุในตัวเอง (Self-discharge)



รูปที่ 3-16 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของชุดเก็บประจุความจุสูง

วงจรในรูปที่ 3-16 สามารถถูกนำมาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชุดเก็บประจุความจุสูงได้ดังสมการที่ 3-8

$$V_{SC} = n_{series,SC} \left[R_{s,SC} \frac{I}{n_{parallel,SC}} + L_{SC} \frac{d(I/n_{parallel,SC})}{dt} + \frac{1}{C_{SC}} \int \left(\frac{I}{n_{parallel,SC}} - \frac{V_{SC}}{R_{p,SC} n_{series,SC}} + \frac{R_{s,SC}}{R_{p,SC}} \frac{I}{n_{parallel,SC}} + \frac{L_{SC}}{R_{p,SC}} \frac{d(I/n_{parallel,SC})}{dt} \right) dt \right] \quad (3-8)$$

โดย

V_{SC}	คือ	แรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง (โวลต์)
I	คือ	กระแสไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง (แอมแปร์)
$n_{parallel,SC}$	คือ	จำนวนการต่อขนานของชุดเก็บประจุความจุสูง
$n_{series,SC}$	คือ	จำนวนการต่ออนุกรมของชุดเก็บประจุความจุสูง
$R_{s,SC}$	คือ	ความต้านทานภายในแบบอนุกรม (โอห์ม)
$R_{p,SC}$	คือ	ความต้านทานภายในแบบขนาน (โอห์ม)
L_{SC}	คือ	ความเหนี่ยวนำ (โอห์ม)
C_{SC}	คือ	ความจุของชุดเก็บประจุความจุสูงหนึ่งเซลล์ (ฟารัด)

การจำลองแบบชุดเก็บประจุความจุสูงที่ใช้งานในช่วงเวลาสั้น (Short term) นั้นโดยมากจะไม่นำผลของค่าความต้านทานภายในแบบขนานมาคำนวณเนื่องจากมีผลต่อการคำนวณน้อย และหากไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้ามากก็จะไม่นำผลของค่าความเหนี่ยวนำมาคำนวณ

จากการที่ชุดเก็บประจุความจุสูงมีแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์น้อยโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ประมาณ 2.7 โวลต์ การใช้งานนั้นจึงต้องนำชุดเก็บประจุความจุสูงหลายเซลล์มาเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้เพียงพอแต่การต่อแบบอนุกรมจะทำให้ค่าความจุรวมลดลงตามจำนวนการเชื่อมต่อ แต่การเพิ่มขึ้นของระดับพลังงานจากการเชื่อมต่อแบบอนุกรมนั้นแปรตามแรงดันไฟฟ้าวรวมยกกำลังสองดังสมการที่ 3-9 ดังนั้นการใช้งานชุดเก็บประจุความจุสูงโดยมากจะนำมาเชื่อมต่อแบบอนุกรมมากกว่าการเชื่อมต่อแบบขนาน

$$E_{SC} = \frac{1}{2} \left(\frac{C}{n_{series,SC}} n_{parallel,SC} \right) (n_{series,SC} V_{cell,SC})^2 \quad (3-9)$$

โดย

E_{SC} คือ ระดับพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูง (จูล)
 $V_{cell,SC}$ คือ แรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง 1 หน่วย

3.3.4 เซลล์เชื้อเพลิง

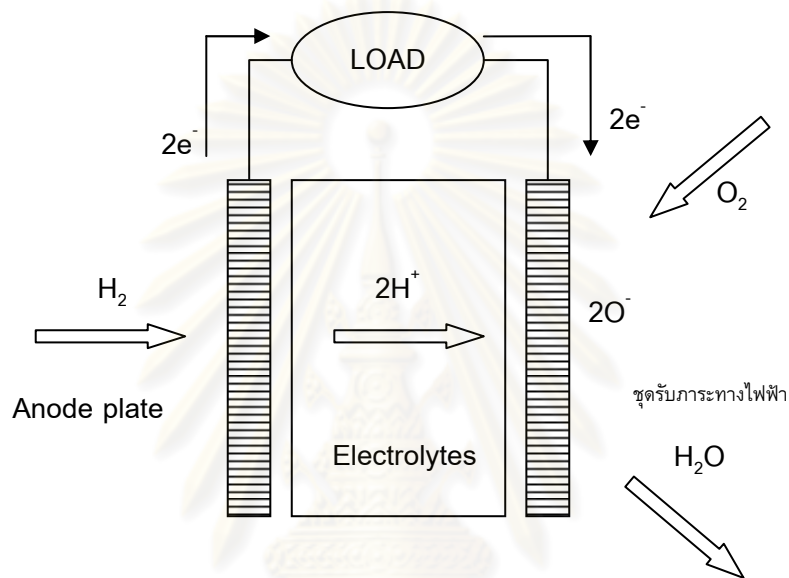
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทำงานพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงและการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงในแต่ละชนิดรวมถึงลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.3.4.1 การทำงานพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อสร้างเป็นพลังงานไฟฟ้าเช่นเดียวกับแบตเตอรี่ แต่แตกต่างจากแบตเตอรี่ตรงที่เซลล์เชื้อเพลิงไม่ใช้การจ่ายพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับเพื่อประจุพลังงานเหมือนกับแบตเตอรี่ แต่ใช้การจ่ายเชื้อเพลิงเข้าไปทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อสร้างเป็นพลังงานไฟฟ้าแทน

โดยพื้นฐานการทำงานและโครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงในแต่ละชนิดนั้นมีหลักการที่เหมือนกัน โดยโครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบไปด้วยแผ่นอิเล็กโทรดด้านอานอดและแผ่นอิเล็กโทรดด้านแคโทดโดยมีสารอิเล็กโทรไลต์ อยู่ระหว่างกลางแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสอง ซึ่งมีลักษณะเดียวกับเซลล์ของแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 3-17 การทำงานเริ่มโดยการจ่ายเชื้อเพลิงซึ่งก็คือก๊าซไฮโดรเจนเข้าที่แผ่นอิเล็กโทรดด้านอานอดพร้อมกับจ่ายก๊าซออกซิเจนเข้าที่แผ่นอิเล็กโทรดด้านแคโทดโดยก๊าซออกซิเจนที่ใช้ก็คือก๊าซออกซิเจนในอากาศ ก๊าซไฮโดรเจนจะแตกตัวออกเป็น

ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และอิเล็กตรอน (e^-) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวนำและภาระมาที่แผ่นอิเล็กโทรดด้านแคโทด ไฮโดรเจนไอออนจะเคลื่อนที่ผ่านสารอิเล็กโทรไลต์มาที่แผ่นอิเล็กโทรดด้านแคโทด ก๊าซออกซิเจนที่ถูกจ่ายเข้ามาที่แผ่นอิเล็กโทรดด้านแคโทดจะแตกตัวออกเป็นอะตอมออกซิเจน (O) และจะจับตัวกับอิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านตัวนำและภาระมาเกิดเป็นออกซิเจนไอออน (O^-) จากนั้นจะรวมตัวกับไฮโดรเจนไอออนเกิดเป็นน้ำ



รูปที่ 3-17 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

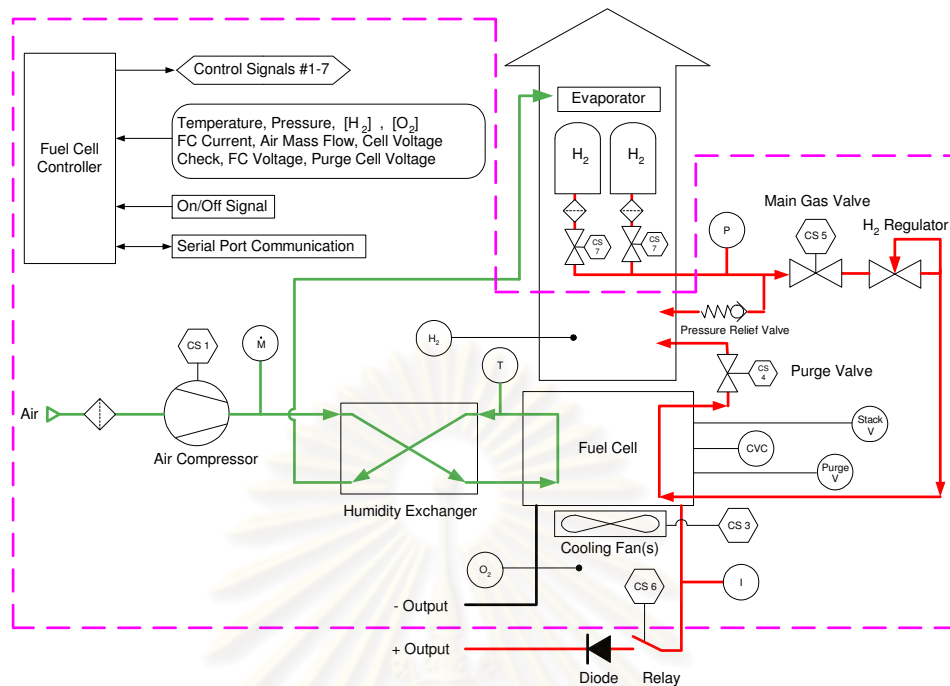
การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงนั้นคือความพยายามพัฒนาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงให้มีความสามารถให้กำลังไฟฟ้าได้สูงและมีอุณหภูมิการทำงานที่ต่ำ ซึ่งก็คือความพยายามในการเพิ่มความเร็วในการทำปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิง แต่ความเร็วในการทำปฏิกิริยานั้นแปรตามอุณหภูมิ ดังนั้นการพัฒนาจึงพยายามที่จะหาวัสดุสำหรับใช้เป็นแผ่นอิเล็กโทรดและวัสดุสำหรับใช้สารอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ความเร็วในการทำปฏิกิริยาที่สูงแต่มีอุณหภูมิการทำงานที่ต่ำ ดังนั้นการแบ่งชนิดเซลล์เชื้อเพลิงก็ถือการแบ่งตามชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแผ่นอิเล็กโทรดและสารอิเล็กโทรไลต์ โดยแต่ละชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงก็มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันและแต่ละชนิดก็มีความเหมาะสมกับงานที่ต่างกัน ตารางที่ 3-4 [19] แสดงลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงในแต่ละชนิดและการใช้งาน

ตารางที่ 3-4 ลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงในแต่ละชนิดและการใช้งาน

Fuel cell	Fuel	Electrolyte	Operating temperature	Efficiency	Application
Phosphoric acid	H ₂	Phosphoric acid	~ 200 °C	40-50%	Stationary (>250 kW)
Alkaline	H ₂	Potassium hydroxide solution	~ 80 °C	40-50%	Mobile
Proton exchange membrane	H ₂	Polymer ion exchange film	~ 80 °C	40-50%	Electric vehicle
Direct methanol	Methanol, Ethanol	Solid polymer	~ 90-100 °C	~30%	Electric vehicle, Small portable device (1 W-70kW)
Molten carbonate	H ₂ , CO	Carbonate	~600-700 °C	50-60%	Stationary (>250 kW)
Solid oxide	H ₂ , CO	Yttria-stabilized zirconia	~ 1000 °C	50-65%	Stationary

3.3.4.2 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะดำเนินไปได้ก็ต่อเมื่อมีระบบย่อยที่ทำงานร่วมกันอย่างเหมาะสม ระบบย่อยของเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วย ระบบจ่ายไฮโดรเจน ระบบจ่ายออกซิเจน ระบบระบายความร้อน และระบบควบคุม โดยตัวอย่างการทำงานร่วมกันของระบบย่อยต่างๆ แสดงในรูปที่ 3-18 [26]



รูปที่ 3-18 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง

3.3.4.2.1 ระบบจ่ายไฮโดรเจน

ระบบจ่ายไฮโดรเจนทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายก๊าซจากภาชนะบรรจุมายังเซลล์เชื้อเพลิงให้ได้ปริมาณที่พอเหมาะ นอกจากนี้ในระบบจ่ายไฮโดรเจนยังมีโซลีนอยด์วาล์วทำหน้าที่ปิดกั้นระหว่างภาชนะบรรจุกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงในขณะที่ไม่ได้เดินเครื่อง และมีโซลีนอยด์วาล์วทำหน้าที่ระบายก๊าซไฮโดรเจนส่วนเกินจากปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง โดยมีเซนเซอร์วัดความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนส่วนเกินที่ระบายออกเพื่อตรวจวัดและแจ้งเตือนเมื่อมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนมากจนถึงค่าที่กำหนดและจะหยุดการทำงานของระบบเพื่อป้องกันการติดไฟของก๊าซไฮโดรเจน

3.3.4.2.2 ระบบจ่ายออกซิเจน

ระบบจ่ายออกซิเจนจะควบคุมการไหลของอากาศที่ไหลเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงให้เหมาะสมตามความต้องการกระแสไฟฟ้าโดยการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องอัดอากาศ ซึ่งมีเซนเซอร์ตรวจวัดอัตราการไหลเพื่อให้การปรับความเร็วรอบของเครื่องอัดอากาศนั้นมีความเหมาะสม

อากาศที่ไหลเข้าระบบจะต้องผ่านกรองอากาศเพื่อป้องกันอุปกรณ์เสียหาย นอกจากนี้อากาศจะต้องไหลผ่านอุปกรณ์สร้างความชื้น ซึ่งใช้ไอน้ำที่ได้จากปฏิกิริยากลับมาเพิ่มความชื้นให้อากาศ เพื่อให้ภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีความชื้นที่เหมาะสม และไอน้ำส่วนที่เกินจะถูกระบายออกสู่บรรยากาศ

3.3.4.2.3 ระบบระบายความร้อน

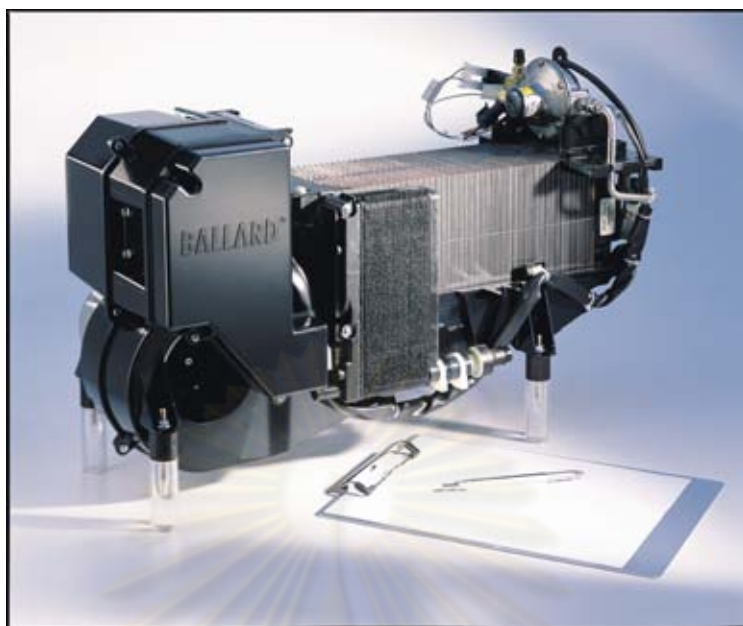
เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งจะควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่ 65°C ด้วยการควบคุมความเร็วรอบของพัดลม โดยอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงจะวัดจากอุณหภูมิของอากาศส่วนที่ระบายออกจากการทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้พัดลมระบายความร้อนยังช่วยเจือจางก๊าซไฮโดรเจนส่วนเกินที่ระบายออกเพื่อป้องกันการติดไฟ

3.3.4.2.4 ระบบควบคุม

การทำงานของอุปกรณ์ภายในระบบย่อยต่างๆ นั้นจะถูกควบคุมโดยระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะควบคุมการทำงานโดยวัดค่าต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง ความดันของก๊าซไฮโดรเจน ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนที่ถูกระบายออกสู่บรรยากาศ กระแสไฟฟ้า อัตราการไหลของอากาศ และแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ ระบบควบคุมจะแจ้งเตือนหากมีค่าที่วัดได้ไม่เหมาะสมและจะหยุดการทำงานเพื่อป้องกันความเสียหาย นอกจากนี้ก็มีการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในอากาศเพื่อรักษาสภาวะในบริเวณทำงาน

3.3.4.2.5 เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย

เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Proton exchange membrane รุ่น NEXA ขนาด 1.2 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 3-19 [26] ซึ่งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงพร้อมชุดระบบย่อยสำหรับการทำงานมีขนาดและน้ำหนักน้อยและอุณหภูมิการทำงานที่ต่ำ ใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ และใช้ไอน้ำจากปฏิกิริยากลับมาสร้างความชื้นให้อากาศที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจึงไม่ต้องใช้น้ำจากแหล่งอื่น ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงเหมาะกับการใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับระบบขับเคลื่อนของรถจักรยานยนต์ โดยลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงนี้แสดงในตารางที่ 3-5 [26]



รูปที่ 3-19 เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3-5 ลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย

OUTPUTS	Requirement	Definition	Quantity
Power	Rated Power	Capacity at Standard Conditions, BOL	1200 W
	Voltage	Operating voltage range	22 V to 50 V
		Voltage at Rated Power	26 V
Start-up Time	Minimum time to achieve Rated Power from a Cold Start condition	2 minutes	
Physical	Dimensions	L x W x H	56 x 25 x 33cm
	Mass	Total system mass	13 kg
INPUTS	Requirement	Definition	Quantity
fuel	Purity	Lowest acceptable concentration of hydrogen	99.99% H ₂ (vol)
	Pressure	Allowable range of inlet supply pressure	70 – 1720 kPa(g)
	Consumption	Maximum fuel consumption at Rated Power	<18.5 SLPM
DC Power Supply	Voltage	Allowable range of input voltage	18 V to 30 V
	Power	Maximum power draw during start-up	60 W
Operating Environment	Location	Acceptable locations for use	Indoors & Outdoors
	Temperature Range	Range of acceptable ambient, cooling air and oxidant air temperatures	3°C - 40°C
	Relative Humidity	Range of acceptable ambient relative humidity	0% - 95% (non-condensing)

บทที่ 4

การออกแบบและการจำลองระบบขับเคลื่อน

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอน แนวคิดและวิธีการออกแบบโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถจักรยานยนต์ขนาดเล็กที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 กิโลวัตต์ เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าปฐมภูมิ และการกำหนดค่าลักษณะเฉพาะของรถและขนาดของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทุติยภูมิ เพื่อให้ได้สมรรถนะตามที่กำหนด

4.1 การออกแบบเบื้องต้นของระบบขับเคลื่อน

4.1.1 เป้าหมายของรูปแบบของระบบขับเคลื่อน

เป้าหมายในการออกแบบ คือ ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าปฐมภูมิ ร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทุติยภูมิอื่นเพื่อให้สมรรถนะการขับขี่ที่ดีกว่าการใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพียงแหล่งเดียว โดยทำงานร่วมกับมอเตอร์ขนาดไม่เกิน 5 กิโลวัตต์ ส่งกำลังผ่านโซ่หรือสายพานแบบหนึ่งอัตราทด โดยเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้นั้นเป็นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 กิโลวัตต์ พร้อมอุปกรณ์ประกอบ

4.1.2 แนวทางการออกแบบระบบขับเคลื่อน

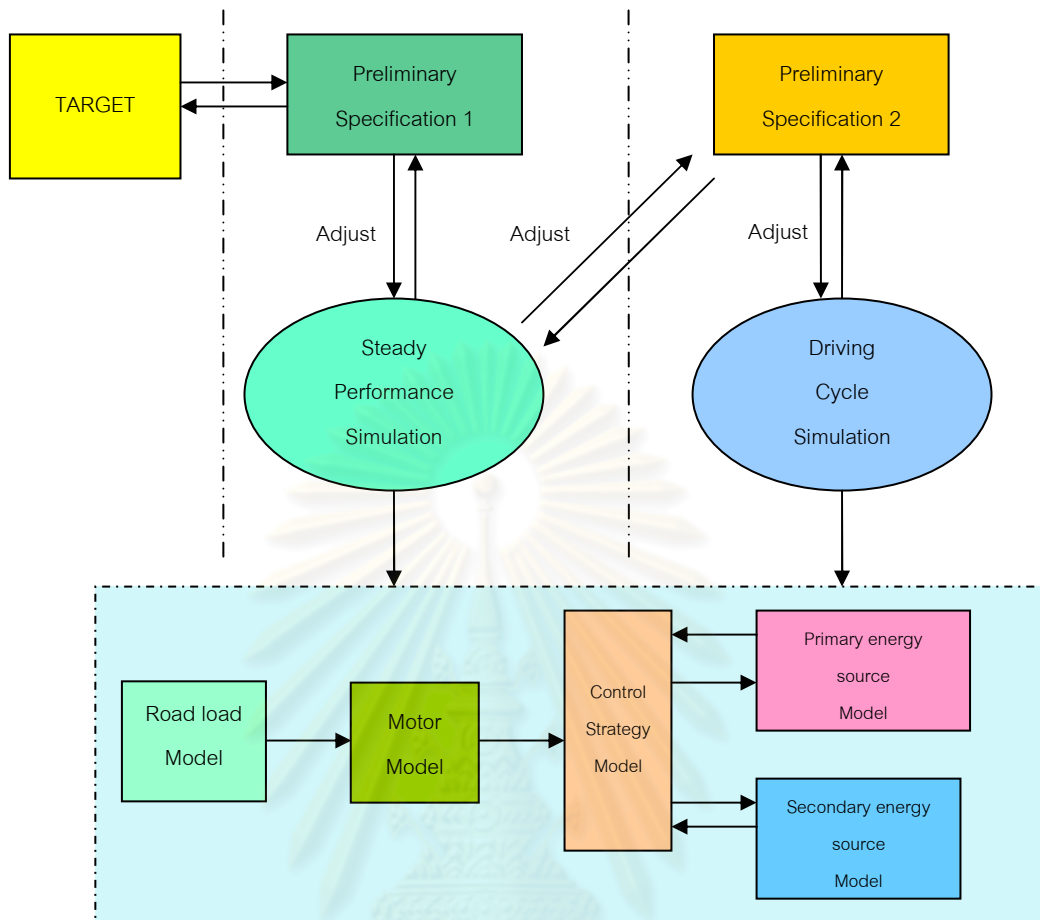
การออกแบบระบบขับเคลื่อนในส่วนแรกเป็นการออกแบบการจัดวางระบบ รวมทั้งเลือกรูปแบบทางไฟฟ้าของระบบ จากนั้นจะเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยให้การกำหนดลักษณะเฉพาะของรถรวมถึงขนาดของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม การสร้างแบบจำลองนั้นจะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของระบบย่อยต่างๆ ดังนี้

- แบบจำลองของภาระการขับเคลื่อนซึ่งจะกำหนดว่าในการขับขี่ระบบขับเคลื่อนจะต้องใช้กำลังเท่าไรในการขับเคลื่อนรถ
- แบบจำลองการทำงานของมอเตอร์ซึ่งกำหนดความสามารถในการขับเคลื่อนรวมถึงบ่งบอกประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้ามาเป็นกำลังขับเคลื่อน

- แบบจำลองของการควบคุมการจ่ายพลังงานจะเป็นตัวกำหนดว่าระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานปฐมภูมิและแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิ ต้องจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาในปริมาณเท่าไร
- แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง จะบอกถึงความสามารถในการจ่ายไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง
- แบบจำลองของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทุติยภูมิ เป็นแบบจำลองความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแหล่งพลังงานไฟฟ้านั้น รวมทั้งบอกถึงระดับพลังงานที่ถูกเก็บไว้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหล่านี้จะถูกนำมาประกอบกันเป็นแบบจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนดังรูปที่ 4-1 การจำลองแบบจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ 1) การจำลองโดยใช้สภาวะการขับขี่แบบคงที่ เพื่อกำหนดค่าลักษณะเฉพาะของรถเพื่อให้ได้สมรรถนะเบื้องต้นตามที่กำหนด และ 2) การจำลองแบบโดยใช้วัฏจักรขับขี่ทดสอบ เพื่อที่จะทราบความต้องการของกำลังที่ใช้ในการขับขี่ และกำหนดค่าลักษณะเฉพาะของรถและขนาดของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิให้ได้เพียงพอต่อการทำงาน

ศูนย์วิทยพัชกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

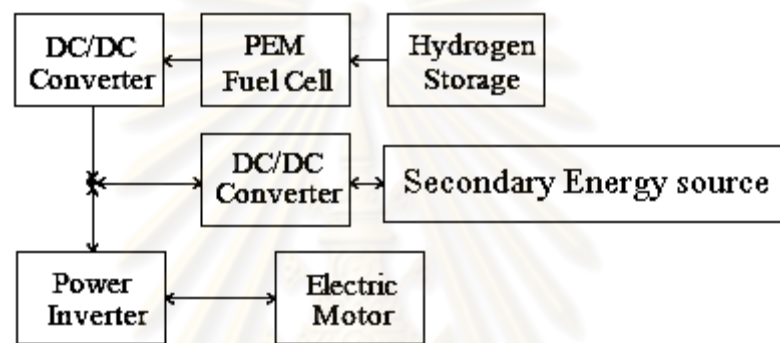


รูปที่ 4-1 ขั้นตอนการการออกแบบและจำลองระบบขับเคลื่อน

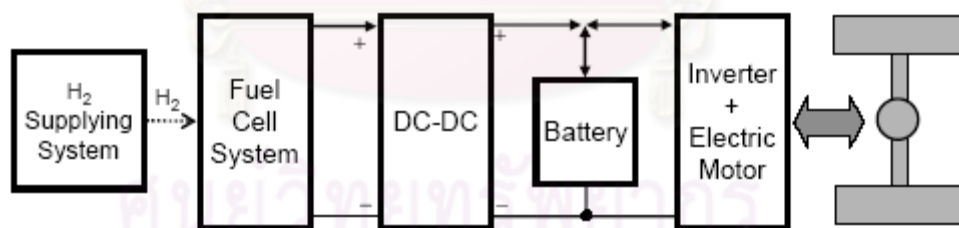
4.2 การจัดวางระบบและรูปแบบทางไฟฟ้าของระบบ

สำหรับการจัดวางระบบ ดังที่ได้ยกตัวอย่างรูปแบบในหัวข้อ 3.2.3 นั้น อาจมีรูปแบบต่างๆ ได้อีกหลายรูปแบบ ซึ่งในที่นี้จะเลือกรูปแบบที่ง่ายที่สุดก่อน โดยการออกแบบการจัดวางระบบนี้ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบทางไฟฟ้าของระบบ ระบบขับเคลื่อนมีรูปแบบทางไฟฟ้าได้สองรูปแบบคือใช้ระบบไฟฟ้ากระแสตรงหรือใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ โดยระบบไฟฟ้ากระแสสลับมีข้อดีตรงที่มีการทำงานที่ระดับแรงดันสูง ทำให้ที่ระดับกำลังหนึ่ง มีระดับกระแสที่ต่ำ ทำให้ระดับการสูญเสียทางไฟฟ้าในส่วนประกอบต่างๆ มีค่าต่ำ มีผลให้ระบบขับเคลื่อนโดยรวมมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าระบบที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง อย่างไรก็ตาม ด้วยลักษณะของกระแสสลับ การจำลองการทำงานของส่วนประกอบทางไฟฟ้าจะมีความซับซ้อนมากขึ้น และที่สำคัญที่สุด จากการสำรวจเบื้องต้นในตลาดสำหรับระดับกำลัง 3-5 กิโลวัตต์ ราคาของมอเตอร์รวมทั้งชุดควบคุมมอเตอร์ในกรณีของ

กระแสลึบจะสูงกว่ากรณีของกระแสตรงได้กว่าเท่าตัว ด้วยกรอบความคิดของวิทยานิพนธ์นี้ที่เน้นการศึกษาเบื้องต้นถึงการจำลองการทำงาน การประกอบระบบเพื่อการทำงานได้ ดังนั้นในงานนี้จึงเลือกระบบไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อเป็นเช่นนั้นแล้ว การจัดวางระบบอาจเป็นได้ดังรูปที่ 4-2 โดยการแบ่งจ่ายพลังงานตามกลยุทธ์ที่กำหนดทำได้โดยการปรับระดับของแรงดันที่ส่งมาจากแหล่งพลังงานทั้งสอง ซึ่งทำได้โดยชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC/DC converter) จำนวนหนึ่งหรือสองตัวแล้วแต่การออกแบบรายละเอียดที่จะได้กำหนดต่อไป รูปที่ 4-3 แสดงถึงแผนภาพทางไฟฟ้าของการจัดวางในกรณีที่ใช้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพียงตัวเดียว



รูปที่ 4-2 การจัดวางระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด



รูปที่ 4-3 แผนภาพทางไฟฟ้าของการจัดวางระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด

4.3 การจัดการขับเคลื่อน

การเคลื่อนที่ของรถนั้น ระบบขับเคลื่อนจะต้องสามารถเอาชนะภาระต่างๆ ที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของรถเพื่อให้รถสามารถเคลื่อนที่ไปได้ตามต้องการ แรงต้านทานต่างๆ สามารถแบ่งออกเป็น แรงต้านทานการกลิ้ง (Rolling resistance force) แรงต้านทานการไหลของอากาศ (Aerodynamic drag force) แรงเพื่อการขึ้นทางลาดชัน (Climbing force) และแรงเพื่อให้

ความเร่ง (Acceleration force) ซึ่งการสร้างแบบจำลองระบบขับเคลื่อนนั้นจะต้องคำนวณภาระต่างๆ ที่เกิดขึ้น เพื่อที่จะสามารถจำลองแบบกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนถึงจำลองแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าหรือจำลองการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าต่างๆ ต่อไปได้

4.3.1 แรงต้านทานการกลิ้ง

แรงต้านทานการกลิ้ง (Rolling resistance force) เป็นแรงที่เกิดขึ้นที่ล้อยางกับพื้นถนน แรงต้านทานการกลิ้งแสดงได้ดังสมการที่ 4-1

$$F_r = f_r mg \quad (4-1)$$

โดย

F_r	คือ	แรงต้านทานการกลิ้ง (นิวตัน)
f_r	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการกลิ้งซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของยางรถยนต์ แรงดันลม และ ชนิดของพื้นถนน
m	คือ	มวลรวมของรถและน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (กิโลกรัม)
g	คือ	ความเร่งโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ 9.81 m/s^2

4.3.2 แรงต้านทานการไหลของอากาศ

แรงต้านทานการไหลของอากาศ (Aerodynamic drag force) เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากอากาศที่ไหลผ่านตัวรถซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของตัวรถ พื้นที่หน้าตัดของตัวรถ และความเร็วอากาศที่ไหลผ่านตัวรถ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4-2

$$F_d = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (4-2)$$

โดย

F_d	คือ	แรงต้านทานจากอากาศ (นิวตัน)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรถ (ตารางเมตร)
C_d	คือ	สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Drag coefficient)

v คือ ความเร็วของรถ (เมตรต่อวินาที)

4.3.3 แรงเพื่อการขึ้นทางลาดชัน

เมื่อรถมีการขึ้นทางลาดชัน (Climbing force) จะเกิดแรงย่อยของน้ำหนักของรถขึ้นในทิศทางที่ตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของรถ หรือหากรถลงทางลาดชันก็จะเกิดแรงย่อยของน้ำหนักของรถขึ้นในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของรถยนต์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4-3

$$F_{cl} = mg \sin(\theta) \quad (4-3)$$

โดย

F_{cl} คือ แรงในการขึ้นทางลาดชัน (นิวตัน)

θ คือ มุมความลาดเอียงของพื้นถนน

4.3.4 แรงเพื่อสร้างความเร่ง

แรงเพื่อสร้างความเร่ง (Acceleration force) แบ่งออกเป็นสองส่วนก็คือแรงจากความเร่งเชิงเส้น และแรงจากความเร่งเชิงมุม ซึ่งแรงจากความเร่งเชิงเส้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4-4

$$F_a = ma \quad (4-4)$$

แรงจากความเร่งเชิงมุมนั้นเกิดขึ้นในส่วนประกอบของรถที่เกิดการหมุนในขณะขับเคลื่อน เช่น การหมุนของล้อ ชุดเฟือง หรือเครื่องยนต์ ในที่นี้จะพิจารณาที่รถจักรยานยนต์ขนาดเล็ก ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ซึ่งส่วนประกอบที่จะนำมาคำนวณแรงจากความเร่งเชิงมุมก็คือล้อและแกนหมุนของมอเตอร์ดังสมการที่ 4-5 และ 4-6

$$F_{a,wh} = \frac{n_{wh} I_{wh} a}{r^2} \quad (4-5)$$

$$F_{a,m} = \frac{I_m G^2 a}{r^2} \quad (4-6)$$

โดย

F_a คือ แรงเพื่อสร้างความเร่ง (นิวตัน)

$F_{a,wh}$	คือ	แรงเพื่อสร้างความเร่งเชิงมุมของล้อ (นิวตัน)
$F_{a,m}$	คือ	แรงเพื่อสร้างความเร่งเชิงมุมของแกนหมุนของมอเตอร์ (นิวตัน)
I_{wh}	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของล้อแต่ละล้อ (Moment of inertia of wheel, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
I_m	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของแกนหมุนของมอเตอร์ (Moment of inertia of rotor, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
a	คือ	ความเร่งของรถ (m/s^2)
r	คือ	รัศมีของล้อ (เมตร)
G	คือ	อัตราทดของมอเตอร์ถึงล้อ (Gear ratio)
n_{wh}	คือ	จำนวนของล้อในที่นี่คือ 2 ล้อ

4.3.5 ภาระการขับเคลื่อนรวม

แรงที่ใช้ขับเคลื่อนทั้งหมด (Total tractive effort) คือผลรวมของแรงต้านทานทั้งหมดดังสมการที่ 4-7

$$F = \sum_{i=1}^n F_i = F_r + F_d + F_{cl} + (F_a + F_{a,wh} + F_{a,m}) \quad (4-7)$$

การคำนวณนั้นค่าที่จะนำมาพิจารณาในการออกแบบคือค่าแรงบิดที่มอเตอร์และกำลังในการขับเคลื่อนโดยจัดสมการที่ 4-7 ให้อยู่ในพจน์ของแรงบิดที่มอเตอร์ได้ดังสมการที่ 4-8

$$T_m = \frac{r}{G} \left(\sum_{i=1}^n F_i \right) = \frac{r}{G} [F_r + F_d + F_{cl} + (F_a + F_{a,wh} + F_{a,m})] \quad (4-8 ก)$$

$$T_m = \frac{r}{G} \left[f_r mg + \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 + mg \sin(\theta) + \left(m + \frac{n_{wh} I_{wh}}{r^2} + \frac{I_m G^2}{r^2} \right) \frac{dv}{dt} \right] \quad (4-8 ข)$$

กำลังเพื่อการขับเคลื่อนคือผลคูณของความเร็วกับแรงขับซึ่งจะเท่ากับกำลังที่มอเตอร์ขับดังสมการที่ 4-9

$$P_{m,out} = f_r mgv + \frac{1}{2} \rho AC_d v^3 + mgv \sin(\theta) + \left(m + \frac{n_{wh} I_{wh}}{r^2} + \frac{I_m G^2}{r^2}\right) v \frac{dv}{dt} \quad (4-9)$$

โดย

$P_{m,out}$ คือ กำลังขับจากมอเตอร์ (วัตต์)

4.3.6 ภาระทางไฟฟ้าสำหรับการขับเคลื่อน

กำลังที่คำนวณได้จากสมการที่ 4-9 เป็นกำลังที่มอเตอร์จะต้องจ่ายออกไปในสภาวะการขับเคลื่อนต่างๆ ซึ่งหากว่ามอเตอร์สามารถแปลงกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เป็นกำลังขับเคลื่อนทั้งหมดได้โดยสมบูรณ์แล้ว กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะเท่ากับกำลังขับเคลื่อน แต่ในความเป็นจริงแล้วกำลังไฟฟ้าไม่สามารถแปลงมาเป็นกำลังในการขับเคลื่อนได้ทั้งหมดแต่จะสูญเสียออกไปในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

- การสูญเสียจากความต้านทานในขดลวด (Copper losses) เกิดจากความต้านทานในขดลวดซึ่งสูญเสียในรูปของความร้อน โดยขึ้นอยู่กับแรงบิด และสามารถประมาณได้ดังสมการที่ 4-10 ก

$$L_{COP} = k_c T^2 \quad (4-10 \text{ ก})$$

โดย

L_{COP} คือ การสูญเสียจากความต้านทานในขดลวด (วัตต์)

k_c คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานในขดลวดมอเตอร์

- การสูญเสียภายในแกนเหล็ก (Iron losses) เกิดจากการที่แกนเหล็กของมอเตอร์หมุนแล้วพลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียจากการเปลี่ยนแปลงของทิศทางของเส้นสนามแม่เหล็กภายในแกนเหล็ก (Hysteresis losses) ซึ่งสามารถจำกัดได้โดยใช้แกนเหล็กเป็นแกนเหล็กอ่อน (Soft iron) นอกจากนั้นการสูญเสียในแกนเหล็กอีกส่วนหนึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในแกนเหล็กที่เรียกว่ากระแสเอ็ดดี้ (Eddy current) ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน การจำกัดการสูญเสียนี้สามารถทำได้โดยใช้แกนเหล็กแยกเป็นแผ่นบางและนำมาประกบกันโดย

มีชั้นผิวฉนวนกันระหว่างแผ่นโดยการสูญเสียภายในแกนเหล็กนั้นขึ้นอยู่กับ
กับความเร็วเชิงมุมและสามารถประมาณได้ดังสมการที่ 4-10 ข

$$L_{ir} = k_i \omega \quad (4-10 \text{ ข})$$

โดย

L_{ir} คือ การสูญเสียภายในแกนเหล็ก (วัตต์)

k_i คือ สัมประสิทธิ์แกนเหล็กมอเตอร์

- การสูญเสียจากความเสียดทานภายนอกมอเตอร์ (Friction losses) ขึ้นอยู่กับ
ความเร็วเชิงมุมและสามารถประมาณได้ดังสมการที่ 4-10 ค

$$L_{Fr} = k_o \omega^3 \quad (4-10 \text{ ค})$$

โดย

L_{Fr} คือ การสูญเสียจากความเสียดทานภายนอกมอเตอร์ (วัตต์)

k_o คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานภายนอกมอเตอร์

- การสูญเสียแบบคงที่ (Constant losses, C_l) การทำงานของมอเตอร์
จะต้องมีระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งต้องใช้พลังงานไฟฟ้าส่วนหนึ่งไป
กับการควบคุม และสำหรับมอเตอร์ชนิดที่ใช้แม่เหล็กเป็นแบบขดลวด
แม่เหล็กไฟฟ้าก็ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าส่วนหนึ่งไปในการสร้าง
สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการสูญเสียนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับแรงบิดและความเร็ว
รอบของมอเตอร์

การสูญเสียดังกล่าวเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ในแต่ละตัวนั้นจะขึ้นอยู่กับจุดการทำงานในแต่ละจุดนั้นคือ ขึ้นอยู่กับแรงบิดและความเร็วเชิงมุมที่มอเตอร์ทำงานอยู่ ซึ่งมอเตอร์ในแต่ละรุ่นจากผู้ผลิตต่างๆ นั้นจะมีประสิทธิภาพในแต่ละจุดทำงานที่ต่างกันและสามารถประมาณประสิทธิภาพได้ดังสมการที่ 4-11 สมการของประสิทธิภาพมอเตอร์ดังกล่าวอ้างอิงมาจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบใช้แปลงถ่าน แต่สามารถนำมาใช้ประมาณกับมอเตอร์ชนิดอื่นได้

$$\eta_m(T, \omega) = \frac{P_{m,out}}{P_{m,in}} = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_i \omega + k_o \omega^3 + C_l} \quad (4-11)$$

จากสมการที่ 4-9 และ 4-11 สามารถคำนวณภาระทางไฟฟ้าในการขับเคลื่อนได้ดังสมการที่ 4-12

$$P_{m,in} = \frac{1}{\eta_m(T, \omega)} \left[f_r mgv + \frac{1}{2} \rho AC_d v^3 + mgv \sin(\theta) + \left(m + \frac{n_{wh} I_{wh}}{r^2} + \frac{I_m G^2}{r^2} \right) v \frac{dv}{dt} \right] \quad (4-12)$$

หากกำลังในการขับเคลื่อนมีค่าน้อยกว่าศูนย์คือเป็นช่วงที่มีการชะลอหรือหยุดรถ (Braking) รถและหากจะนำกำลังจากจากการหยุดนี้กลับมาเก็บกำลังไฟฟ้าที่ได้จากมอเตอร์ซึ่งขณะนี้ทำงานเป็นเครื่องผลิตไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4-13

$$P_{m,regen} = \eta_m(T, \omega) \left[f_r mgv + \frac{1}{2} \rho AC_d v^3 + mgv \sin(\theta) + \left(m + \frac{n_{wh} I_{wh}}{r^2} + \frac{I_m G^2}{r^2} \right) v \frac{dv}{dt} \right] \quad (4-13)$$

4.4 การกำหนดสมรรถนะสำหรับการออกแบบ

การออกแบบระบบขับเคลื่อนนั้นจะต้องกำหนดสมรรถนะเบื้องต้นที่ต้องการก่อน ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ 1. กำหนดสมรรถนะที่สภาวะคงที่ใดๆ เพื่อที่จะสามารถปรับค่าลักษณะเฉพาะของรถจากค่าเบื้องต้นให้เหมาะสมยิ่งขึ้นเพื่อให้ได้สมรรถนะตามที่กำหนด และ 2. กำหนดสมรรถนะโดยใช้วัฏจักรขับทดสอบ (Driving cycle) เพื่อให้สามารถกำหนดค่าลักษณะเฉพาะของรถ และขนาดของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

4.4.1 การกำหนดสมรรถนะและค่าลักษณะเฉพาะของรถที่สภาวะคงที่

การกำหนดสมรรถนะสำหรับรถจักรยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงนั้นจะกำหนดให้มีสมรรถนะที่อยู่ระหว่างรถจักรยานยนต์ขนาดเล็กขนาดเครื่องยนต์ 50 ซีซี กับขนาดเครื่องยนต์ 125 ซีซี โดยมีสมรรถนะสูงกว่าจักรยานยนต์ไฟฟ้าทั่วไป แต่ยอมให้มีระยะทางการขับขี่ที่สั้นกว่ารถจักรยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์ ในเบื้องต้นได้กำหนดสมรรถนะโดยคำนวณจากสภาวะการขับขี่แบบคงที่ เช่น

- ความเร็วสูงสุดที่สามารถขับเคลื่อนได้
- ความลาดชันของพื้นถนนสูงสุดที่สามารถขับขี่ที่ความเร็วหนึ่ง
- เวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วจนถึงความเร็วหนึ่ง

สมรรถนะของรถจักรยานยนต์แบบต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-1 [15,27]

ตารางที่ 4-1 สมรรถนะของรถจักรยานยนต์

		125 cc	50 cc	EV 3	Honda CUV-ES	Peugeot electric scooter	H50 (hybrid)	TARGET
ความเร็วสูงสุด	kph	78	56	60	60	45	49	70
ความสามารถในการขึ้นทางชัน (degree)	kph	8° /90 kg load , 60 kph	-	18° at 10 kph	12.6°	12.6°	-	8° /90 kg load , 40 kph
ความสามารถในการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 30 km/h	sec	4.5	5.8	4.3	-	-	-	5
น้ำหนักรถ	kg	110	83	141	130	115	100	100

4.4.2 การกำหนดสมรรถนะและค่าลักษณะเฉพาะของรถโดยวิศวกรขับทดสอบ

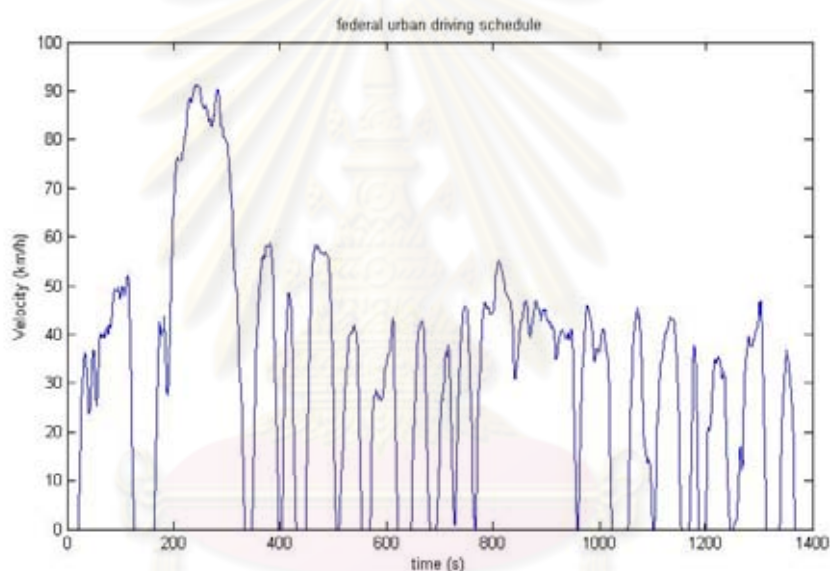
การพิจารณากำหนดสมรรถนะจากสภาวะการขับซึ่งคงที่ใดๆ ขึ้นต้นนั้นอาจยังไม่สามารถแสดงถึงภาวะในการขับเคลื่อนได้อย่างสอดคล้องกับสภาวะการขับที่จริง ดังนั้นจึงต้องใช้วิศวกรขับทดสอบเข้ามาร่วมในการจำลองระบบเพื่อให้แสดงถึงภาวะในการขับเคลื่อนของรถได้อย่างสอดคล้องกับการขับที่จริงของรถมากขึ้น และสามารถกำหนดสมรรถนะของรถในการออกแบบได้อย่างเหมาะสมมากขึ้น

วิศวกรขับทดสอบเป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงความเร็วของรถในช่วงเวลาต่างๆ โดยมากจะนำไปใช้ในการทดสอบมลพิษจากรถยนต์หรือใช้ทดสอบอัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของรถยนต์ โดยการทดสอบบนเครื่องไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) นอกจากนั้นวิศวกรขับทดสอบยังใช้ในการจำลองระบบเพื่อหาภาวะในการขับเคลื่อน วิศวกรขับทดสอบนั้นอาจแตกต่างกันในแต่ละประเทศเนื่องจากลักษณะของการจราจรของแต่ละประเทศหรือแต่ละเมืองนั้นแตกต่างกัน หรือแตกต่างกันจากวิธีการสร้างเช่น สร้างจากการคำนวณทางทฤษฎีซึ่งประเทศในยุโรปนั้นนิยมใช้วิธีนี้

ในการสร้างวัฏจักรขับทดสอบ หรือการสร้างวัฏจักรขับทดสอบจากการวัดจากการขับที่จริง ในส่วนต่อไปจะได้แนะนำวัฏจักรขับทดสอบรูปแบบต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูล

4.4.2.1 วัฏจักรขับทดสอบ Federal urban driving Schedule

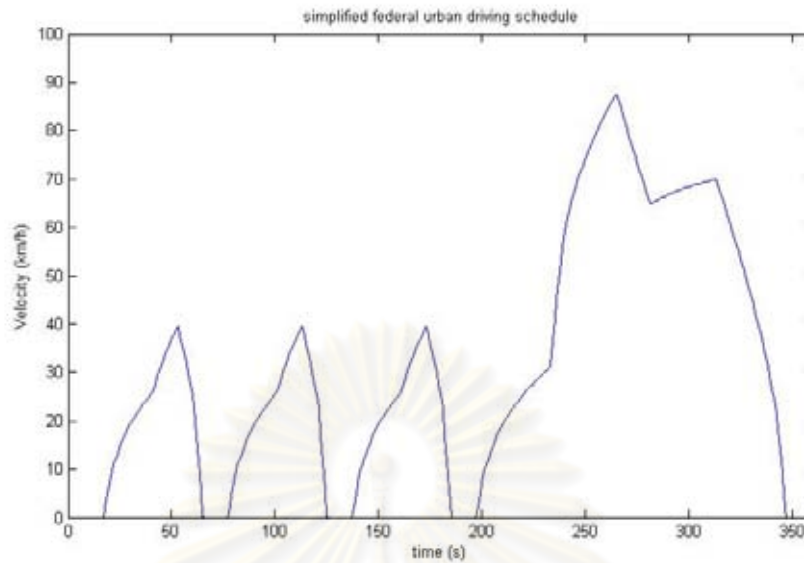
วัฏจักรขับทดสอบ Federal urban driving Schedule (FUDS) เป็นวัฏจักรขับทดสอบที่พัฒนาขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา สร้างขึ้นโดยการวัดค่าความเร็วจากการขับในเมืองเหมาะสมกับยานยนต์ขนาดเล็ก มีความเร็วสูงสุดที่ประมาณเก้าสิบกิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-4 FUDS driving cycle

4.4.2.2 วัฏจักรขับทดสอบ Simplified Federal urban driving Schedule

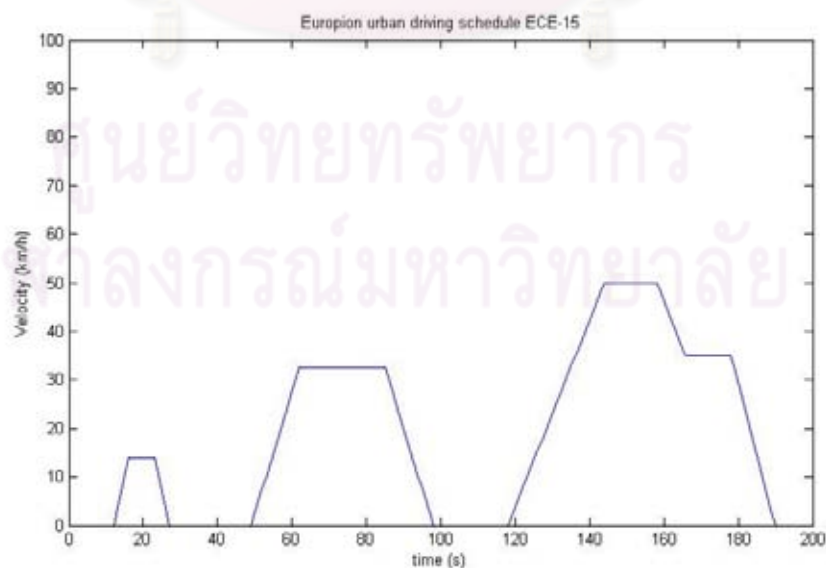
วัฏจักรขับทดสอบ Simplified Federal urban driving Schedule (SFUDS) เป็นการลดรูปลงของ FUDS ให้มีความง่ายขึ้นโดยยังคงความเร็วเฉลี่ย ความเร่งสูงสุด ความหน่วงสูงสุด และช่วงเวลาที่หยุดนิ่งเท่ากันกับของ FUDS



รูปที่ 4-5 SFUDS driving cycle

4.4.2.3 วัฏจักรขับทดสอบ European ECE cycle

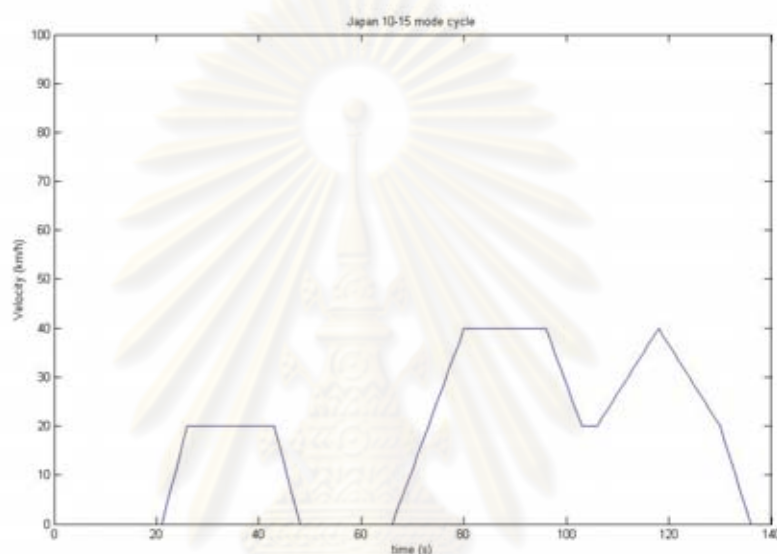
วัฏจักรขับทดสอบ European ECE cycle (ECE-15) เป็นวัฏจักรขับทดสอบที่สร้างโดยทางทฤษฎีเพื่อแทนการขับในเมืองของประเทศในยุโรปโดยความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 18.7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็วสูงสุดที่ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จึงเหมาะกับยานยนต์ที่มีความเร็วและภาระต่ำ



รูปที่ 4-6 ECE-15 driving cycle

4.4.2.4 วัฏจักรขับทดสอบ Japan 10-15 mode cycle

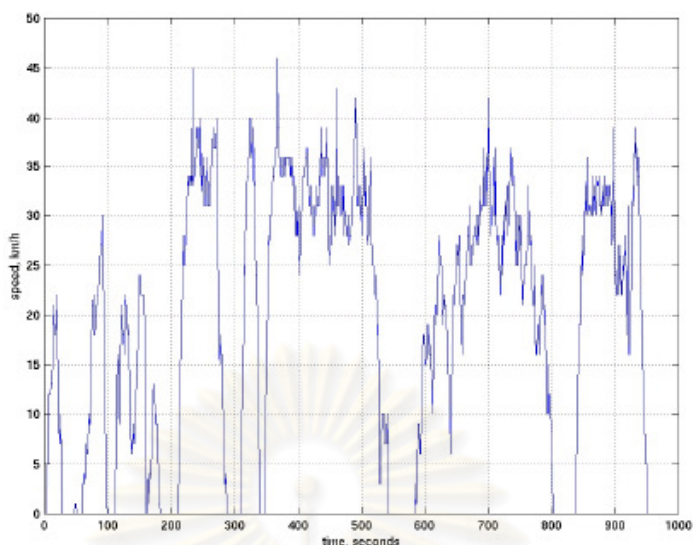
ใช้ทดสอบมลพิษจากยานยนต์ขนาดเล็กในประเทศญี่ปุ่น ความเร็วเฉลี่ย 17.7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็วสูงสุดที่ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เหมาะสมกับการนำมาจำลองกับการขับขี่ในเมืองของยานยนต์ขนาดเล็ก



รูปที่ 4-7 Japan 10-15 mode cycle

4.4.2.5 วัฏจักรขับทดสอบ Taipei motorcycle driving cycle

วัฏจักรขับทดสอบ Taipei motorcycle driving cycle (TMDC) เป็นวัฏจักรขับทดสอบที่พัฒนาขึ้นสำหรับการขับขี่ในเมืองของประเทศไทยได้วัน [17] ซึ่งลักษณะการจราจรของได้วันมีความใกล้เคียงกับกับลักษณะการจราจรของเมืองใหญ่ของประเทศในเอเชีย คือมีความเร็วสูงสุดที่ไม่มากนักแต่มีการหยุดและเร่งบ่อยครั้ง



รูปที่ 4-8 The Taipei Motorcycle Driving Cycle (TMDC)

4.4.2.6 สรุปตัวเลือกของวัฏจักรขับทดสอบ

ตารางที่ 4-2 เปรียบเทียบลักษณะเฉพาะต่างๆ ของวัฏจักรขับทดสอบที่ได้แนะนำข้างต้น โดยจะเห็นได้ว่าวัฏจักร FUDS และ SFUDS เป็นวัฏจักรที่มีความเร็วสูงสุดในระดับสูง พร้อมการเร่งและหน่วงตัวที่ค่อนข้างสูง ซึ่งสอดคล้องกับธรรมชาติของการขับขี่ในประเทศสหรัฐอเมริกา ในขณะที่วัฏจักร ECE-15 และ Japan 10-15 มีความเร็วสูงสุดที่ต่ำพร้อมระดับการเร่งและหน่วงตัวที่ค่อนข้างต่ำ ในขณะที่วัฏจักร TMDC มีความโดดเด่นที่มีระดับการเร่งและหน่วงตัวที่สูงมาก

ตารางที่ 4-2 เปรียบเทียบวัฏจักรขับทดสอบ

	FUDS	SFUDS	ECE-15	Japan 10-15	TMDC
Total time (second)	1372	360	196	140	950
Average speed (km/h)	31.4	30.8	18.5	17	19.3
Maximum speed (km/h)	91.2	87.5	50	40	46
Maximum acceleration (km/h/s)	5.8	5.3	3.5	4	6.4
Maximum deceleration(km/h/s)	-5.3	-5.6	-3.5	-4	-8.6

ในประเทศไทย หน่วยงานที่เป็นผู้รับผิดชอบและใช้ประโยชน์หลักของวิทยุจักรขับทดสอบคือกรมควบคุมมลพิษซึ่งใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบมลพิษจากรถจักรยานยนต์ ในปัจจุบันกรมควบคุมมลพิษใช้วิทยุจักร ECE-15 ในมาตรฐานการทดสอบ โดยถึงแม้จะยังไม่มีการจัดสร้างวิทยุจักรขับทดสอบสำหรับรถจักรยานยนต์เป็นการเฉพาะ แต่ก็มีมุมมองว่าวิทยุจักร TMDC ก็น่าจะให้ลักษณะการขับขี่ที่ใกล้เคียงกับการขับขี่ในกรุงเทพมหานครมากกว่าวิทยุจักร ECE-15 สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิทยุจักร ECE-15 เป็นพื้นฐานในการจำลองระบบขับเคลื่อน โดยจะได้สอดแทรกมุมมองของสมรรถนะจากวิทยุจักร TMDC ไปในบางส่วน ทั้งนี้ก็ด้วยในปัจจุบันยังไม่สามารถหาข้อมูลความเร็วต่อเวลาของวิทยุจักร TMDC ได้

4.5 กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงาน

การควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าในการจำลองระบบนั้นควบคุมตามค่าขนาดของภาระทางไฟฟ้าที่ต้องใช้ขับเคลื่อน และระดับพลังงานที่สะสมอยู่ในแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทุติยภูมิโดยมีแนวคิดการจ่ายพลังงานคือ

- หากกำลังไฟฟ้าที่ต้องการมากกว่าอัตราที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายได้และระดับพลังงานที่สะสมอยู่ในแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทุติยภูมิมีค่าไม่ต่ำกว่าระดับพลังงานที่กำหนดแล้ว กำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่อัตราสูงสุดโดยมีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทุติยภูมิทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าในส่วนที่เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถจะจ่ายได้
- หากกำลังไฟฟ้าที่ต้องการน้อยกว่าอัตราที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายได้และระดับพลังงานที่สะสมอยู่ในแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทุติยภูมิมีค่าไม่ต่ำกว่าระดับพลังงานที่กำหนดแล้ว กำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด แต่หากระดับพลังงานที่สะสมอยู่ในแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทุติยภูมิมีค่าต่ำกว่าระดับพลังงานที่กำหนดแล้ว กำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่อัตราสูงสุด แล้วนำพลังงานส่วนที่เหลือจากเซลล์เชื้อเพลิงมาประจุให้กับแหล่งพลังงานทุติยภูมิ
- ในช่วงที่มีการหยุดหรือชะลอรถ หากระดับพลังงานที่สะสมอยู่ในแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทุติยภูมิมีค่าต่ำกว่าระดับพลังงานที่กำหนดแล้ว กำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงประจุพลังงานไฟฟ้าให้กับแหล่งพลังงาน

ทุติยภูมิ พร้อมกับนำพลังงานที่สูญเสียจากการหยุดรถกับมาประจุให้กับ แหล่งพลังงานทุติยภูมิด้วย

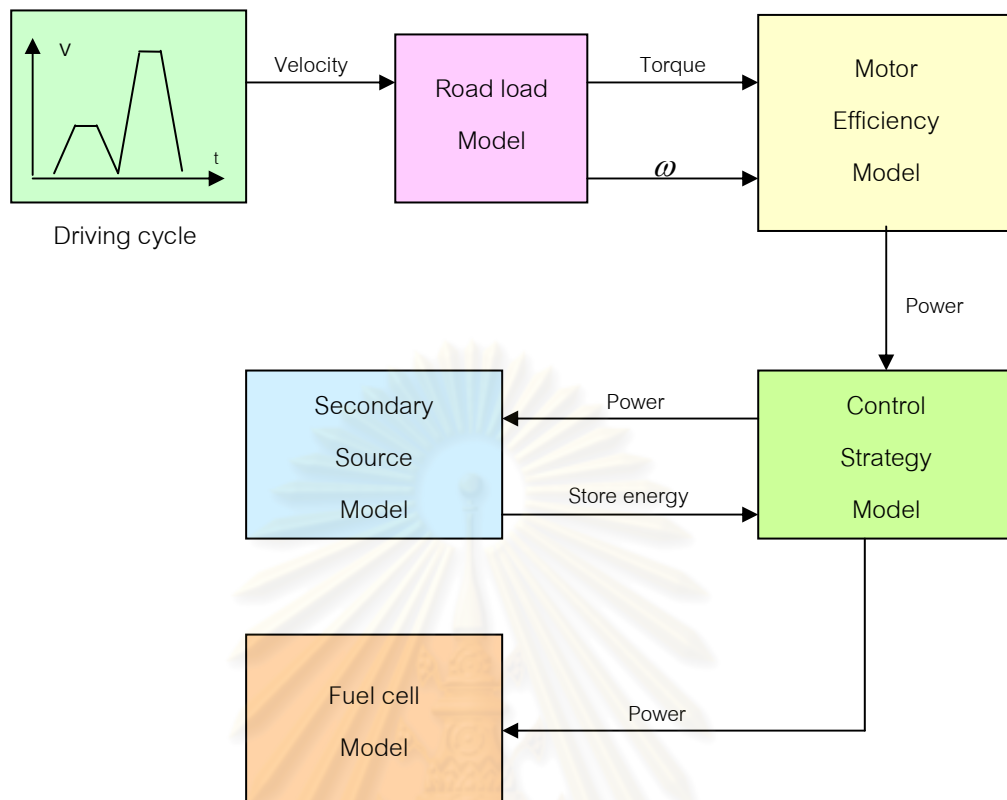
4.6 แนวทางการจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

การจำลองการขับเคลื่อนเพื่อหาค่าภาระหรือการจ่ายพลังงานไฟฟ้านั้นทำได้โดยนำแบบจำลองของแต่ละส่วนประกอบย่อยซึ่งประกอบด้วย

- วัฏจักรขับเคลื่อน
- แบบจำลองภาระที่ใช้ขับเคลื่อน
- แบบจำลองประสิทธิภาพของมอเตอร์
- แบบจำลองการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง
- แบบจำลองการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่
- แบบจำลองการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง
- แบบจำลองของระบบควบคุมการจ่ายพลังงาน

มาประกอบเข้าด้วยกันแล้วคำนวณหาค่าภาระหรือการจ่ายพลังงานที่ต้องการทราบ โดยลักษณะแนวคิดของการประกอบแบบจำลองย่อยต่างๆ แสดงในรูปที่ 4-9 เมื่อได้ผลจากการคำนวณแล้วจะพบว่าตัวแปรต่างๆ ของรถ เช่น อัตราทดเฟือง ขนาดของล้อ หรือขนาดแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่กำหนดในตอนต้นนั้นมีความเหมาะสมเพียงไร จึงสามารถกำหนดตัวแปร หรือกำหนดขนาดของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิได้เหมาะสมมากขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-9 แบบจำลองของระบบขับเคลื่อน

4.7 ผลการศึกษาเบื้องต้น

4.7.1 การกำหนดค่าตัวแปรเบื้องต้นสำหรับจำลองระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าภาระการขับเคลื่อน เพื่อใช้ประกอบการจำลองระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับรถแต่ละแบบ ตารางที่ 4-3 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ในการคำนวณของรถจักรยานยนต์ที่ประมวลมาจากงานวิจัยของ Lin [17] และ English [28]

ตารางที่ 4-3 ค่าตัวแปรในการคำนวณของรถจักรยานยนต์

Vehicle	f_r	C_d	A (m ²)	m (kg)	Auxiliary Power (W)
รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก (Electric scooter)	0.014	0.9	0.6	130	60
รถจักรยาน (Roadster bicycle)	0.008	1.2	0.5	10	0
รถจักรยานยนต์ (Motorcycle)	0.01	0.6	0.8	250	-

ในเบื้องต้นนั้นจะกำหนดตัวแปรในการคำนวณดังตารางที่ 4-4 ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณของรถจักรยานยนต์ขนาดเล็ก ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อและแกนหมุนของมอเตอร์เป็นค่าที่กำหนดไม่ได้ชัดเจนจึงประมาณให้พจน์ $\frac{n_{wh} I_{wh}}{r^2} + \frac{I_m G^2}{r^2}$ มีค่าประมาณร้อยละ 5 [23] ของมวลรถ (m) แล้วกำหนดอัตราทดในเบื้องต้นอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งหลังจากจำลองแบบและได้ผลการคำนวณแล้วจึงสามารถกำหนดค่าต่างๆ ได้ชัดเจนมากขึ้น

สำหรับการขับเคลื่อนจักรยานยนต์ไฟฟ้านั้น การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามอเตอร์ไฟฟ้าจะมีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 6 กิโลวัตต์ โดยรถจักรยานยนต์ขนาด 50 ซีซี มีกำลังขับเคลื่อนระหว่าง 2-4 กิโลวัตต์ ในขณะที่รถขนาด 125 ซีซี มีขนาดระหว่าง 6-9 กิโลวัตต์ [17] อย่างไรก็ตาม เพื่อสมรรถนะที่เทียบเคียงได้ รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องมีระดับกำลังที่เท่ากับกำลังจากเครื่องยนต์ ทั้งนี้ก็ด้วยลักษณะเฉพาะของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดต่อความเร็วรอบดังรูปที่ 3-1 โดยพบว่ารถจักรยานยนต์ไฟฟ้าหรือจักรยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงต่างมีกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าอยู่ที่ไม่เกิน 6 กิโลวัตต์ เป็นส่วนมาก ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดให้ใช้มอเตอร์ขนาดประมาณ 3.5 กิโลวัตต์ ซึ่งโดยธรรมชาติของมอเตอร์ไฟฟ้าจะสามารถทำงานได้ที่กำลังสูงสุดกว่า 5 กิโลวัตต์ ในเวลาจำกัด

ในเบื้องต้นนั้นการจำลองการทำงานของระบบนั้นจะใช้แบบจำลองแบบเตอรีแบบไม่เชิงเส้นในการจำลองการทำงานของแบบเตอรี และใช้แบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูงในหัวข้อที่ 3.3.3.1 และใช้แบบจำลองภาระการขับเคลื่อนในหัวข้อที่ 4.3 และจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB / SIMULINK

ตารางที่ 4-4 ค่าตัวแปรเบื้องต้นในการคำนวณภาระการขับเคลื่อน

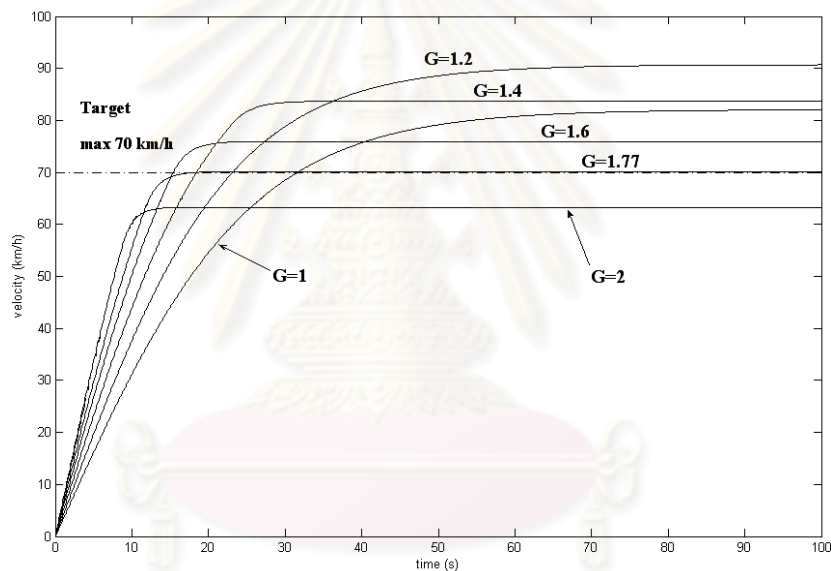
Parameter	
f_r	0.01
C_d	0.75
A	0.6 m^2
$\frac{n_{wh} I_{wh}}{r^2} + \frac{I_m G^2}{r^2}$	$\approx 5\% \text{ of } m$
m	160 kg
r	0.21 m
G	1-2
k_c	1.5
k_i	0.1
k_ω	10^{-5}
Const losses	20 W

4.7.2 ผลการจำลองสมรรถนะ

ในส่วนนี้เป็นการจำลองสมรรถนะการขับเคลื่อนของรถเพื่อตรวจสอบว่ามีสมรรถนะได้ตามที่กำหนดหรือไม่แล้วจึงปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรของลักษณะเฉพาะของรถเพื่อตรวจสอบว่าการปรับเปลี่ยนนั้นทำให้ได้สมรรถนะแตกต่างกันอย่างไร ตัวแปรของลักษณะเฉพาะของรถส่วนใหญ่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้เพราะเป็นตัวแปรที่เป็นเงื่อนไขบังคับของรถ เช่น น้ำหนักของรถ ค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานการกลิ้ง หรือ สัมประสิทธิ์แรงต้านทานของอากาศ เป็นต้น ตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามต้องการได้แก่ อัตราทดเฟือง และขนาดมอเตอร์ ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถออกแบบและสร้างตามค่าที่ต้องการได้ จากการประเมินเบื้องต้นกำหนดให้มอเตอร์ทำงานที่กำลังสูงสุด (Peak load) ที่ 5 กิโลวัตต์ ซึ่งมอเตอร์ขนาด 3.5 กิโลวัตต์ สามารถทำงานที่กำลังดังกล่าวได้ชั่วขณะ

4.7.2.1 ผลการปรับค่าอัตราทดเพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุดที่ 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ผลการปรับค่าอัตราทดเกียร์เพื่อให้ได้สมรรถนะตามข้อที่ 1 ในตารางที่ 4-1 คือให้ความเร็วสูงสุดที่สามารถขับได้คือ 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4-10 โดยค่าอัตราทดที่สามารถทำความเร็วสูงสุดที่ 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง คือ 1.77 โดยที่ค่าอัตราทดสูงจะได้อัตราเร่งที่ดี แต่ความเร็วสูงสุดจะน้อย ในขณะที่ถ้าให้อัตราทดที่ต่ำจะได้อัตราเร่งที่ไม่ดีแต่ความเร็วสูงสุดจะมากขึ้น แต่ถ้าหากให้อัตราทดที่ต่ำเกินไปคือต่ำกว่า 1.22 จะทำให้ความเร็วสูงสุดที่ทำได้ลดลง เนื่องจากที่อัตราทดต่ำเกินไปนั้นแรงบิดที่ขับล้อจะไม่เพียงพอที่จะเร่งความเร็วขึ้นไปได้

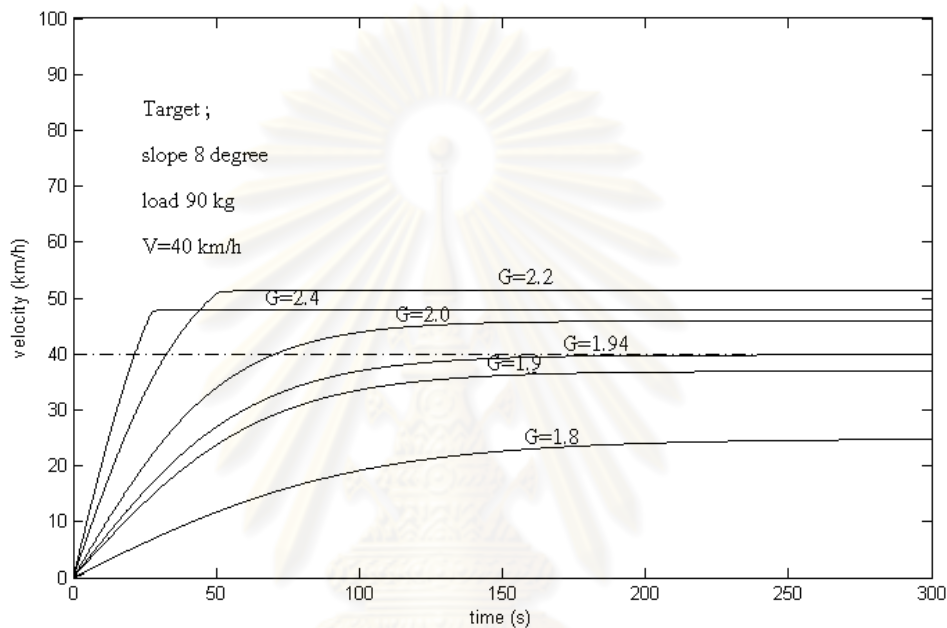


รูปที่ 4-10 ผลการปรับตั้งค่าอัตราทดเพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (G คือ อัตราทดระหว่าง มอเตอร์กับล้อ)

4.7.2.2 ผลการปรับค่าอัตราทดเพื่อให้สามารถขึ้นทางชัน 8° และบรรทุกหนัก 90 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ผลการปรับค่าอัตราทดเกียร์เพื่อให้ได้สมรรถนะตามข้อที่ 2 ในตารางที่ 4-1 คือให้ความเร็วสูงสุดที่ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในขณะที่น้ำหนักบรรทุก 90 กิโลกรัม และถนนมีความลาดชัน 8° แสดงในรูปที่ 4-11 ค่าอัตราทดที่สามารถทำความเร็วสูงสุดที่ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง คือ

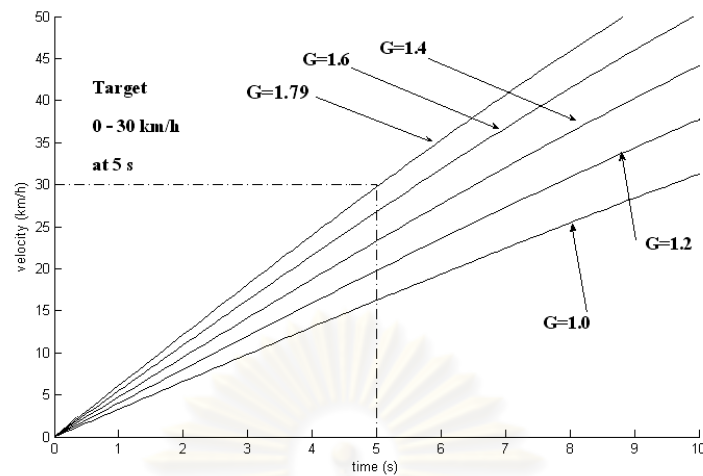
1.94 โดยที่ค่าอัตราทดสูงจะช่วยให้สามารถขึ้นทางลาดชันโดยใช้ความเร็วที่สูงขึ้นได้และสามารถเร่งความเร็วได้มากขึ้น แต่หากใช้อัตราทดที่สูงเกินไปคือเกินกว่า 2.10 จะทำให้ความเร็วสูงสุดที่ได้ลดลง ในขณะที่ถ้าให้อัตราทดที่ต่ำจะทำให้ไม่สามารถขึ้นทางลาดชันด้วยความเร็วสูงได้หรือหากอัตราทดที่ต่ำมากเกินไปคือต่ำกว่า 1.72 จะทำให้ไม่สามารถขึ้นทางชันได้เลย



รูปที่ 4-11 ผลการปรับตั้งค่าอัตราทดเพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
ในขณะที่ขึ้นทางชัน 8° และน้ำหนักบรรทุก 90 กิโลกรัม

4.7.2.3 ผลการปรับค่าอัตราทดเพื่อให้สามารถเร่งความเร็วจาก 0 เป็น 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
ภายใน 5 วินาที

ผลการปรับค่าอัตราทดเกียร์เพื่อให้ได้สมรรถนะตามข้อที่ 3 ในตารางที่ 4-1 คือให้สามารถเร่งความเร็วจาก 0 เป็น 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมงภายใน 5 วินาที แสดงใน รูปที่ 4-12 โดยอัตราทดที่สามารถทำความเร่งได้ตามต้องการคือ 1.79



รูปที่ 4-12 ผลการปรับตั้งค่าอัตราทดเพื่อให้เร่งความเร็วจาก 0 เป็น 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภายใน 5 วินาที

4.7.2.4 ผลการปรับค่าอัตราทดที่เหมาะสม

ตารางที่ 4-5 สรุปอัตราทดที่ทำให้ได้สมรรถนะตามในแต่ละเงื่อนไขที่กำหนดไว้โดยในการเลือกกำหนดค่าอัตราทดที่เหมาะสมนั้นเลือกใช้อัตราทดที่มีการประนีประนอมกันระหว่างทั้งสามเงื่อนไข โดยอาจเป็นอัตราทดที่ทำให้ความเร็วสูงสุดต่ำกว่า 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เล็กน้อยพร้อมกันกับได้อัตราเร่งและการขึ้นทางลาดชันที่ใกล้เคียงกับข้อกำหนด ดังนั้นจึงกำหนดค่าอัตราทดที่ 1.9 ซึ่งสามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับเป้าหมายที่กำหนดไว้ดังแสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-5 อัตราทดที่ทำให้ได้สมรรถนะตามเป้าหมายที่กำหนด

TARGET	Gear ratio
max speed 70 km/h	1.77
Climb (8 deg w/ 90 kg load) at 40 km/h	1.94
5 second to reach 30 km/h	1.79

ตารางที่ 4-6 เปรียบเทียบสมรรถนะที่ทำได้กับเป้าหมาย

	TARGET	Simulation
max speed	70 km/h	66.1 km/h
Climb (8 deg w/ 90 kg load)	40 km/h	36.9 km/h
Time to reach 30 km/h	5 second	4.9 second

4.7.3 ผลการจำลองกับวัฏจักรขับทดสอบ

จากที่ได้จำลองแบบการขับขี่ที่สภาวะคงที่ และปรับค่าลักษณะเฉพาะของรถให้ได้สมรรถนะตามที่กำหนดแล้ว การจำลองแบบส่วนต่อมาก็คือการจำลองแบบโดยใช้วัฏจักรขับทดสอบ โดยสิ่งที่ต้องพิจารณาจากการจำลองแบบโดยวัฏจักรขับทดสอบมีดังนี้

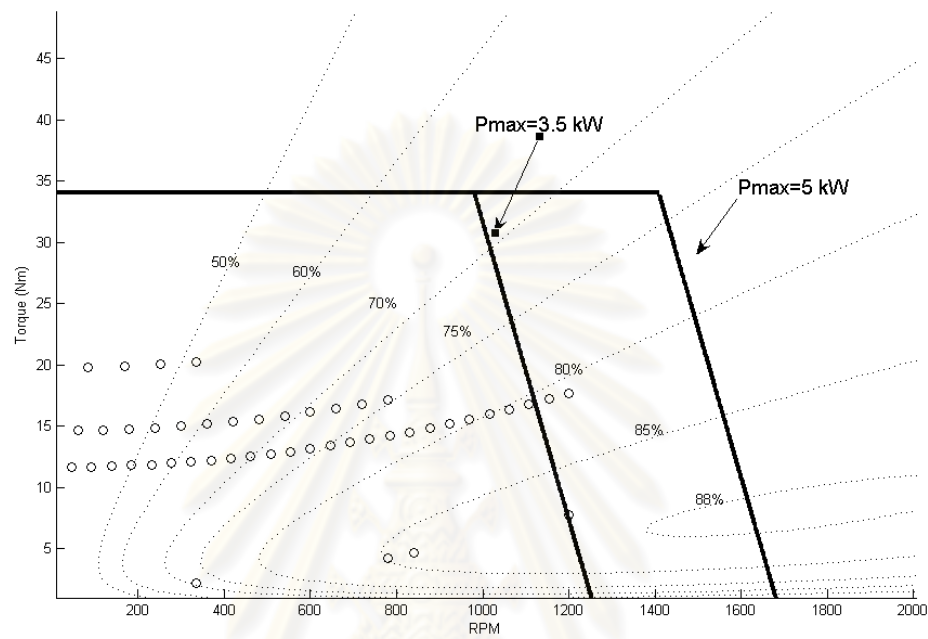
- ตรวจสอบว่ารถมีสมรรถนะเพียงพอต่อการขับขี่ตามวัฏจักรขับทดสอบหรือไม่
- จำลองกำลังที่ต้องใช้ในการขับขี่เพื่อตรวจสอบว่าระบบขับเคลื่อนสามารถให้กำลังตามที่ต้องการได้หรือไม่
- จำลองการจ่ายพลังงานของแหล่งจ่ายต่างๆ เพื่อตรวจสอบการจ่ายพลังงานว่าเพียงพอหรือไม่

การออกแบบในส่วนนี้ ใช้วัฏจักรขับทดสอบแบบ ECE-15 เนื่องจากมีความเหมาะสมกับยานยนต์ที่มีความเร็วและภาระต่ำ และในประเทศไทยใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบมลพิษจากรถจักรยานยนต์

4.7.3.1 การพิจารณาจุดทำงานของมอเตอร์

การพิจารณาจุดทำงานของมอเตอร์กับการขับขี่ตามวัฏจักรนั้นเพื่อตรวจสอบว่าแต่ละช่วงเวลาของการขับขี่ตามวัฏจักรขับทดสอบนั้นมอเตอร์จะทำงานที่แรงบิดและความเร็วรอบในช่วงการทำงานที่มอเตอร์สามารถทำได้หรือไม่และอยู่ในช่วงที่มีประสิทธิภาพมอเตอร์เป็นอย่างไร ผลการจำลองจากวัฏจักรขับทดสอบแสดงในรูปที่ 4-13 จุดทำงานของมอเตอร์ตลอดวัฏจักรขับทดสอบแสดงโดยเครื่องหมายวงกลม กรอบการทำงานของมอเตอร์แสดงโดยเส้นหนาที่

3.5 กิโลวัตต์ และที่ 5 กิโลวัตต์ และเส้นแสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์ในช่วงการทำงานแสดงโดยเส้นไขปลา

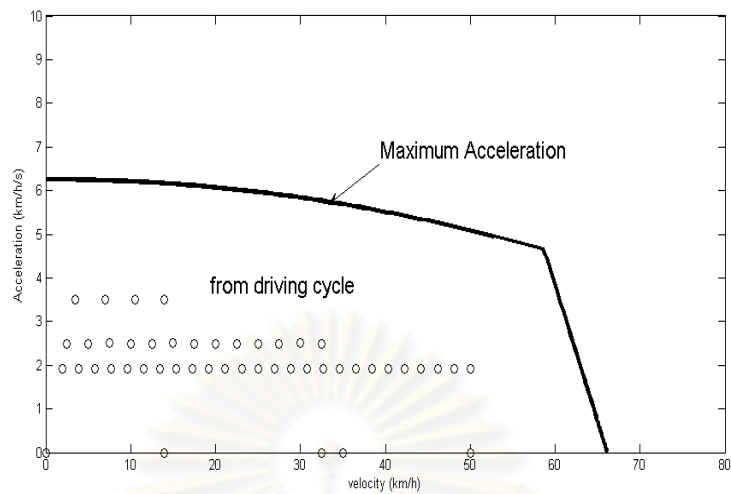


รูปที่ 4-13 จุดทำงานของมอเตอร์ตลอดวัฏจักรขับทดสอบ

เมื่อพิจารณาจุดทำงานของมอเตอร์ตลอดวัฏจักรขับทดสอบในรูปที่ 4-13 เห็นได้ว่าอยู่ในช่วงที่มอเตอร์สามารถทำงานได้ แต่เป็นจุดที่ประสิทธิภาพยังไม่ดีนักซึ่งหากเพิ่มอัตราทดจาก 1.9 เป็นอัตราทดที่สูงขึ้นจะช่วยให้จุดการทำงานมาอยู่ในช่วงที่มีความเร็วรอบสูงขึ้นแต่ให้แรงบิดลดลง ซึ่งเป็นจุดที่มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น แต่การเพิ่มอัตราทดมากขึ้นจะมีผลทำให้ความเร็วสูงสุดที่ขับเคลื่อนได้ลดลงอย่างมากดังรูปที่ 4-10 จึงยังคงใช้อัตราทดเดิมคือ 1.9

4.7.3.2 การพิจารณาความสามารถในการเร่ง

การพิจารณาความสามารถในการเร่งคือการตรวจสอบว่าการขับขึ้นตามวัฏจักรขับทดสอบนั้นรถมีสมรรถนะในการเร่งได้เพียงพอต่อการขับขึ้นตามวัฏจักรขับทดสอบหรือไม่ รูปที่ 4-14 แสดงความสามารถในการเร่งสูงสุดที่ความเร็วต่างๆ (เส้นทึบ) และความเร่งที่ใช้ตามวัฏจักรขับทดสอบ (วงกลม)

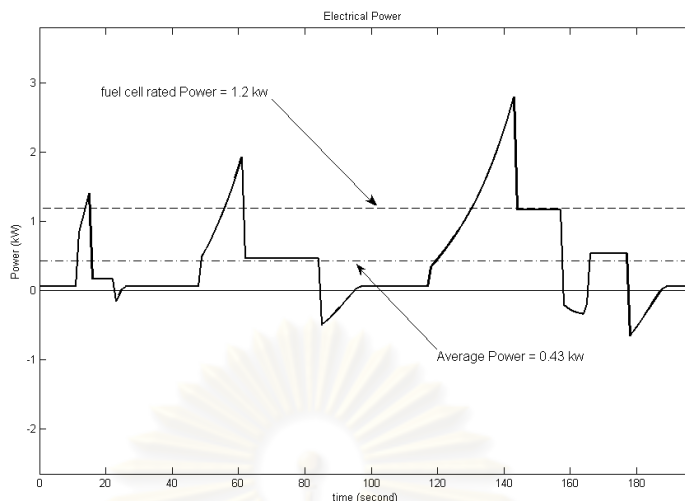


รูปที่ 4-14 ความสามารถในการเร่งสูงสุดที่ความเร็วต่างๆ

จากรูปที่ 4-14 แสดงให้เห็นว่ารถมีสมรรถนะในการเร่งที่ความเร็วต่างๆ ได้เพียงพอต่อการขับขี่ตามวัฏจักรขับทดสอบ

4.7.3.3 ผลการใช้กำลังไฟฟ้า

การพิจารณาการใช้กำลังไฟฟ้านั้นเป็นการพิจารณาในเบื้องต้นว่าการขับขี่ตามวัฏจักรขับทดสอบนั้นใช้กำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ เป็นอย่างไรและพิจารณาในเชิงของพลังงานด้วยว่า เซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายพลังงานได้เพียงพอหรือไม่ โดยรูปที่ 4-15 แสดงผลการใช้กำลังไฟฟ้าตามวัฏจักรขับทดสอบซึ่งคำนวณได้จากแบบจำลองภาระการขับเคลื่อนในหัวข้อที่ 4.6



รูปที่ 4-15 ผลการใช้กำลังไฟฟ้าตามวัฏจักรขับทดสอบ

จากรูปที่ 4-15 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการในการขับเคลื่อนนั้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.43 กิโลวัตต์ คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าตลอดวัฏจักรขับทดสอบ 0.023 กิโลวัตต์-ชั่วโมงซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานสูงสุดได้ที่ 1.2 กิโลวัตต์ คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าตลอดวัฏจักรขับทดสอบ 0.065 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ดังนั้นหากคิดในเชิงของพลังงานแล้ว เซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายพลังงานได้เพียงพอต่อการขับชี้ แต่กำลังไฟฟ้าที่ต้องการในการขับเคลื่อนในแต่ละช่วงเวลานั้นแตกต่างกัน ซึ่งพบว่ามีบางช่วงเวลาที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงโดยกำลังไฟฟ้ามียุคสูงสุดที่ 2.79 กิโลวัตต์ ซึ่งมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายได้ หากใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานเพียงชุดเดียว ยานยนต์ย่อมจะมีสมรรถนะต่ำ และไม่สามารถขับชี้ได้ตามวัฏจักรขับทดสอบที่กำหนดได้ หากต้องการให้มีความสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างเพียงพอต่อความต้องการแล้วจำเป็นจะต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งอื่นเข้ามาช่วยในการทำงานในรูปแบบของระบบไฮบริด และการกำหนดขนาดของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทุติยภูมิก็ต้องคำนึงถึงขนาดและน้ำหนักจริงของแหล่งจ่ายที่เลือกใช้ด้วย

4.7.3.4 การกำหนดขนาดเบื้องต้นของแหล่งพลังงานทุติยภูมิ

ในเบื้องต้นได้พิจารณาเลือกใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าคือ 1) ใช้ชุดเก็บประจุความจุสูงร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง และ 2) ใช้แบตเตอรี่ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง โดยกำหนดขนาดของชุดเก็บประจุความจุสูงและแบตเตอรี่ในเบื้องต้นดังตารางที่ 4-7 และตารางที่ 4-8

สำหรับชุดเก็บประจุความจุสูงนั้น ถูกกำหนดขนาดเบื้องต้นโดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ LaVen [18] ซึ่งออกแบบรถจักรยานยนต์เพื่อตอบสนองการขับขี่กับวัฏจักรการขับขี่ TMDC ทำให้คาดหวังได้ว่าจะได้ขนาดที่ตอบสนองสมรรถนะการขับขี่ที่ดี โดยในงานวิจัยดังกล่าวใช้ชุดเก็บประจุความจุสูงที่ประกอบด้วยหน่วยชุดเก็บประจุความจุสูงจำนวน 14 หน่วยที่ขนาดความจุ 1000 ฟารัด ต่อหน่วยมาต่ออนุกรมกัน สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ใช้การต่อในลักษณะเดียวกันเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 36.8 โวลต์ ซึ่งเหมาะสมกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ แต่ในที่นี้ เพื่อระดับพลังงานที่สูงขึ้น จึงกำหนดให้หน่วยชุดเก็บประจุความจุสูงมีขนาด 1500 ฟารัด

สำหรับแบตเตอรี่นั้น กำหนดขนาดเบื้องต้นให้เป็นแบตเตอรี่ขนาดเล็กแบบที่ใช้ทั่วไปในรถจักรยานยนต์ แต่มีการต่ออนุกรมกันสามลูกเพื่อให้ได้แรงดันรวมเพียงพอต่อการขับเคลื่อนและเป็นแบตเตอรี่ที่สามารถหาได้ง่าย และราคาไม่สูงนัก

อย่างไรก็ตามขนาดแหล่งจ่ายพลังงานที่กำหนดในหัวข้อนี้เป็นเพียงการกำหนดเบื้องต้นโดยอาศัยข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้งานระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด ในบทต่อไปได้กำหนดขนาดของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิและการจัดวางให้เหมาะสมมากขึ้นโดยจะคำนึงถึงปัจจัยในด้านต่างๆ เพิ่มเติมดังจะกล่าวในบทที่ 5 และ 6

ตารางที่ 4-7 ค่าตัวแปรของการคำนวณชุดเก็บประจุความจุสูง

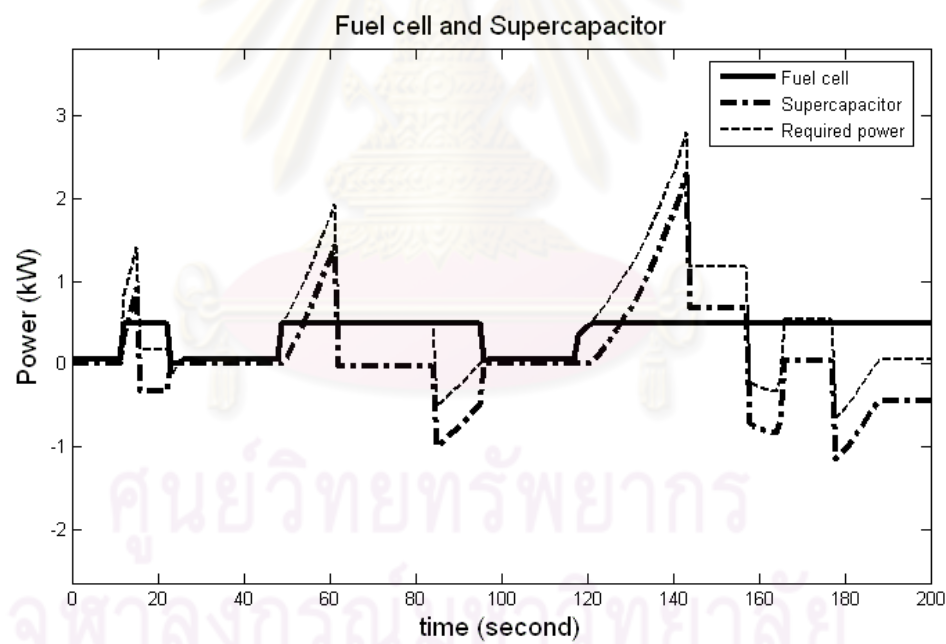
Parameter	
Maximum Voltage per cell	2.7 V
Capacitance per cell	1500 Farad
Number of cell	14
Internal Series Resistance per cell	0.63 m Ω
Limited Minimum Voltage per cell	0.5 x Maximum Voltage per cell

ตารางที่ 4-8 ค่าตัวแปรของการคำนวณแบตเตอรี่

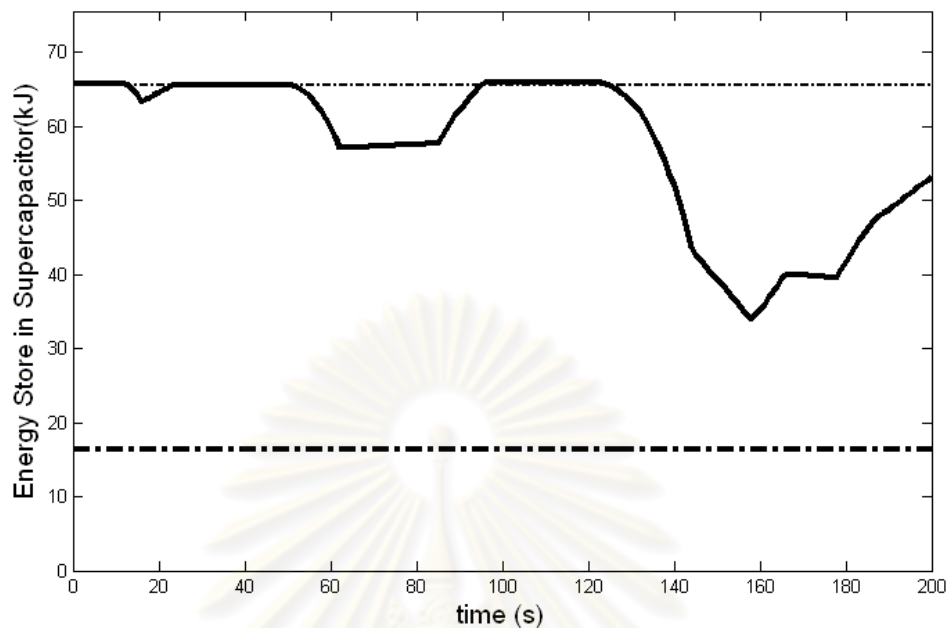
Parameter	
Voltage per cell	2.15 V at SOC=100%
Capacity	20 Ah at rate 10 h
Number of pack of battery	3
Maximum current	2-5 Capacity

4.7.3.5 ผลการจำลองการจ่ายพลังงานของระบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุ ความจุสูง

ผลการจำลองการจ่ายพลังงานของระบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูงดังรูปที่ 4-16 และผลการจำลองระดับพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูงดังรูปที่ 4-17 แสดงให้เห็นว่าระบบดังกล่าวสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอตามวัฏจักรขับทดสอบ ซึ่งเห็นได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงสามารถถูกกำหนดให้จ่ายภาระเฉลี่ยคือประมาณ 0.5 กิโลวัตต์ และชุดเก็บประจุความจุสูงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เกินกว่าที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายได้อย่างเพียงพอ รวมถึงสามารถรับพลังงานไฟฟ้ากลับมาเก็บได้ในขณะที่มีภาระต่ำ ซึ่งสังเกตได้จากระดับพลังงานในรูปที่ 4-17 ผลการจำลองดังกล่าวนี้ช่วยสร้างความมั่นใจได้ว่า การนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้เป็นแหล่งพลังงานร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูงสำหรับระบบขับเคลื่อนในรถจักรยานยนต์นั้นมีความเป็นไปได้ในเชิงพลังงาน



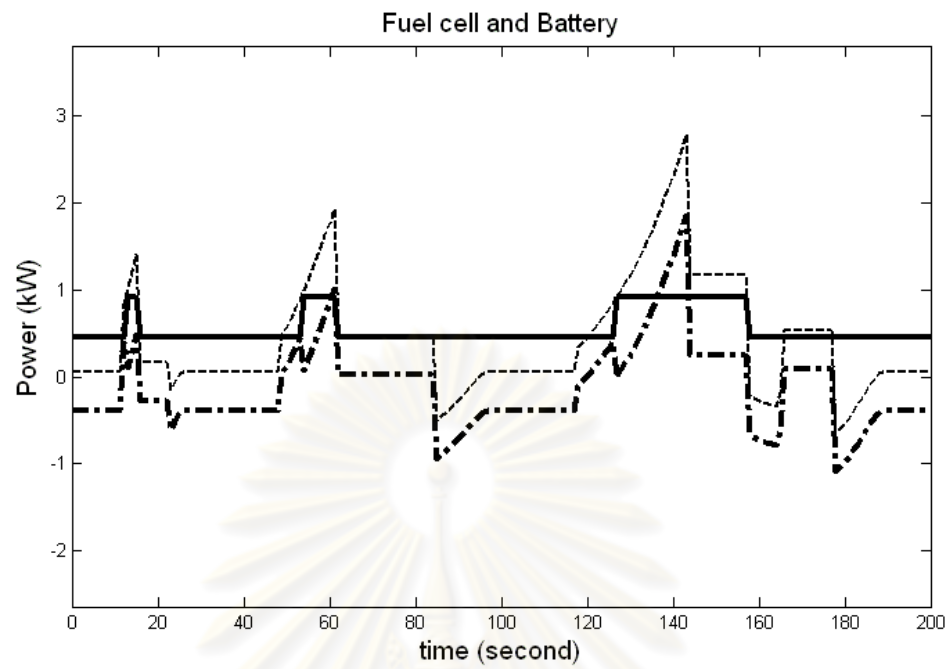
รูปที่ 4-16 ผลการจำลองการจ่ายพลังงานของระบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุ
ความจุสูง



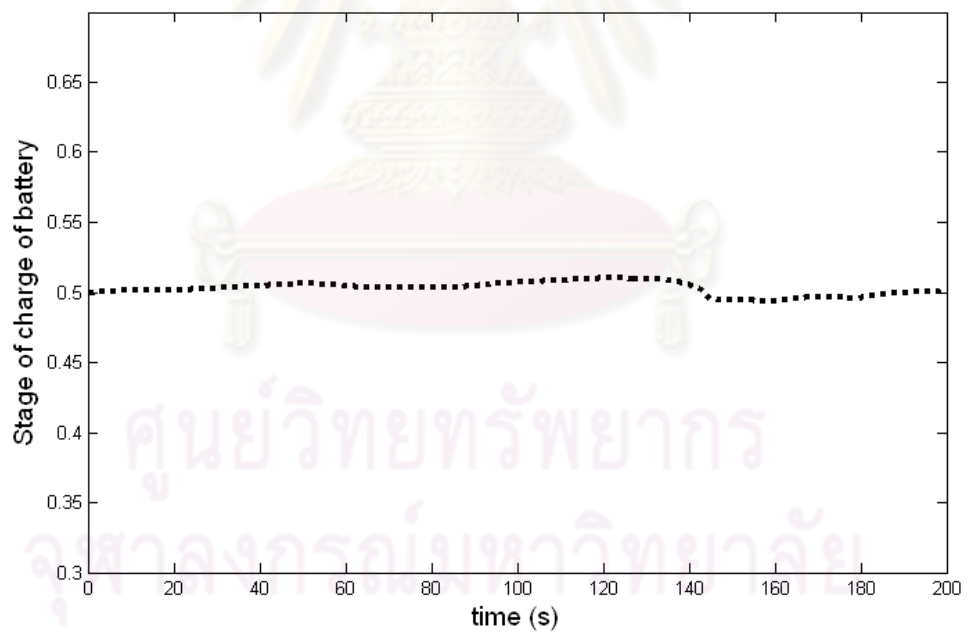
รูปที่ 4-17 ผลการจำลองระดับพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูง

4.7.3.6 ผลการจำลองการจ่ายพลังงานของระบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่

การจำลองการจ่ายพลังงานของระบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ดังรูปที่ 4-18 และผลการจำลองระดับการประจุของแบตเตอรี่ดังรูปที่ 4-19 แสดงให้เห็นความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าตามวัฏจักรขับทดสอบได้อย่างเพียงพอเช่นกัน โดยเซลล์เชื้อเพลิงถูกกำหนดให้จ่ายกำลังไฟฟ้าตามภาระเฉลี่ยและแบตเตอรี่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เกินจากเซลล์เชื้อเพลิงได้เพียงพอ และสามารถรับพลังงานไฟฟ้ากลับมาเก็บได้ในขณะที่มีภาระต่ำเช่นกัน ซึ่งจากผลการจำลองนี้ช่วยสร้างความมั่นใจได้เช่นกันว่า การนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้เป็นแหล่งพลังงานร่วมกับแบตเตอรี่สำหรับระบบขับเคลื่อนในรถจักรยานยนต์นั้นมีความเป็นไปได้ในเชิงพลังงานเช่นกัน



รูปที่ 4-18 ผลการจำลองการจ่ายพลังงานของระบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่



รูปที่ 4-19 ผลการจำลองระดับการประจุของแบตเตอรี่

4.7.4 สรุปผลการศึกษาเบื้องต้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนสามารถแสดงสมรรถนะการขับเคลื่อน เช่น การเร่ง การขึ้นทางชัน และความเร็วสูงสุด และช่วยในการออกแบบและกำหนดพารามิเตอร์การออกแบบได้อย่างเหมาะสม และได้วิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการใช้งานระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ โดยประเมินจากค่าภาระการขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับ ผลการจำลองยืนยันถึงความจำเป็นของระบบไฮบริด พร้อมกับแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในเชิงพลังงานของการใช้เซลล์เชื้อเพลิงมาใช้เป็นแหล่งพลังงานร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิ ซึ่งได้แก่ ชุดเก็บประจุความจุสูง และแบตเตอรี่ ให้แก่ระบบขับเคลื่อนในรถจักรยานยนต์



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การทดสอบและการจำลองอุปกรณ์

การออกแบบและติดตั้งระบบขับเคลื่อนนั้นจำเป็นต้องอาศัยองค์ความรู้เกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบเป็นอย่างดี ซึ่งได้แก่ ความรู้เกี่ยวกับข้อพิจารณาในการใช้งานอุปกรณ์ ความรู้ในด้านลักษณะเฉพาะในการทำงานของอุปกรณ์ ข้อควรระวังในด้านความปลอดภัย รวมถึงสามารถทำนายการทำงานของอุปกรณ์ได้ ดังนั้นเพื่อสร้างองค์ความรู้ดังกล่าวนี้ ในบทนี้จึงเป็นการทดสอบอุปกรณ์และนำผลทดสอบที่ได้มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง เพื่อเรียนรู้คุณลักษณะต่างๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ และสามารถทำนายการทำงานของ และสุดท้ายเป็นการทดสอบเพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลองที่สร้างขึ้น

5.1 การทดสอบและการจำลองเซลล์เชื้อเพลิง

5.1.1 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง

การสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ ซึ่งจะแตกต่างกันออกไปตามแต่วัตถุประสงค์ของการนำมาใช้งาน เช่น Friede และคณะ [29] ได้เสนอแบบจำลองที่ใช้สมการเชิงอนุพันธ์ทางไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์เชื้อเพลิง และงานของ Garniew และคณะ [30] ก็สร้างแบบจำลองโดยใช้พื้นฐานของสมการทางไฟฟ้าเคมีเช่นกัน นอกจากนี้ Choi และคณะ [31] ได้เสนอแบบจำลองอีกรูปแบบหนึ่งโดยการสร้างวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าโดยใช้ Frequency response analysis นอกจากนี้ Hou และคณะ [32] ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองเชิงประจักษ์ในสถานะไม่คงตัว

จากเป้าหมายของการสร้างแบบจำลองดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น ในงานนี้จึงพิจารณาว่าแบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical model) ซึ่งใช้การทดสอบในรูปแบบต่างๆ กับเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อสร้างเป็นแบบจำลองนั้นมีความเหมาะสม และให้ความแม่นยำเพียงพอ โดยจะละในส่วนของสถานะไม่คงที่เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ และจากการทดสอบพบว่าแบบจำลองสถานะคงที่ก็ให้ผลที่แม่นยำเพียงพอในสถานะการทำงานที่กำหนดดังจะแสดงต่อไป การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงจะทำการทดสอบบนพื้นฐานของสถานะคงที่ โดยจะประกอบไปด้วย 1) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าต่อการจ่ายกระแสไฟฟ้า 2) การทดสอบเพื่อหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อการจ่าย

กระแสไฟฟ้า 3) ประสิทธิภาพต่อการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาสร้างเป็นแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายการทำงานที่สภาวะต่างๆ ได้

5.1.2 การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

เพื่อการทดสอบนี้ชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 5-1 ได้ถูกจัดเตรียมขึ้นซึ่งประกอบไปด้วย 1) ชุดรับภาระทางไฟฟ้า (Electronics load) ทำหน้าที่ในการจำลองค่าภาระในรูปแบบต่างๆ ให้แก่แหล่งจ่ายพลังงานที่นำมาทดสอบ 2) ระบบตรวจวัดอัตโนมัติ ใช้เก็บค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในตำแหน่งที่ต้องการซึ่งสามารถเชื่อมต่อข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม Labview โดยรายละเอียดของอุปกรณ์การวัดได้แสดงในภาคผนวก 3) แหล่งจ่ายพลังงานที่ต้องการทดสอบซึ่งในหัวข้อนี้คือเซลล์เชื้อเพลิง



ระบบตรวจวัดอัตโนมัติ

รูปที่ 5-1 ชุดทดสอบแหล่งจ่ายพลังงาน

การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในส่วนแรกที่จะพิจารณาคือการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ เพื่อสร้างแผนภาพระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า Polarization curve โดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้าในการกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ค่าต่างๆ ตลอดช่วงการทำงานตั้งแต่ศูนย์ไปจนถึงค่าภาระสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถจ่ายได้ โดยในแต่ละค่ากระแสไฟฟ้าที่กำหนดนั้น ได้เก็บค่าแรงดันไฟฟ้าและอัตราการใช้เชื้อเพลิงในขณะที่การทำงานเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าได้จากผลคูณของแรงดันที่วัดได้กับกระแสไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้านั้นสามารถแยกออกเป็น 2 ตำแหน่งการวัดคือ 1)

คำนวณจากการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากแผงเซลล์เชื้อเพลิง (Stack) ซึ่งสามารถเก็บค่าได้โดยใช้ซอฟต์แวร์เชื่อมต่อจากผู้ผลิตเซลล์เชื้อเพลิง และ 2) คำนวณจากการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ทางออกของชุดเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งสามารถเก็บค่าได้โดยใช้ระบบตรวจวัดอัตโนมัติ ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสุทธิที่วัดจากทางออกนี้จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้จากแผงเซลล์เชื้อเพลิง เพราะกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะต้องสูญเสียไปกับการทำงานของอุปกรณ์ภายในเซลล์เชื้อเพลิง ในส่วนของค่าประสิทธิภาพที่ค่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ สามารถแยกออกเป็นสองตำแหน่งการวัด เช่นเดียวกันกับค่ากำลังไฟฟ้าโดยคำนวณได้ดังสมการที่ 5-1 และ 5-2

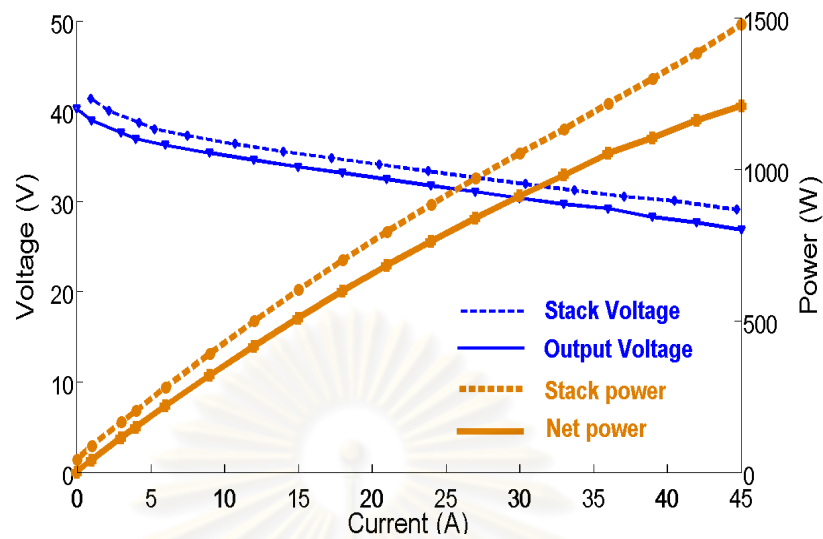
$$\eta_{stack,FC} = \frac{P_{stack,FC}}{\dot{N}(LHV)} \quad (5-1)$$

$$\eta_{out,FC} = \frac{P_{out,FC}}{\dot{N}(LHV)} \quad (5-2)$$

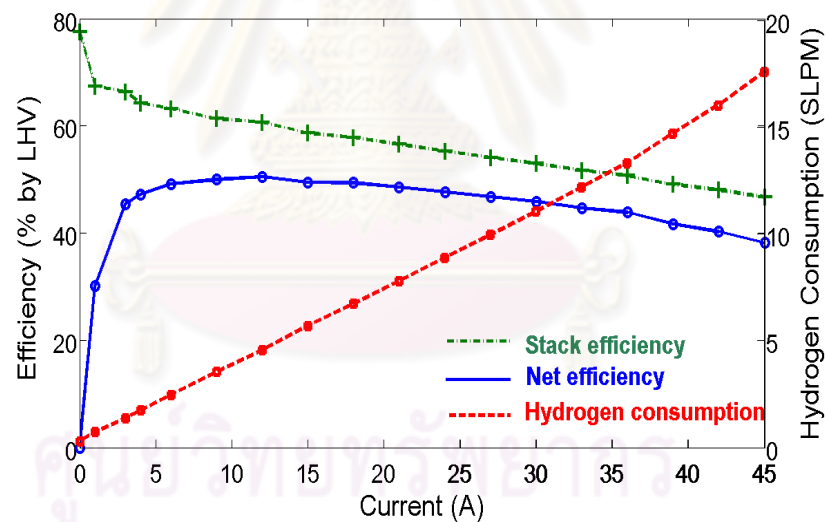
โดย

$\eta_{stack,FC}, \eta_{out,FC}$	คือ	ประสิทธิภาพของแผงเซลล์เชื้อเพลิงและประสิทธิภาพสุทธิ
$P_{stack,FC}, P_{out,FC}$	คือ	กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์เชื้อเพลิงและกำลังไฟฟ้าสุทธิ
\dot{N}	คือ	อัตราการใช้เชื้อเพลิงเชิงโมล (โมลต่อวินาที)
LHV	คือ	ค่าความร้อนต่ำของการทำปฏิกิริยาของก๊าซเชื้อเพลิงต่อโมล (241.8×10^3 จูลต่อโมล)

ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้าต่างๆ ทั้งสองตำแหน่งการวัดแสดงในรูปที่ 5-2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงให้กำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์เชื้อเพลิงได้สูงสุดที่ 1.5 กิโลวัตต์ และให้กำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุด 1.2 กิโลวัตต์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ระบุจากผู้ผลิต และผลการทดสอบอัตราการใช้เชื้อเพลิงและประสิทธิภาพในรูปที่ 5-3 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพสุทธิสูงสุดของชุดเซลล์เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าสูงถึงกว่า 50% ที่กำลังสุทธิ 0.5 กิโลวัตต์ และอัตราการใช้เชื้อเพลิงมีมากขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยมีค่าสูงสุดที่ 17.6 Standard liters per minute (SLPM)



รูปที่ 5-2 Polarization curve ของเซลล์เชื้อเพลิง

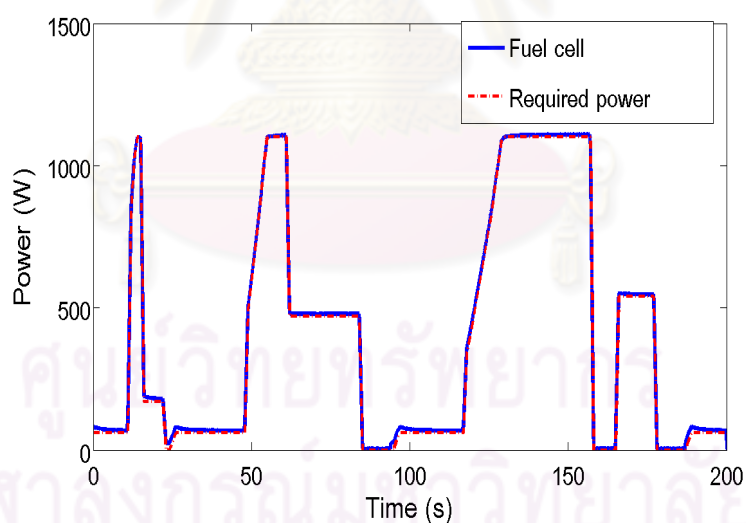


รูปที่ 5-3 อัตราการใช้เชื้อเพลิงและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

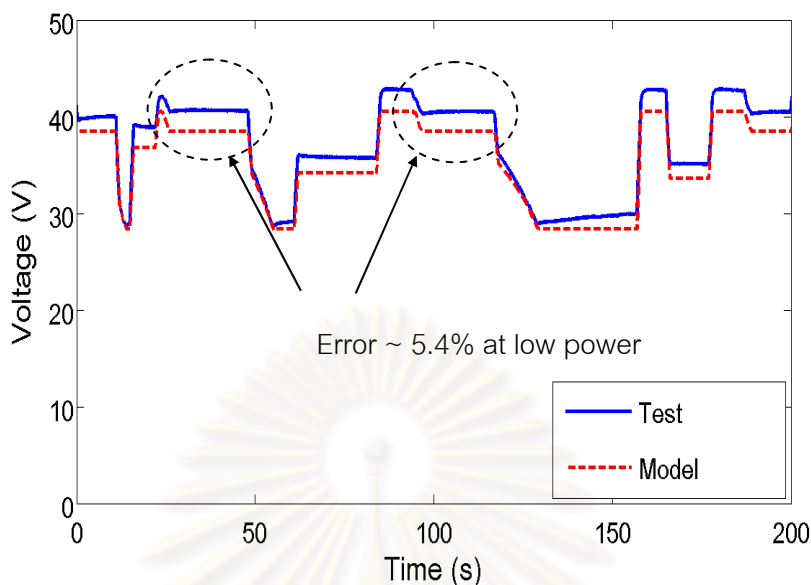
5.1.3 การประเมินแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง

หลังจากที่ได้ผลการทดสอบดังที่แสดงในหัวข้อที่ 5.1.2 สามารถนำผลแรงดันไฟฟ้าและอัตราการใช้เชื้อเพลิงจากการทดสอบที่สภาวะคงที่ดังกล่าวมาสร้างเป็นแบบจำลองการจ่ายพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ และจากนั้นได้ประเมินความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้การ

เปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดสอบจริงที่กำหนดให้มีการทำงานแบบเป็นวัฏจักร ซึ่งวัฏจักรที่ใช้นั้นคำนวณจากกำลังขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 ซึ่งเป็นวัฏจักรขับทดสอบที่ถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของการขับขี่ในเมือง แต่ในการทดสอบนั้นได้จำกัดค่าภาระสูงสุดที่ 1200 วัตต์ ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายได้โดยไม่เกิดความเสียหายแก่ตัวเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้แล้วการทดสอบแบบเป็นวัฏจักรยังสามารถบ่งชี้ถึงความสามารถในการตอบสนองต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงว่าตอบสนองได้รวดเร็วหรือไม่ รูปที่ 5-4 แสดงกำลังไฟฟ้าที่กำหนดผ่านชุดรับภาระทางไฟฟ้าควบคู่กับกำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายออกมา พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าตามความต้องการได้อย่างรวดเร็ว และรูปที่ 5-5 แสดงผลการทำนายแรงดันไฟฟ้าด้วยแบบจำลองจากผลการวัดการทำงานที่สภาวะคงตัวเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากการทำงานแบบเป็นวัฏจักร พบว่าการทำนายค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่ผิดพลาดสูงสุดเพียง 5.4 % ในช่วงที่ภาระต่ำ ในส่วนของการทำนายปริมาณการใช้เชื้อเพลิงตามการทำงานเป็นวัฏจักร พบว่าผลการทำนายที่ได้มีค่าผิดพลาดจากการวัดจริงเพียง 3.4 %



รูปที่ 5-4 การจ่ายกำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงตามวัฏจักรขับทดสอบ



รูปที่ 5-5 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองแรงดันไฟฟ้ากับค่าที่วัดได้จริงของเซลล์เชื้อเพลิง

จากการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงและผลการสอบทวนแบบจำลองดังกล่าวนั้น สามารถกล่าวได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่นำมาใช้นั้นสามารถตอบสนองต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วเพียงพอสำหรับนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับยานยนต์ และแบบจำลองแบบสภาวะคงตัวสามารถใช้ทำนายสมรรถนะการจ่ายกำลังไฟฟ้าและระดับแรงดันไฟฟ้ารวมถึงปริมาณการใช้เชื้อเพลิงสำหรับการทำงานเป็นวัฏจักรได้อย่างแม่นยำ

5.2 การทดสอบและการจำลองแบตเตอรี่

5.2.1 แบบจำลองแบตเตอรี่

แบบจำลองของแบตเตอรี่นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ ตั้งแต่แบบจำลองอย่างง่ายไปจนถึงแบบจำลองที่มีความซับซ้อน ได้แก่ 1) แบบจำลองแบบจำลองแบบความต้านทานภายใน 2) แบบจำลองธีวีเนิน (Thevenin battery model) 3) แบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (Resistance-Capacitance model) และ 4) แบบจำลองแบบมูลฐาน (Fundamental model) แบบจำลองแบบที่หนึ่งถึงสามสร้างจากการทดสอบการทำงานของแบตเตอรี่ (Empirical) ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองดังกล่าวจะสามารถใช้ได้ดีเฉพาะกับแบตเตอรี่ชนิด

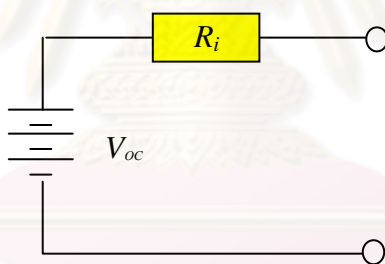
และขนาดนั้นๆ ที่นำมาทดสอบ แบบจำลองแบบที่ 4 เป็นแบบจำลองที่ศึกษาถึงปฏิริยาเคมีภายในแบตเตอรี่

5.2.1.1 แบบจำลองแบบความต้านทานภายใน

แบบจำลองแบบความต้านทานภายในประกอบด้วยวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าซึ่งมีอุปกรณ์อยู่สองส่วนคือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (V_{oc}) ซึ่งเทียบเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่ และตัวต้านทาน (R_i) ซึ่งเทียบเท่ากับค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ดัง

รูปที่ 5-6

แบบจำลองแบบความต้านทานภายในแบ่งออกเป็นสองแบบคือ 1) แบบเชิงเส้นซึ่งก็คือแบบจำลองที่ให้ค่าความต้านทานภายในคงที่ตลอดช่วงการทำงาน และ 2) แบบไม่เชิงเส้นซึ่งก็คือแบบจำลองที่ให้ค่าความต้านทานภายในแปรเปลี่ยนตามระดับการประจุ



รูปที่ 5-6 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าในแบบจำลองแบบความต้านทานภายใน

5.2.1.1.1 แบบจำลองแบบความต้านทานภายในแบบเชิงเส้น

แบบจำลองแบบความต้านทานภายในแบบเชิงเส้นเป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุดโดยกำหนดให้ค่าความต้านทานภายในเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่งตลอดช่วงการทำงาน แต่กำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรแปรเปลี่ยนตามระดับการประจุ ($V_{oc} = f(SOC)$) ค่าระดับการประจุเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงระดับพลังงานที่เหลืออยู่ของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของประจุที่จ่ายออกไปต่อค่าความจุของแบตเตอรี่อย่างไรก็ตามค่าความจุของแบตเตอรี่นั้นขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่จ่าย ($C = f(I)$) ดังนั้นระดับการประจุจึงแสดงได้โดยสมการที่ (5-3)

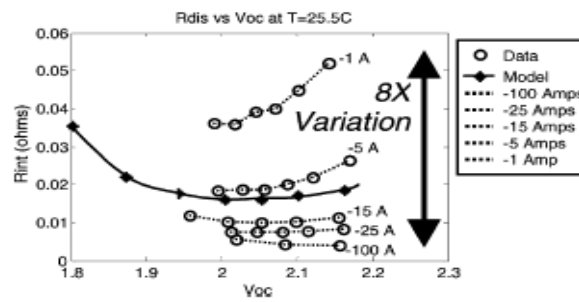
$$SOC = SOC_0 - \int_{t_0}^t \frac{I(t)}{C(I)} dt \quad (5-3)$$

แบบจำลองแบบความต้านทานภายในแบบเชิงเส้นนั้นสามารถนำมาใช้ได้โดยง่าย เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองมีเพียงสองพารามิเตอร์รวมถึงค่าความต้านทานภายใน เป็นค่าคงที่ แต่จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่นั้นไม่คงที่แต่เป็นค่าที่ ขึ้นอยู่กับค่าระดับการประจุ กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ดังนั้นเพื่อให้ผลการทำนายมีความแม่นยำ มากขึ้นจึงนำมาสู่แบบจำลองแบบความต้านทานภายในแบบไม่เชิงเส้นในหัวข้อถัดไป

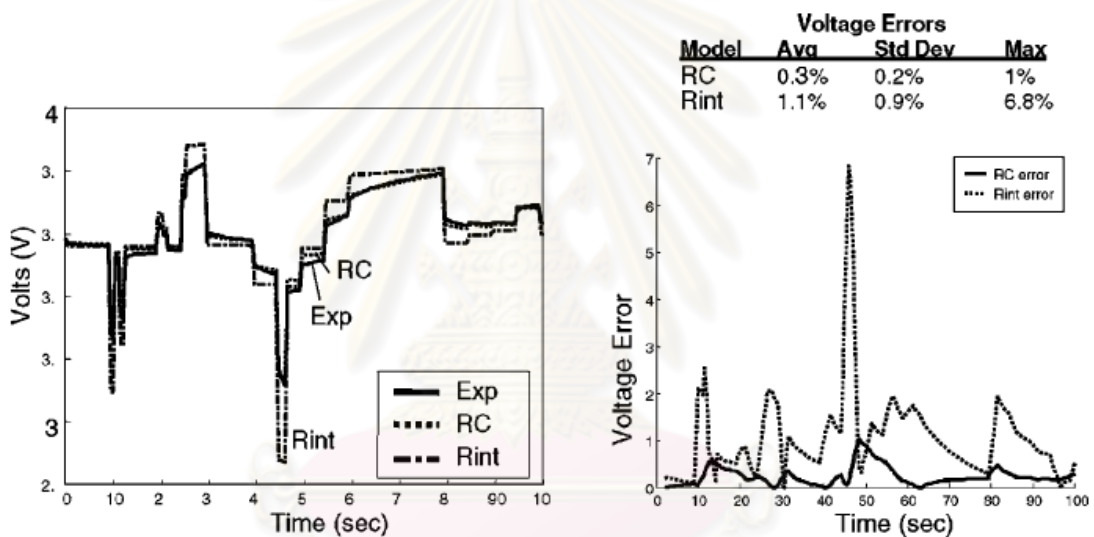
5.2.1.1.2 แบบจำลองแบบความต้านทานภายในแบบไม่เชิงเส้น

แบบจำลองแบบความต้านทานภายในแบบไม่เชิงเส้นนั้นประกอบด้วยอุปกรณ์ภายใน วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าเช่นเดียวกับแบบจำลองแบบความต้านทานภายในแบบเชิงเส้น แต่ได้รวมเอา ผลของระดับการประจุ และอุณหภูมิต่อความต้านทานภายใน ($R_i = f(SOC, T)$) เข้าไว้ใน แบบจำลอง ดังนั้นแบบจำลองจึงแสดงผลการทำนายได้สอดคล้องกับความเป็นจริงมากขึ้น แต่การ ทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะมีความซับซ้อนมากขึ้น เพราะต้องทดสอบหาความสัมพันธ์ ของความต้านทานภายในที่เป็นผลของระดับการประจุและอุณหภูมิ

แบบจำลองแบบความต้านทานภายในนั้นยังไม่ได้รวมผลของค่ากระแสไฟฟ้าต่อความ ต้านทานภายในเอาไว้ในแบบจำลอง ซึ่งจากการทดสอบของ Johnson [33] ดังรูปที่ 5-7 [33] พบว่าค่ากระแสไฟฟ้านั้นมีผลต่อค่าความต้านทานภายใน นอกจากนั้นแบบจำลองยังไม่ได้รวมผล การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าต่อภาระที่เปลี่ยนแปลงเอาไว้ในแบบจำลอง ดังนั้นจึงให้ผลของ แรงดันในช่วงภาระไม่คงตัว (Transient) ได้ไม่ดีดังรูปที่ 5-8 [33] ซึ่งเปรียบเทียบผลทดสอบ แรงดันไฟฟ้าที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ ของแบตเตอรี่แบบ Lithium-ion กับแบบจำลอง ซึ่งแสดง ให้เห็นว่าแบบจำลองแบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุสามารถทำนายผลของแรงดันไฟฟ้าในช่วง ภาระไม่คงตัว (Transient) ได้ดีกว่า ดังนั้นหากต้องการแบบจำลองที่สามารถทำนายผลของแรงดัน ในช่วงภาระไม่คงตัวจะต้องใช้แบบจำลองที่รวมเอาผลของการตอบสนองของแรงดันในช่วงภาระ ไม่คงตัวเอาไว้ในแบบจำลองเช่น แบบจำลองโดยวงจรวีเนิน หรือ แบบจำลองโดยวงจรตัว ต้านทานและตัวเก็บประจุในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 5-7 ผลการทดสอบค่าความต้านทานภายในที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ ของแบตเตอรี่แบบ Lithium ion

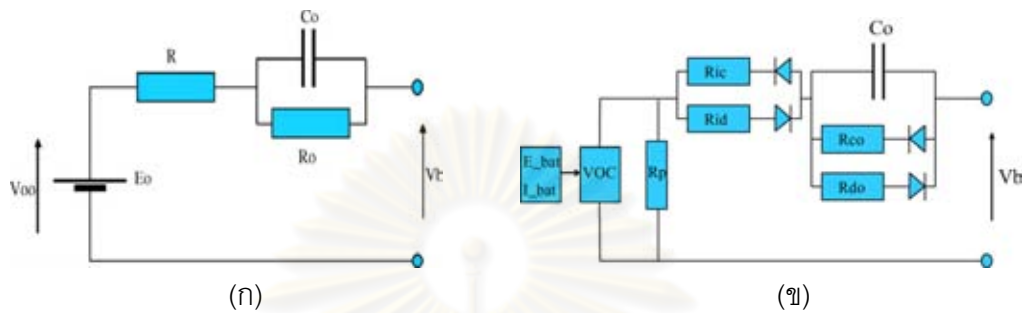


รูปที่ 5-8 เปรียบเทียบผลทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ ของแบตเตอรี่แบบ Lithium ion กับแบบจำลอง

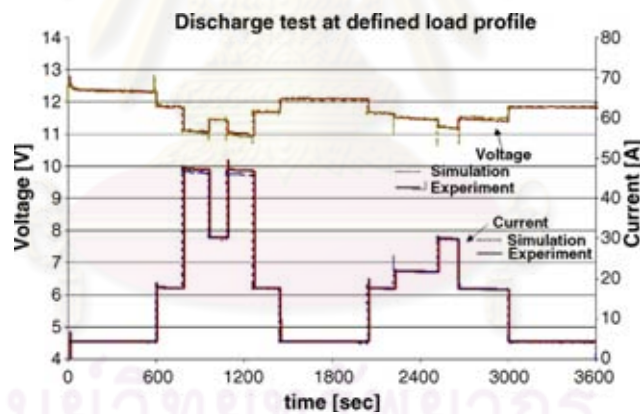
5.2.1.2 แบบจำลองโดยวงจรธีวินิน

แบบจำลองโดยวงจรธีวินิน (Thevenin battery model) เป็นแบบจำลองแบบพลศาสตร์แบบง่ายโดยใช้วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าที่ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Ideal voltage source) ความต้านทานภายใน และตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 5-9 ก [34] ซึ่งตัวเก็บประจุนี้ใช้แสดงผลของการตอบสนองแบบไม่คงตัว อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองโดยวงจรธีวินินนั้นเป็นค่าคงที่ ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทำงานจริงของแบตเตอรี่ Dürr และคณะ [34] ได้เสนอแบบจำลอง

แบบพลศาสตร์ที่ปรับปรุงจากแบบจำลองโดยวงจรรีวินินโดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรมันแปรเปลี่ยนตามระดับการประจุและอุณหภูมิ ดังรูปที่ 5-9 ข [34] และสามารถให้ผลการทำนายแรงดันไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำดังรูปที่ 5-10 [34]



รูปที่ 5-9 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าในแบบจำลองวงจรรีวินิน (ก) และวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าในแบบจำลองของ Dürr และคณะ (ข)



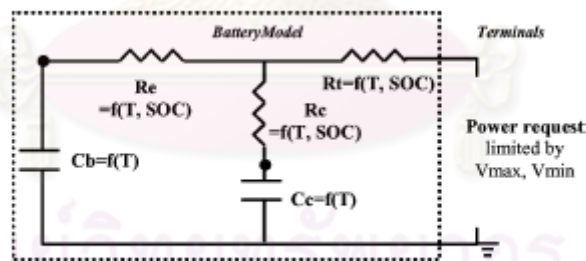
รูปที่ 5-10 เปรียบเทียบผลทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ ของแบตเตอรี่แบบ Lead acid กับแบบจำลอง

อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองนั้นได้มาจากการทดสอบแบตเตอรี่ซึ่งมีความยากลำบากในการทดสอบเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่สภาวะต่างๆ เช่นต้องทดสอบหาค่า R , R_o , C_o และ V_{oc} ซึ่งทั้งหมดนั้นเป็นค่าที่แปรเปลี่ยนตามระดับการประจุและอุณหภูมิ

5.2.1.3 แบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ

แบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (Resistance-Capacitance model) เป็นแบบจำลองแบบพลศาสตร์โดยใช้วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าดังรูปที่ 5-11 [33] โดยใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ (C_b) ในการแสดงผลของแรงดันขณะเปิดวงจร ตัวเก็บประจุ (C_c) แสดงผลของการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าในสภาวะไม่คงที่ และสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของวงจรในรูปแบบ State space โดยให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องจ่ายเป็น input ดังสมการที่ 5-4 ก และ 5-4 ข [35]

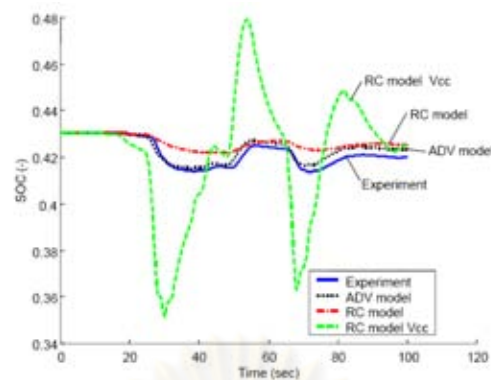
แบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ สามารถทำนายผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าในช่วงภาวะไม่คงตัว (Transient) ได้ดีกว่าแบบจำลองแบบความต้านทานภายใน ดังรูปที่ 5-12 [35] อย่างไรก็ตามแบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุไม่ได้รวมเอาผลของกระแสต่อความจุของแบตเตอรี่ ($C = f(I)$) เข้าไว้ในแบบจำลองซึ่งไม่สอดคล้องกับการทำงานจริงของแบตเตอรี่ ทำให้การทำนายค่าระดับการประจุที่ได้นั้นไม่ถูกต้องดังรูปที่ 5-12 นอกจากนี้การทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นั้นก็ทำได้ยากลำบากเช่นกันกับแบบจำลองของ Dürr และคณะ [34]



รูปที่ 5-11 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของแบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{Cb} \\ \dot{V}_{Cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/C_b(R_e + R_c) & 1/C_b(R_e + R_c) \\ 1/C_c(R_e + R_c) & -1/C_c(R_e + R_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Cb} \\ V_{Cc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_c/C_b(R_e + R_c) \\ -1/C_c + R_c/C_c(R_e + R_c) \end{bmatrix} [I] \quad (5-4ก)$$

$$[V_o] = \begin{bmatrix} R_c/(R_e + R_c) & R_e/(R_e + R_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Cb} \\ V_{Cc} \end{bmatrix} + \left[R_t - \frac{R_c R_e}{R_e + R_c} \right] [I] \quad (5-4ข)$$



รูปที่ 5-12 เปรียบเทียบผลการทำนายระดับการประจุของแบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ กับแบบจำลองแบบความต้านทานภายใน (ADV model ในรูป)

5.2.1.4 แบบจำลองแบบมูลฐาน

แบบจำลองแบบมูลฐาน (Fundamental model) เป็นแบบจำลองที่ศึกษาถึงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีภายในแบตเตอรี่ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบนั้นจะเป็นค่าพารามิเตอร์มูลฐานของแบตเตอรี่ [33,36] เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทประจุของแผ่นแคโทด (Cathodic charge transfer coefficient) อัตราส่วนของก๊าซต่อของเหลวในแผ่นแคโทด และความเข้มข้นของสารละลาย เป็นต้น ซึ่งจะต่างจากแบบจำลองทั้งสามหัวข้อในตอนต้นซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองทั้งสามนั้นเป็นค่ามาจากการวัด (Empirical) ซึ่งในการจำลองแบบแบตเตอรี่ที่เลือกมาใช้ นั้น เป็นการยากที่จะสามารถทราบถึงค่าพารามิเตอร์มูลฐานต่างๆ ของแบตเตอรี่ตัวนั้นๆ เพราะไม่สามารถใช้การทดสอบเพื่อบ่งชี้ค่าได้ดังแบบจำลองทั้งสามหัวข้อตอนต้น รวมถึงการคำนวณมีความซับซ้อนสูง

5.2.1.5 การเลือกใช้แบบจำลอง

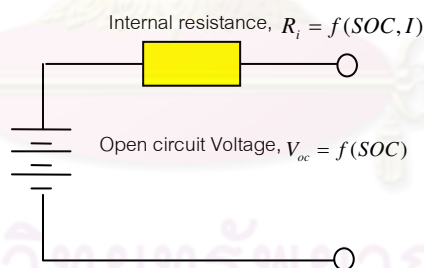
วิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองแบบความต้านทานภายในมาเป็นแบบจำลอง เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่รวมเอาผลของค่าความต้านทานภายในที่ระดับการประจุและกระแสไฟฟ้าเข้าไว้ในแบบจำลอง และสามารถทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองได้โดยง่ายดังจะได้กล่าวต่อไป

แบบจำลองแบบความต้านทานภายในแสดงได้โดยใช้วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าดังรูปที่ 5-13 โดยค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) เป็นค่าที่ขึ้นต่อระดับการประจุ ($V_{oc} = f(SOC)$) และค่าความต้านทานภายใน (R_i) เป็นค่าที่ขึ้นต่อระดับการประจุและกระแสไฟฟ้าที่จ่าย ($R_i = f(SOC, I)$) ระดับการประจุนิยามได้โดย อินทิกรัลของสัดส่วนของกระแสไฟฟ้ากับความจุตลอดช่วงเวลานึ่งดังสมการที่ 5-5 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นั้นสามารถหาได้โดยการทดสอบแบตเตอรี่

$$SOC = SOC_0 - \int_{t_0}^t \frac{I(t)}{3600C} dt \quad (5-5)$$

โดย

SOC, SOC_0	คือ	ระดับการประจุและระดับการประจุในขณะเริ่มต้นตามลำดับ
$I(t)$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่เวลาใด (แอมแปร์)
C_B	คือ	ความจุของแบตเตอรี่ (แอมแปร์-ชั่วโมง)

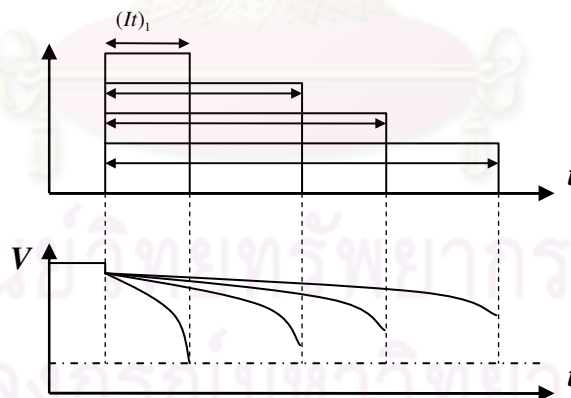


รูปที่ 5-13 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าสำหรับแบบจำลองแบตเตอรี่

5.2.2 การทดสอบแบตเตอรี่

วัตถุประสงค์ของการทดสอบแบตเตอรี่คือการทดสอบเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับนำมาใช้ในแบบจำลอง ซึ่งจะต้องทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะการจ่ายกระแสไฟฟ้าและระดับการประจุต่างๆ สำหรับใช้ในแบบจำลองได้โดยตรง หรือใช้การหาค่าความต้านทานภายในซึ่งสามารถหาได้โดยอ้อมโดยการคำนวณจากผลแรงดันไฟฟ้าร่วมกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายและระดับการประจุได้เช่นกัน

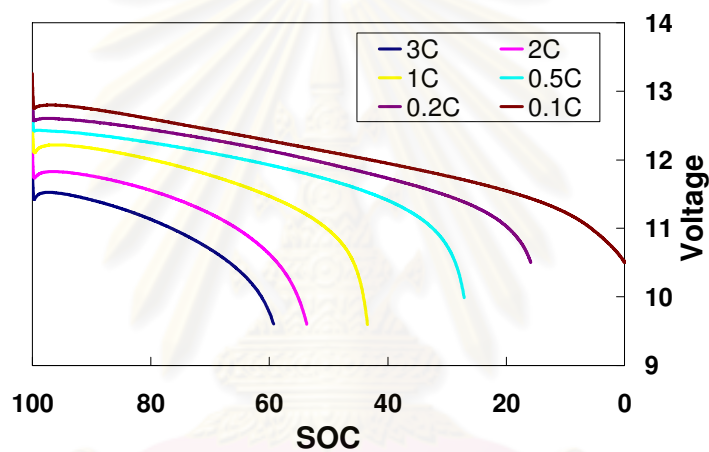
การทดสอบสามารถดำเนินการได้โดยกำหนดให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ค่าหนึ่ง พร้อมกับเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าตลอดช่วงเวลาที่จ่ายกระแสไฟฟ้าจนกระทั่งค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (Cut off Voltage) ที่ผู้ผลิตแนะนำสำหรับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายนั้นๆ จึงจะตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า จากนั้นทดสอบซ้ำในลักษณะเดียวกันแต่เปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายดังรูปที่ 5-14 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบในงานนี้จะใช้ค่าตั้งแต่ 0.1 เท่าของตัวเลขความจุแอมแปร์-ชั่วโมง ไปจนถึง 3 เท่าของตัวเลขความจุ แอมแปร์-ชั่วโมง โดยในแต่ละครั้งที่สิ้นสุดการจ่ายกระแสไฟฟ้านั้นจะต้องหยุดการทำงานของแบตเตอรี่เพื่อให้แบตเตอรี่เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วจึงเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร เมื่อได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรแล้วสามารถหาค่าระดับการประจุเมื่อสิ้นสุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรต่อระดับการประจุซึ่งจากงานวิจัยของ Dürr และคณะ [34] แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรกับระดับการประจุของแบตเตอรี่น้ำกรด-ตะกั่ว นั้นแปรผันกันอย่างเป็นเชิงเส้น ดังนั้นความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงกำหนดได้โดยค่าแรงดันเปิดวงจรขณะประจุเต็ม กับ ค่าแรงดันเปิดวงจรขณะคายประจุจนหมด ค่าแรงดันเปิดวงจรขณะคายประจุจนหมดนั้นในที่นี้นิยามโดย การวัดแรงดันเปิดวงจรหลังจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่อัตรา 0.1 ของตัวเลขความจุ แอมแปร์-ชั่วโมง จนกระทั่งถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ผู้ผลิตแนะนำ (10.5 โวลต์)



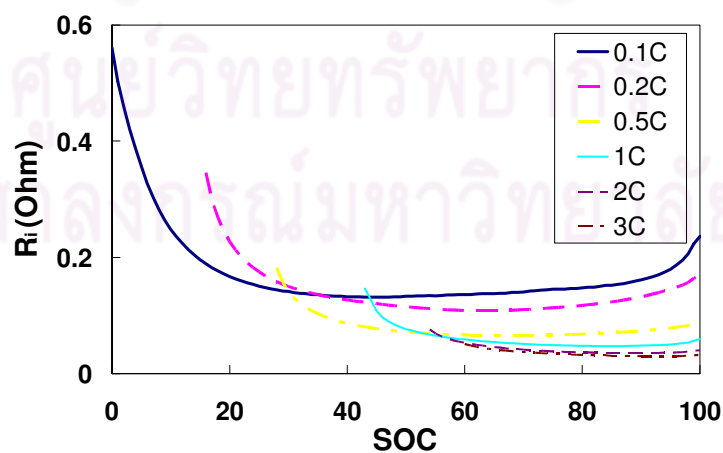
รูปที่ 5-14 การกำหนดการจ่ายกระแสไฟฟ้าและการเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่

จากผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าและระดับการประจุที่เวลาต่างๆ สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าและระดับการประจุได้ดังรูปที่ 5-15 ซึ่งสามารถนำค่าแรงดันไฟฟ้างกล่าวนี้ไปใช้ในแบบจำลองได้โดยตรง หรือนำค่าแรงดันไฟฟ้างกล่าวนี้มาคำนวณหาค่าความต้านทานภายในต่อกระแสไฟฟ้าและระดับการประจุได้ดังรูปที่ 5-16 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าความต้านทาน

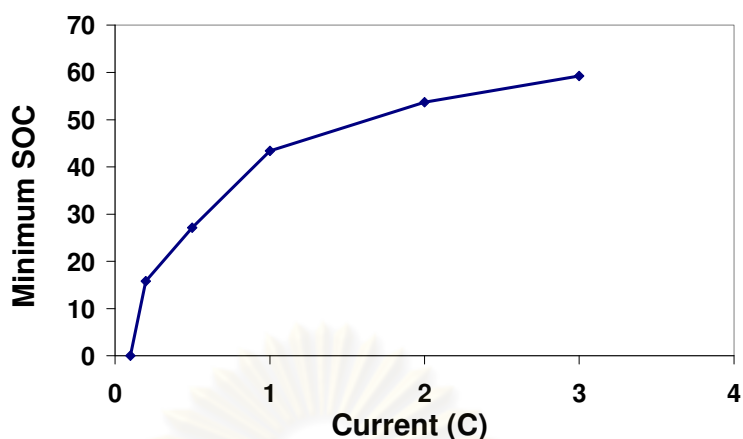
ภายในของแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับระดับการประจุและกระแสไฟฟ้าที่จ่าย ซึ่งที่ระดับการประจุน้อยจะให้ค่าความต้านทานภายในมาก แต่ที่กระแสไฟฟ้ามากขึ้นจะให้ค่าความต้านทานภายในน้อยลงซึ่งผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานของ Johnson และ คณะ [33] นอกจากนี้จากผลทดสอบการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่และผลระดับการประจุเมื่อสิ้นสุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆสามารถแสดงขอบเขตของระดับการประจุน้อยที่สุดที่แบตเตอรี่สามารถทำงานได้โดยไม่เกิดความเสียหายที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ ได้ดังรูปที่ 5-17 เห็นได้ว่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าสูงนั้นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้จะมีค่าน้อยลง ซึ่งผลดังกล่าวนี้สามารถช่วยในการกำหนดขอบเขตการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่ได้เหมาะสมและช่วยป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับแบตเตอรี่



รูปที่ 5-15 ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากระแสไฟฟ้าและระดับการประจุ



รูปที่ 5-16 ค่าความต้านทานภายในต่อค่ากระแสไฟฟ้าและระดับการประจุ



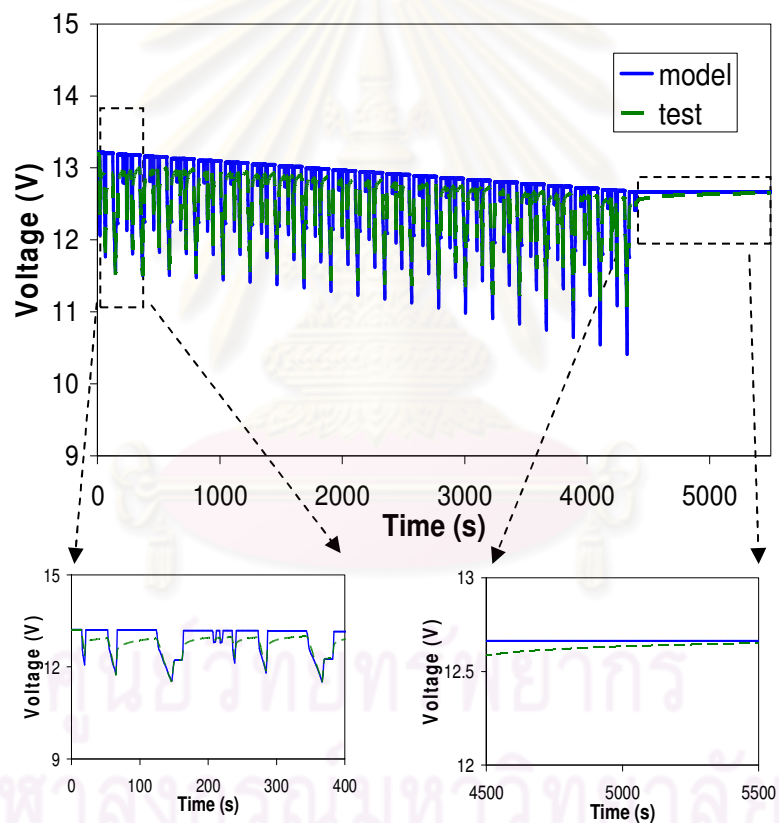
รูปที่ 5-17 ขอบเขตของระดับการประจุน้อยที่สุดที่แบตเตอรี่สามารถทำงานได้โดยไม่เกิดความเสียหายที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ

5.2.3 การประเมินแบบจำลองแบตเตอรี่

หัวข้อนี้เป็นการสอบทวนความสามารถของแบบจำลองแบตเตอรี่ที่สร้างขึ้น โดยการกำหนดให้แบตเตอรี่จ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเป็นวัฏจักร แล้วสังเกตผลของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ รวมถึงสังเกตค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรเมื่อสิ้นสุดวัฏจักร ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรนี้แสดงถึงความแม่นยำในการทำงานระดับการประจุของแบตเตอรี่ โดยวัฏจักรที่ใช้ทดสอบเพื่อประเมินแบบจำลองแบตเตอรี่นั้นได้จากการจำลองกำลังขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 เช่นเดียวกับการประเมินแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงในหัวข้อที่ 5.1.3 แต่ในส่วนนี้จะใช้ค่ากำลังไฟฟ้าส่วนที่เกินจากเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายได้มากำหนดการจ่ายกำลังในการทดสอบแบตเตอรี่และได้ปรับสัดส่วนของกำลังดังกล่าวให้เหมาะสมกับการทดสอบกับแบตเตอรี่หนึ่งชุด นอกจากนั้นจำนวนการวนซ้ำของวัฏจักรที่ใช้ทดสอบเพื่อประเมินนั้นจะต้องมีจำนวนมากพอให้แบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับการประจุอย่างชัดเจนโดยจะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงระดับการประจุประมาณ 30-40% ซึ่งในส่วนนี้ได้ใช้การทดสอบ 20 วัฏจักรเนื่องจากได้ใช้การคำนวณในเบื้องต้นแล้วพบว่าให้ผลการเปลี่ยนแปลงระดับการประจุอยู่ในช่วงที่กำหนด

รูปที่ 5-18 แสดงผลเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองและแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ พบว่ามีความแม่นยำดีในขณะที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีความผิดพลาดเพียง 0.2% สำหรับช่วงจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดในวัฏจักรแรก และในช่วงจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดในวัฏจักร

สุดท้ายพบว่ามามีค่าที่ผิดพลาดมากขึ้นเป็น 5.7 % สำหรับในช่วงที่ไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้านั้นโดยภาพรวมจะเห็นว่าค่าที่ผิดพลาดอยู่ เช่นในวัฏจักรแรกมีค่าผิดพลาด 5.1% เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแบตเตอรี่จริงนั้นเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ช้าแต่สำหรับในแบบจำลองนั้นจะแสดงแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะสมดุลโดยทันที จึงทำให้เกิดค่าผิดพลาดดังกล่าว และเมื่อสังเกตค่าแรงดันเปิดวงจรที่วัดได้หลังสิ้นสุดวัฏจักรสุดท้าย พบว่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรที่วัดได้หลังสิ้นสุดวัฏจักรสุดท้ายในทันทีจะมีค่าที่แตกต่างกับแบบจำลอง แต่เมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งแบตเตอรี่เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วค่าที่วัดได้กับค่าจากแบบจำลองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำในการทำนายระดับการประจุซึ่งมีค่าผิดพลาดเพียง 2.1%



รูปที่ 5-18 ผลเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองกับแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ

จากการประเมินนั้นเห็นได้ว่าแบบจำลองแบตเตอรี่ให้ความแม่นยำในการทำนายระดับการประจุกับการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบเป็นวัฏจักรได้ดี แม้ว่าการทำนายแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ไม่ได้จ่ายกระแสไฟฟ้านั้นยังคงมีความคลาดเคลื่อน แต่ในขณะที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้านั้น

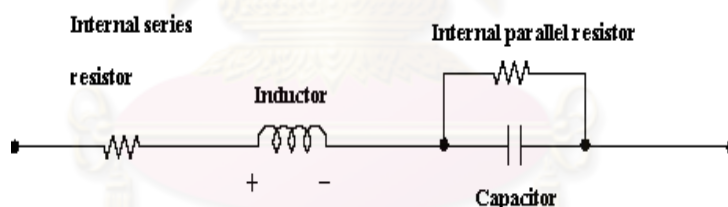
แบบจำลองสามารถทำนายแรงดันไฟฟ้าได้แม่นยำซึ่งพิจารณาได้ว่าแบบจำลองแบบเตอเรียที่นำมาใช้สามารถให้ความแม่นยำเพียงพอแก่การช่วยในการออกแบบระบบขับเคลื่อน

5.3 การทดสอบและการจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง

ชุดเก็บประจุความจุสูงที่ใช้ทดสอบในหัวข้อนี้พิจารณาผลิตภัณฑ์ของ Maxwell รุ่น BCAP 1500 E ขนาด 1500 ฟารัด แรงดันไฟฟ้าสูงสุดต่อหน่วย 2.7 โวลต์ เนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้าต่อหน่วยน้อย การนำมาใช้งานจะต้องใช้จำนวนหลายหน่วยต่อแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าเพียงพอและจากการที่ต้องทำงานร่วมกันหลายหน่วยนี้ การใช้งานจึงต้องอาศัยอุปกรณ์เพิ่มเติมที่เรียกว่า Balancer ซึ่งจะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของแต่ละหน่วยให้เท่ากันตลอดการทำงาน ข้อพิจารณาอีกจุดหนึ่งก็คือระดับแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงจะมีการแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วงที่กว้าง (0 ถึง 2.7 โวลต์ต่อหน่วย) โดยตัวของชุดเก็บประจุความจุสูงเองนั้นสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือศูนย์ แต่ในการใช้งานจริงนั้นแรงดันไฟฟ้าน้อยสุดจะถูกจำกัดด้วยปัจจัยหลายประการ ได้แก่ 1) การใช้งานเป็นชุดโดยต่อแบบอนุกรมนั้นแม้จะมีการใช้ Balancer แต่แรงดันไฟฟ้าในแต่ละหน่วยยังคงมีความแตกต่างกันอยู่เล็กน้อย ซึ่งหากถูกจ่ายกระแสไฟฟ้าจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าของทั้งชุดเข้าไปใกล้ศูนย์แล้ว หน่วยที่มีแรงดันไฟฟ้าน้อยที่สุดจะมีค่าลดลงเป็นศูนย์ก่อน และหากจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อไป หน่วยที่มีค่าแรงดันเป็นศูนย์นั้นจะเหมือนกับถูกบ่อนแรงดันย้อนทิศทางซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายที่ตัวหน่วยนั้นๆ ได้ 2) อุปกรณ์ Balancer นั้นจะต้องอาศัยกระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งเพื่อให้สามารถทำงานได้แต่หากแรงดันไฟฟ้าลดลงต่ำ Balancer จะไม่สามารถทำงานได้ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดแรงดันที่แตกต่างกันระหว่างหน่วย 3) จากการที่ชุดเก็บประจุความจุสูงมีการแปรเปลี่ยนแรงดันใช้งานอยู่ในช่วงที่กว้าง ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC/DC Converter) จึงจำเป็นสำหรับการนำชุดเก็บประจุความจุสูงมาใช้กับระบบขับเคลื่อน และโดยมากจะสามารถทำงานได้ที่ช่วงของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าช่วงหนึ่งดังนั้นการใช้งานชุดเก็บประจุความจุสูงจึงถูกจำกัดแรงดันต่ำสุดโดยแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของอุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนี้เอง ดังนั้นจึงกำหนดให้ตัวเก็บประจุทำงานในช่วง 1.35 ถึง 2.7 โวลต์ต่อหน่วย

5.3.1 แบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง

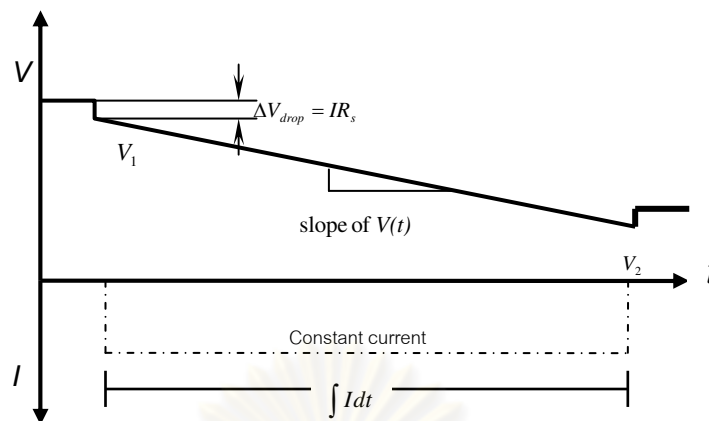
แบบจำลองของชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นจะใช้วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าดังรูปที่ 5-19 [37] ซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานภายในแบบอนุกรม (Internal series resistance) ซึ่งเทียบได้กับการลดลงของแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า และตัวเหนี่ยวนำ (Inductance) ซึ่งมีผลต้านทานสูงก็ต่อเมื่อมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าสูง และความต้านทานภายในแบบขนาน (Internal parallel resistance) ซึ่งเทียบได้กับการสูญเสียจากการคายประจุในตัวเอง (Self-discharge) วิทยานิพนธ์นี้ชุดเก็บประจุความจุสูงถูกใช้งานเป็นแหล่งจ่ายพลังงานเสริมให้กับระบบในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถจ่ายได้เพียงพอซึ่งลักษณะการทำงานแบบนี้โดยมากจะไม่นำผลของค่าความต้านทานภายในแบบขนานมาคิดเพราะว่ามีผลต่อการคำนวณน้อย นอกจากนั้นผลของค่าความเหนี่ยวนำก็จะมีนัยสำคัญเฉพาะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าต่อเวลามาก เช่นในกรณีการทำงานกับไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณเป็นไปโดยง่ายจึงพิจารณาเฉพาะผลของความต้านทานภายในแบบอนุกรมและตัวเก็บประจุเทียบเท่า



รูปที่ 5-19 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของชุดเก็บประจุความจุสูง

5.3.2 การทดสอบชุดเก็บประจุความจุสูง

การทดสอบหาค่าความต้านทานภายในและค่าความจุสามารถทดสอบได้พร้อมกันโดยการให้ชุดเก็บประจุความจุสูงจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ค่าต่างๆ ทีละค่าแล้วเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าตลอดช่วงเวลาจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าลดลงถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดในช่วงใช้งาน (Cut off) ดังรูปที่ 5-20 จากนั้นคำนวณหาค่าความต้านทานภายในโดยความสัมพันธ์ดังสมการที่ 5-6 พร้อมกับคำนวณหาค่าความจุโดยความสัมพันธ์ดังสมการที่ 5-7 [38]



รูปที่ 5-20 การวัดค่าพารามิเตอร์ของชุดเก็บประจุความจุสูงจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่

$$R_{S,SC} = \frac{\Delta V_{drop}}{I} \quad (5-6)$$

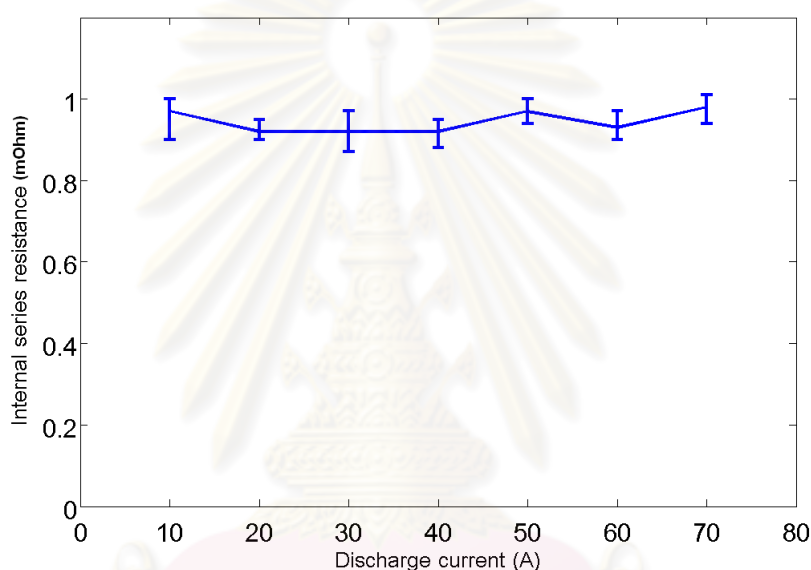
$$C_{SC} = \frac{\int Idt}{V_2 - V_1} \quad (5-7)$$

โดย

- $R_{S,SC}$ คือ ความต้านทานภายในของชุดเก็บประจุความจุสูง (โอห์ม)
- C_{SC} คือ ค่าความจุของชุดเก็บประจุความจุสูง (ฟารัด)
- ΔV_{drop} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าง่ายรูปที่ 5-20
- I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่าย (แอมแปร์)
- V_1, V_2 คือ แรงดันไฟฟ้าก่อนจ่ายและหลังจ่ายกระแสไฟฟ้าง่ายรูปที่ 5-20

ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานภายในแบบอนุกรมโดยใช้การจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ต่างๆ แสดงในรูปที่ 5-21 โดยพบว่าค่าความต้านทานภายในที่ได้จากการทดสอบนั้นไม่ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่จ่าย และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.94 มิลลิโอม ซึ่งแตกต่างจากค่าที่กำหนดจากผู้ผลิต (0.63 มิลลิโอม) คิดเป็นค่าที่ต่างกันถึง 49.2 % และเพื่อพิจารณาว่าความแตกต่างที่มีค่าดังกล่าวมีผลต่อการใช้แบบจำลองทำนายผลการทำงานจริงมากน้อยเพียงใด หัวข้อนี้จึงได้นำค่าความต้านทานที่ได้จากการทดสอบและค่าความต้านทานที่ได้จากผู้ผลิตมาใช้กับแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ ที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ พบว่าแบบจำลองที่ใช้ค่าความต้านทานภายในจากการทดสอบให้ผลที่ผิดพลาดจากค่าที่วัดได้จริงเพียง 0.64 % (RMS)

และแบบจำลองที่ใช้ค่าความต้านทานภายในที่ได้จากผู้ผลิตให้ผลที่ผิดพลาดจากค่าที่วัดได้จริงเพียง 0.65% (RMS) ดังนั้นแม้ว่าค่าความต้านทานภายในที่แตกต่างกันถึง 49.2% แต่ความแตกต่างดังกล่าวนี้มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกับการวัดจริงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นมีความต้านทานภายในต่ำมากเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ ดังนั้นผลของความต้านทานภายในต่อแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงจึงมีผลน้อย เป็นผลให้การทำนายแรงดันไฟฟ้ายังคงให้ค่าที่ใกล้เคียงกันแม้ว่าแบบจำลองจะใช้ค่าความต้านทานภายในที่ต่างกัน



รูปที่ 5-21 ค่าความต้านทานภายในของชุดเก็บประจุความจุสูงจากการทดสอบโดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ

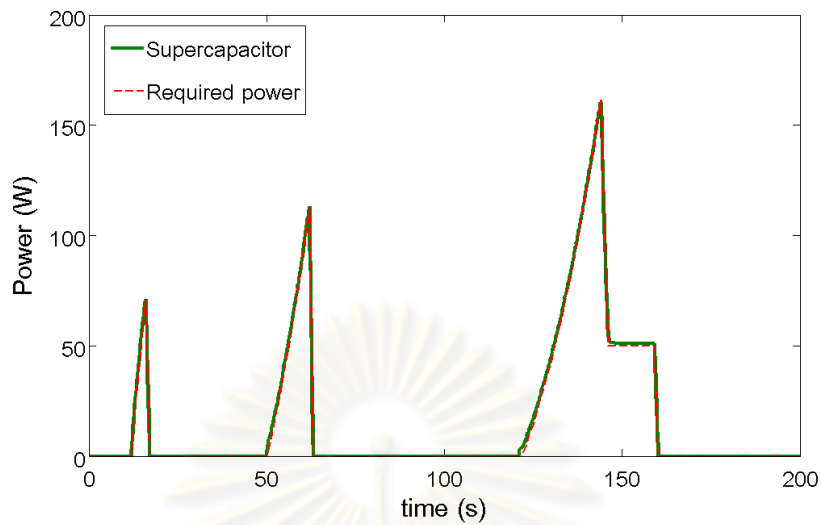
การทดสอบหาค่าความจุพบว่าค่าที่ได้นั้นไม่ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ต้องจ่ายเช่นเดียวกัน โดยมีค่าเฉลี่ยจากการทดสอบอยู่ที่ 1558 ฟารัด ซึ่งมากกว่าค่าที่กำหนดมาจากผู้ผลิต (1500 ฟารัด) โดยคิดเป็นความแตกต่างกัน 3.7 % และเมื่อนำค่าความจุที่ได้จากการทดสอบและค่าความจุที่ได้จากผู้ผลิตมาใช้กับแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ ที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ได้จากการวัดจริง พบว่าแบบจำลองที่ใช้ค่าความจุจากการทดสอบให้ผลที่ผิดพลาดจากค่าที่วัดได้จริงเพียง 0.64 % (RMS) แต่หากใช้ค่าความจุที่ได้จากผู้ผลิตแล้วค่าความผิดพลาดที่ได้คือ 2.17% (RMS)

จากผลทดสอบที่ได้มีความแตกต่างกันกับค่าของผู้ผลิตนั้น เนื่องจากการทดสอบนั้นกระทำในช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน (1.35 ถึง 2.7 โวลต์) ไม่ได้ทดสอบโดยให้มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าจนแรงดันเหลือศูนย์ (0 ถึง 2.7 โวลต์) และการลดลงของแรงดันไฟฟ้าไม่ได้มีลักษณะที่เป็นเชิงเส้นโดยสมบูรณ์ ส่งผลให้คำนวณค่าความจุได้แตกต่างกันหากกำหนดให้แรงดันต่ำสุด (Cut off) ต่างกัน ดังนั้นการสร้างแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบหาค่าความจุในช่วงที่ใช้งานเสียก่อนจึงจะสามารถสร้างแบบจำลองได้อย่างแม่นยำ

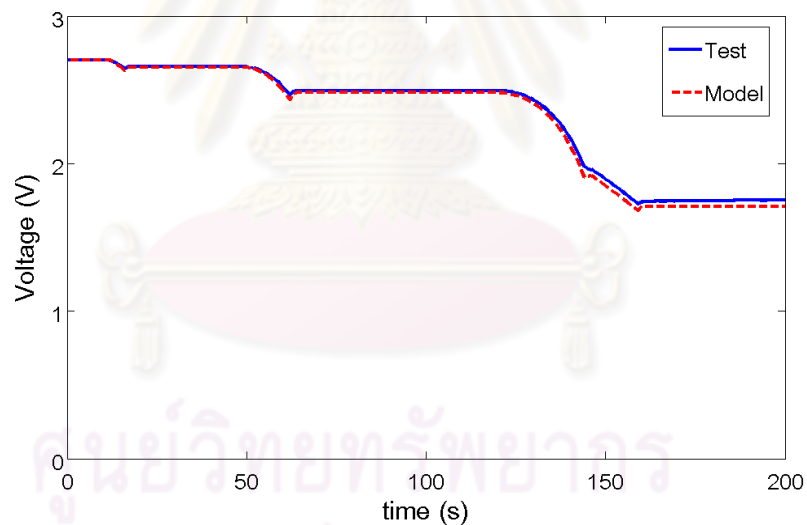
5.3.3 การประเมินแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง

เมื่อได้ทดสอบจนทราบค่าพารามิเตอร์ของชุดเก็บประจุความจุสูงแล้ว ส่วนต่อมาก็คือการสอบทวนความแม่นยำของแบบจำลองโดยพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าเพราะเป็นค่าที่บ่งชี้โดยตรงถึงระดับพลังงานสะสมภายในชุดเก็บประจุความจุสูง และเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลโดยตรงต่อการนำไปใช้ในระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด การประเมินดำเนินการโดยกำหนดให้ชุดเก็บประจุความจุสูงจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเป็นวัฏจักร ดังรูปที่ 5-22 ซึ่งเป็นวัฏจักรที่ได้จากการจำลองกำลังขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 เช่นเดียวกับการประเมินแบบจำลองแบตเตอรี่ในหัวข้อที่ 5.2.3 แต่ได้กำหนดสัดส่วนให้เหมาะสมกับการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากชุดเก็บประจุความจุสูงหนึ่งเซลล์และใช้เพียงหนึ่งวัฏจักรในการทดสอบเนื่องจากข้อจำกัดในด้านความจุพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูง จากนั้นพิจารณาเปรียบเทียบผลแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดกับแบบจำลองดังรูปที่ 5-23 พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายผลระดับแรงดันไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำโดยมีความผิดพลาดสูงสุดในช่วงท้ายของวัฏจักรเพียง 2 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5-22 กำลังไฟฟ้าที่กำหนดให้ชุดเก็บประจุความจุสูงจ่ายกับกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จริง



รูปที่ 5-23 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองและจากการวัดจริงของชุดเก็บประจุ
ความจุสูง

จากผลการประเมินนั้นสรุปได้ว่า แบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูงโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดสามารถทำนายผลแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับพลังงานได้อย่างแม่นยำตลอดช่วงการทำงาน

5.4 สรุปการทดสอบและการจำลองอุปกรณ์

บทที่ 5 นี้ได้ทดสอบอุปกรณ์ย่อยได้แก่ ชุดเซลล์เชื้อเพลิง แบตเตอรี่ และ ชุดเก็บประจุ ความจุสูง และนำผลทดสอบที่ได้มาสร้างแบบจำลอง ไปจนถึงการทดสอบเพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้การจ่ายพลังงานแบบเป็นวัฏจักรที่สอดคล้องกับการนำไปใช้งานในยานยนต์ พบว่าแบบจำลองของอุปกรณ์ย่อยทั้งสามชนิดให้ความแม่นยำที่ดีเพียงพอ และสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบขับเคลื่อนต่อไปได้ นอกจากนี้เป้าหมายสำคัญอีกประการของการทดสอบอุปกรณ์ย่อยคือ เพื่อเรียนรู้ลักษณะเฉพาะในการทำงานของอุปกรณ์ ข้อพิจารณาในการใช้งาน และข้อควรระวังในด้านความปลอดภัย ซึ่งนับได้ว่ามีความสำคัญต่อการติดตั้งระบบขับเคลื่อนในรถต่อไป เพราะหากปราศจากองค์ความรู้เกี่ยวกับคุณลักษณะของอุปกรณ์ย่อยดังกล่าวแล้ว การนำส่วนย่อยทั้งหมดมาประกอบขึ้นเป็นระบบขับเคลื่อนย่อมเป็นไปได้ไม่ได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ชุดทดสอบระบบขับเคลื่อนและการทดสอบเบื้องต้น

ในบทนี้กล่าวถึงข้อพิจารณาการใช้งานของส่วนประกอบต่างๆ ในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดและรายละเอียดการติดตั้งส่วนประกอบย่อยต่างๆ รวมถึงการทดสอบการจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนโดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้า (Programmable electronic load) ในการจำลองภาระการขับเคลื่อนของรถจักรยานยนต์

6.1 ส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อน

การติดตั้งระบบขับเคลื่อนนั้น สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งคือการทำความเข้าใจถึงข้อพิจารณาในการใช้งานของส่วนประกอบย่อยต่างๆ อย่างลึกซึ้ง เพื่อให้สามารถนำส่วนประกอบต่างๆ มาใช้งานร่วมกันได้อย่างเหมาะสมและไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย ในส่วนนี้จะกล่าวถึงข้อพิจารณาการใช้งานของส่วนประกอบต่างๆ ได้แก่ 1) เซลล์เชื้อเพลิง 2) ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC to DC converter) และ 3) ชุดรับภาระทางไฟฟ้า (Programmable electronic load) ในบทที่ 5 ได้กล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบไว้แล้วอย่างละเอียด ดังนั้นในส่วนนี้จึงกล่าวเพียงประเด็นสำคัญที่ใช้พิจารณา

6.1.1 เซลล์เชื้อเพลิง

สิ่งที่ต้องพิจารณาอย่างแรกของการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ในระบบไฮบริด คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ภาระต่างๆ เพื่อใช้ในการเลือกชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสมและกำหนดการจัดวางแหล่งจ่ายพลังงาน เช่น การเลือกว่าจะให้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงหรือเลือกให้ต่อกับแบตเตอรี่ เป็นต้น โดยแรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อไม่มีภาระจะอยู่ที่ประมาณ 42 โวลต์ และลดลงตามลำดับเมื่อมีภาระสูงขึ้น โดยที่ภาระสูงสุด (1200 วัตต์, 45 แอมแปร์) จะมีแรงดันขาออกที่ประมาณ 26 โวลต์ ดังรูปที่ 5-2 ในบทที่ 5 (Polarization curve)

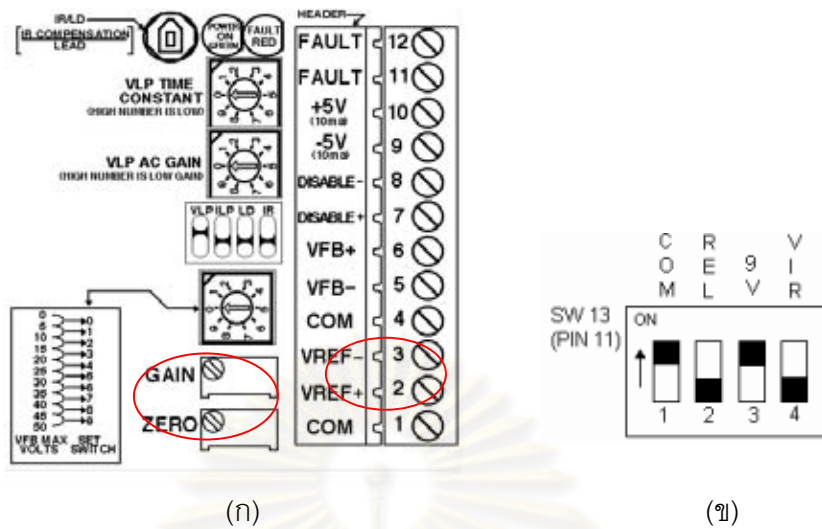
ส่วนต่อมาคือการพิจารณาค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ภาระต่างๆ เพื่อการนำไปกำหนดในกลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานให้เพื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้ และเมื่อพิจารณารูปที่ 5-3 ในบทที่ 5 (Efficiency curve) เห็น

ได้ว่า ณ จุดที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 414 วัตต์ (12 แอมแปร์, 34.5 โวลต์) เป็นจุดที่ทำให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานมากที่สุด ดังนั้นในการกำหนดกลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานจึงควรกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานใกล้เคียงกับจุดนี้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

6.1.2 ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC to DC Converter) ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็น รุ่น CH63120F-SU จาก Zahn Electronics, Inc พิกัด 3.9 กิโลวัตต์ การทำงานเป็นแบบเพิ่มแรงดัน (Step up) แบบสองทาง (Bidirectional) สามารถรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าได้ในช่วง 12 ถึง 61 โวลต์ และรับกระแสไฟฟ้าขาเข้าได้สูงสุด 120 แอมแปร์ สามารถปรับตั้งค่ากระแสไฟฟ้าขาออกได้ตามต้องการ แต่ต้องมีค่าสูงกว่าแรงดันขาเข้า 2 โวลต์ และอยู่ในช่วง 14 ถึง 63 โวลต์

การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกนั้นสามารถปรับตั้งโดยตรงที่ปุ่มปรับอัตราขยาย (GAIN) ดังรูปที่ 6-1 ก หรือปรับตั้งโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage source) จากอุปกรณ์ภายนอก มาเชื่อมต่อเข้ากับขั้วสัญญาณที่ 2 และ 3 (VREF+ และ VREF-) ซึ่งการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกโดยการควบคุมจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายนอกนั้นมีประโยชน์มากสำหรับการควบคุมการแบ่งจ่ายพลังงานในรูปแบบที่ซับซ้อนมากขึ้นต่อไป นอกจากการปรับตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกแล้วยังสามารถปรับค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าได้โดยการตั้งสวิตช์หมายเลข 13 ดังรูปที่ 6-1 ข แล้วต่อตัวต้านทานเข้าระหว่างขั้วสัญญาณที่ 11 และ 4 เพื่อควบคุมค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้านั้น ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้วิธีการลดระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกลงจากที่ตั้งไว้เพื่อจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้า ดังนั้นในระหว่างที่มีการจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้า หากแรงดันไฟฟ้าขาออกถูกลดระดับลงจนเข้าใกล้ระดับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าแล้ว ในจุดนี้จะไม่สามารถลดระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกให้ต่ำลงได้อีก ผลคือจะไม่สามารถจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าได้ ดังนั้นการนำไปใช้งานกับเซลล์เชื้อเพลิงต้องระมัดระวังถึงข้อจำกัดนี้



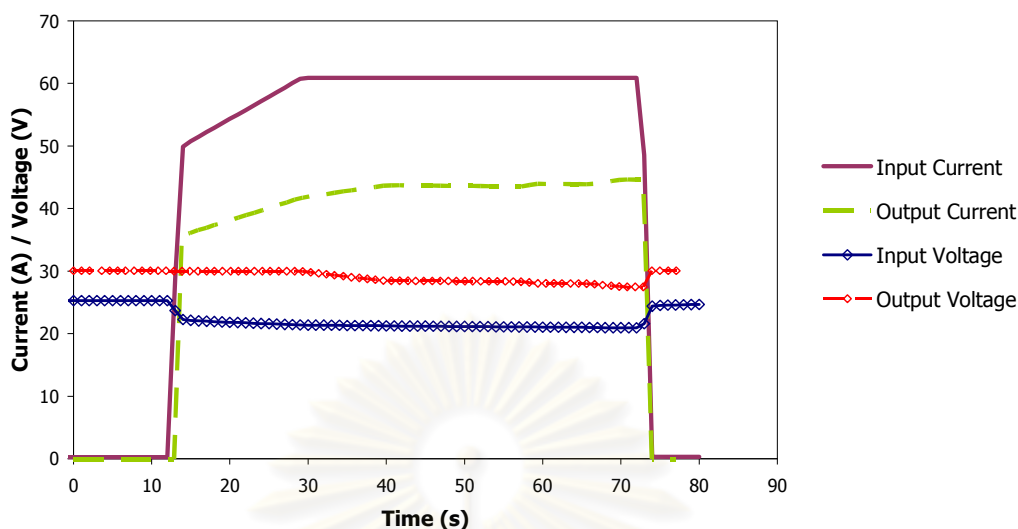
(ก)

(ข)

รูปที่ 6-1 ขั้วสัญญาณและปุ่มปรับค่าของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ก) และสวิตช์หมายเลข 13 สำหรับการจำกัดกระแสไฟฟ้า (ข)

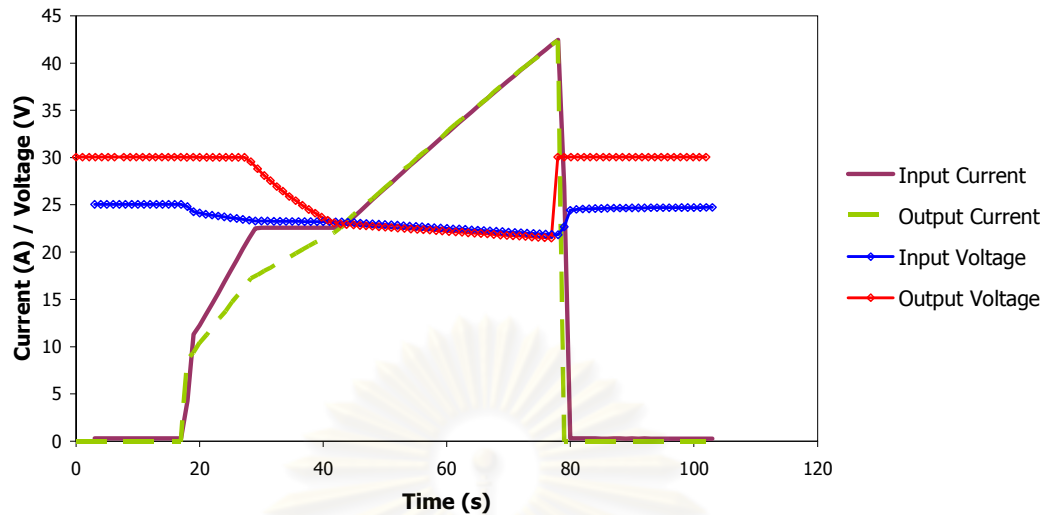
6.1.2.1 การทดสอบเบื้องต้นกับชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบการจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้การเชื่อมต่อแบตเตอรี่สองลูกเข้ากับชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และนำมาจ่ายภาระโดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้า รูปที่ 6-2 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้า ซึ่งสังเกตได้ว่าชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้นใช้การลดระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกลงในการจำกัดกระแสไฟฟ้า จากรูปที่ 6-2 นี้เห็นได้ว่าชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถจำกัดกระแสไฟฟ้าได้ตามต้องการ



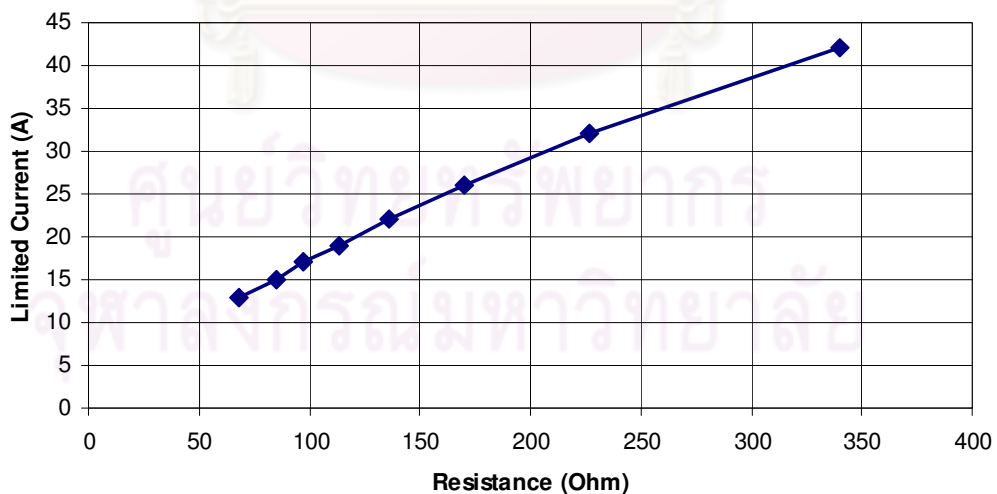
รูปที่ 6-2 การทำงานของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

หลังจากนั้นทดสอบในลักษณะเดิมอีกครั้งแต่กำหนดให้ความต้านทานของภาระซึ่งกำหนดผ่านชุดรับภาระทางไฟฟ้ามีค่าลดลง ซึ่งจะส่งผลให้มีการดึงกระแสไฟฟ้ามากขึ้น นอกจากนั้นได้ปรับค่าความต้านที่ขั้วสัญญาณ 4 และ 11 ที่ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้จำกัดกระแสที่ค่าน้อยลง ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 6-3 สังเกตได้ว่าในช่วงเวลาที่ 40 วินาทีเป็นต้นไปชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถจำกัดกระแสขาเข้าได้ เนื่องจากชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงใช้การลดระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกลงในการจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้า ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นแรงดันไฟฟ้าขาออกถูกลดระดับลงจนเข้าใกล้แรงดันไฟฟ้าขาเข้าจึงไม่สามารถลดระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกให้ต่ำลงอีกได้ เนื่องจากชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้นั้นเป็นชนิดเพิ่มแรงดัน (Step up) ส่งผลให้ไม่สามารถจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าได้



รูปที่ 6-3 การทำงานของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขณะที่ไม่สามารถจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าได้

ในส่วนต่อมาคือการทดสอบหาค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่จำเป็นต้องนำมาต่อเข้าระหว่างขั้วสัญญาณที่ 4 และ 11 เพื่อกำหนดค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้า ซึ่งผู้ผลิตไม่ได้ให้ข้อมูลในจุดนี้ โดยผลการทดสอบค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต้านทานต่างๆ แสดงในรูปที่ 6-4 ผลการทดสอบนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับการปรับตั้งค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าต่อไป



รูปที่ 6-4 ค่าความต้านทานของตัวต้านทานเพื่อกำหนดค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าสำหรับชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงรุ่น CH63120F-SU

6.1.3 ชุดรับภาระทางไฟฟ้า

การทดสอบระบบขับเคลื่อนนั้นจะทดสอบโดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้า (Programmable electronic load) ซึ่งจะถูกนำมาเชื่อมต่อเข้ากับระบบขับเคลื่อนแทนที่ชุดควบคุมมอเตอร์และมอเตอร์ ดังนั้นชุดรับภาระทางไฟฟ้าที่ใช้ต้องสามารถจำลองภาระทางไฟฟ้าของการขับชี้ของรถจักรยานยนต์ได้ ชุดรับภาระทางไฟฟ้าที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นรุ่น PLZ 1004 W จากผู้ผลิต Kikusui พิกัด 1 กิโลวัตต์ และทำงานร่วมกับชุดเพิ่มภาระทางไฟฟ้า (Load booster) รุ่น PLZ 2004 WB พิกัด 2 กิโลวัตต์ สองชุด ช่วยให้พิกัดรวมอยู่ที่ 5 กิโลวัตต์

การทดสอบสามารถทำได้โดยการนำผลการประเมินภาระทางไฟฟ้าสำหรับการขับชี้ตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ซึ่งจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาสำหรับสั่งการให้กับชุดรับภาระทางไฟฟ้า โดยสั่งการผ่านโปรแกรม Step editor ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับสร้างและถ่ายโอน (Upload) ข้อมูลรูปแบบของภาระ (Load profile) ที่ต้องการเข้าสู่หน่วยความจำภายในตัวชุดรับภาระทางไฟฟ้า

6.2 ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่

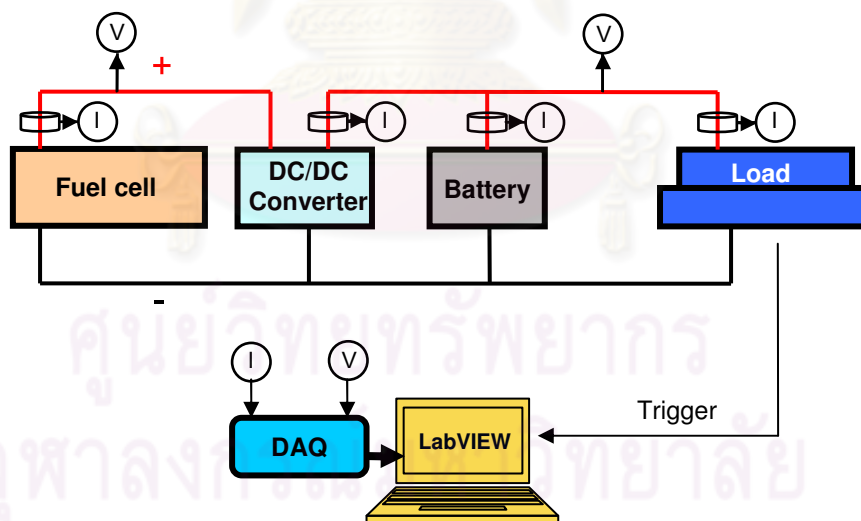
6.2.1 ข้อพิจารณาการใช้งานแบตเตอรี่

ข้อพิจารณาการนำแบตเตอรี่มาใช้ในระบบไฮบริดนั้น สิ่งแรกที่ต้องพิจารณาก็เช่นเดียวกับเซลล์เชื้อเพลิงคือต้องคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ เพื่อใช้กำหนดการจัดวางแหล่งจ่ายพลังงานทั้งสองได้เหมาะสม นอกจากนั้นต้องคำนึงถึงค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่แบตเตอรี่จ่ายได้ในแต่ละระดับการประจุโดยไม่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานซึ่งได้แสดงในรูปที่ 5-17 ในบทที่ 5

นอกจากนั้นต้องพิจารณาถึงค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสูงสุดสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ เพื่อจะสามารถป้องกันไม่ให้เกิดการชาร์จเกิน (Overcharge) โดยแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นชนิด VRLA ซึ่งผู้ผลิตแนะนำว่าไม่ควรให้กระแสการชาร์จเกิน 0.4 เท่าของขนาดแบตเตอรี่ (แอมแปร์-ชั่วโมง) เช่นแบตเตอรี่ที่ใช้มีขนาด 18 แอมแปร์-ชั่วโมง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าสูงสุดสำหรับการชาร์จ คือ 7.2 แอมแปร์ และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดสำหรับการชาร์จคือ 14.9 โวลต์ อย่างไรก็ตามค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับการชาร์จดังกล่าวนี้เป็นค่าสำหรับการใช้งานในระยะยาว แบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถรองรับค่ากระแสไฟฟ้าระดับสูงเข้าสู่แบตเตอรี่เป็นช่วงเวลาสั้นได้

6.2.2 การติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่

เมื่อพิจารณาถึงแรงดันไฟฟ้าใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ 26 ถึง 42 โวลต์ และแบตเตอรี่ต่อแบบอนุกรมสี่ลูกทำงานที่ 48 ถึง 52 โวลต์ ดังนั้นจึงติดตั้งโดยให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานภายใต้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังแสดงในรูปที่ 6-5 เนื่องจากแบตเตอรี่มีแรงดันไฟฟ้าใช้งานคงที่กว่าเซลล์เชื้อเพลิง ประกอบกับรูปแบบการทำงานของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแบบเพิ่มแรงดัน จากนั้นนำชุดรับภาระทางไฟฟ้ามาเชื่อมต่อกับบัสแรงดันไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่เสมือนเป็นชุดควบคุมมอเตอร์และมอเตอร์ นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้กระแสและแรงดันไฟฟ้า (Current sensor ,Voltage sensor) ในตำแหน่งต่างๆ ของระบบ ดังรูปที่ 6-5 เพื่อตรวจวัดค่าการแบ่งจ่ายพลังงาน สัญญาณทั้งหมดได้ถูกบันทึกเข้าสู่คอมพิวเตอร์ โดยระบบตรวจวัดอัตโนมัติ (Data acquisition ,DAQ) ที่เชื่อมต่อผ่านทางโปรแกรม LabVIEW และสัญญาณที่วัดได้ดังกล่าวนั้นสามารถเทียบเวลา (Synchronize) ให้ตรงกับค่าภาระที่กำหนด จากชุดรับภาระทางไฟฟ้า ได้โดยการเชื่อมต่อสัญญาณ Trigger จากตัวชุดรับภาระทางไฟฟ้ามาเข้าสู่ระบบตรวจวัดอัตโนมัติ รายละเอียดของอุปกรณ์การวัดได้แสดงในภาคผนวก ง



รูปที่ 6-5 ส่วนประกอบของชุดทดสอบระบบขับเคลื่อน

การติดตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานร่วมกับแบตเตอรี่นั้น ทำได้โดยการปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้อยู่ในช่วงใช้งานของแบตเตอรี่ ซึ่งจะปรับเป็นค่าเท่าไรนั้นก็ขึ้นอยู่กับกลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานดังจะกล่าวต่อไป ส่วนต่อมาก็คือการ

ปรับค่าจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งก็คือการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงนั่นเอง การเลือกที่จะปรับให้จำกัดค่าเท่าไรนั้นก็ขึ้นอยู่กับกลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานอีกเช่นกัน

กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานที่ใช้นั้นมีอยู่ด้วยกันสองแบบคือ 1) แบบ Load leveled และ 2) แบบ Load following โดยแบบแรก Load leveled นั้นจะมีแนวคิดทำให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานในช่วงที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดอยู่ตลอดเวลา โดยให้แบตเตอรี่ทำหน้าที่รับภาระในส่วนที่เกินจากเซลล์เชื้อเพลิงในขณะที่มีภาระมาก และเมื่ออยู่ในช่วงที่มีภาระน้อยเซลล์เชื้อเพลิงก็จะชาร์จให้กับแบตเตอรี่ การปรับตั้งนั้นทำได้โดยปรับให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่แบบช้า ($13.8 \times 4 = 55.2$ โวลต์) เนื่องจากแบตเตอรี่แบบน้ำกรดตะกั่วนั้นจะใช้การชาร์จแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ปรับตั้งนั้นจะสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ในขณะเริ่มต้นทำงาน และต้องไม่ลืมว่าการปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกดังกล่าวนั้นจะต้องปรับตั้งในขณะที่ยังไม่ได้เชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ นอกจากนี้ต้องปรับตั้งการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งก็คือประมาณ 12 แอมแปร์

กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบที่สองคือ Load following มีแนวคิดที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้าตามภาระที่เปลี่ยนแปลงไปพร้อมกันกับการให้แบตเตอรี่ช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเสริมหากเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอ การปรับตั้งในรูปแบบนี้แบ่งออกเป็นสองรูปแบบตามการปรับตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า คือ 1) การปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าเริ่มแรกของแบตเตอรี่ และ 2) การปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มแรกของแบตเตอรี่เล็กน้อย การปรับตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งสองแบบนี้จะให้ผลการแบ่งจ่ายพลังงานตามแนวคิดของกลยุทธ์การแบ่งจ่ายแบบ Load following แต่จะมีความแตกต่างกันในรายละเอียดดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 6.2.3 ส่วนต่อมาก็คือการปรับตั้งค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในช่วงที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อตัวเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งก็คือ 45 แอมแปร์ แต่ในการทดสอบนั้นได้ปรับตั้งการจำกัดกระแสไฟฟ้าให้ต่ำกว่าค่าสูงสุดเพื่ออายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยตั้งการจำกัดที่ 37 แอมแปร์

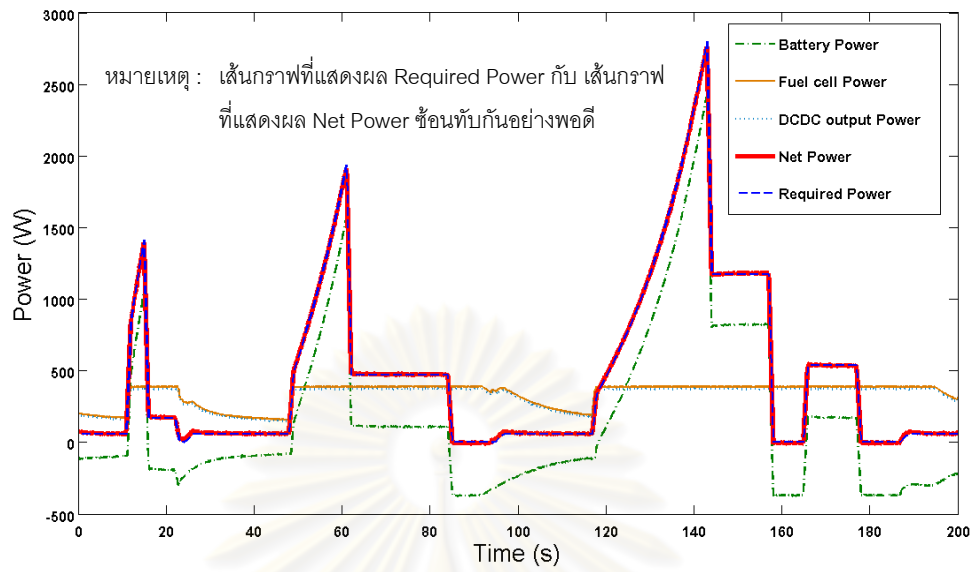
6.2.3 ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่

6.2.3.1 การทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่โดยใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load leveled

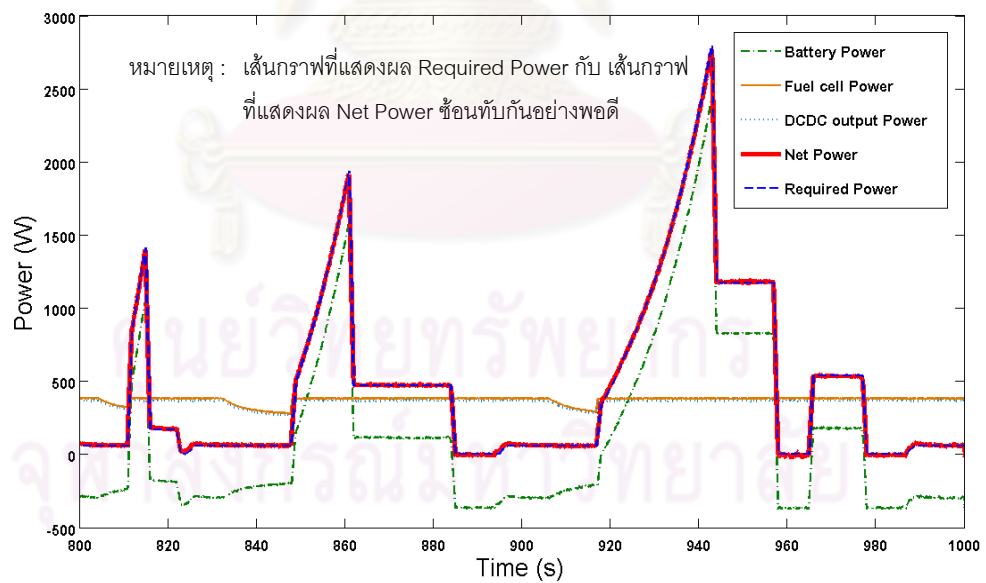
การทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยกลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load leveled พบว่าระบบขับเคลื่อนสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอแก่ความต้องการตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 ดังรูปที่ 6-6 เห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าแบบคงที่ตลอดช่วงเวลาที่รับภาระ และแบตเตอรี่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เกินจากเซลล์เชื้อเพลิงได้อย่างเพียงพอ โดยในช่วงเวลาที่ไม่มีการขับหรือมีการขับต่ำนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่เพื่อชาร์จประจุคืนแก่แบตเตอรี่ และเมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากขาออกจากเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งก็คือกำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ออกจากชุดแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 6-6 เห็นได้ว่าค่าทั้งสองใกล้เคียงกันอย่างมากซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

การใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load leveled นี้เห็นได้ว่าจะสามารถกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงได้ตลอดเวลา แต่พบว่าในช่วงวัฏจักรแรกนั้น เซลล์เชื้อเพลิงจะลดการจ่ายกำลังไฟฟ้างลงในขณะที่มีการชาร์จเข้าสู่แบตเตอรี่ เนื่องจากแบตเตอรี่ยังคงมีระดับการประจุที่สูงอยู่ และด้วยกระบวนการชาร์จแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่จึงทำให้กระแสไฟฟ้าสำหรับชาร์จลดลงดังกล่าว แต่หากพิจารณาผลการทดสอบในช่วงวัฏจักรที่ห้าดังรูปที่ 6-7 จะเห็นได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงไม่ได้ลดการจ่ายกำลังไฟฟ้างลงมากนักในช่วงเวลาที่ชาร์จเข้าสู่แบตเตอรี่ เนื่องจากระดับการประจุแบตเตอรี่ที่น้อยลงจึงทำให้มีการชาร์จเข้าสู่แบตเตอรี่มากขึ้นในวัฏจักรที่ห้า สาเหตุของระดับการประจุของแบตเตอรี่ที่ลดลงนั้นสืบเนื่องมาจากการที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานในระดับกำลังที่ต่ำ แบตเตอรี่จึงต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สูงมากโดยคิดเป็นพลังงานที่จ่ายออกต่อหนึ่งวัฏจักรได้ 15.2 วัตต์-ชั่วโมง ในขณะที่พลังงานในส่วนที่รับเข้าแบตเตอรี่เฉลี่ยในแต่ละวัฏจักรคิดเป็น 7.7 วัตต์-ชั่วโมง ซึ่งพลังงานของแบตเตอรี่ส่วนที่จ่ายมีค่ามากกว่าพลังงานในส่วนที่รับมาก ส่งผลให้ระดับการประจุของแบตเตอรี่ลดลงในแต่ละวัฏจักร

หากพิจารณาในด้านปริมาณการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนพบ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ยต่อหนึ่งวัฏจักรคือ 12.9 Standard Liters ต่อวัฏจักร และเมื่อคำนวณการใช้เชื้อเพลิงโดยใช้การปรับขนาดเซย คือ 17.7 Standard Liters ต่อวัฏจักร



รูปที่ 6-6 ผลทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load leveled ใน
วัฏจักรแรกตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15



รูปที่ 6-7 ผลทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load leveled ใน
วัฏจักรที่ห้าตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15

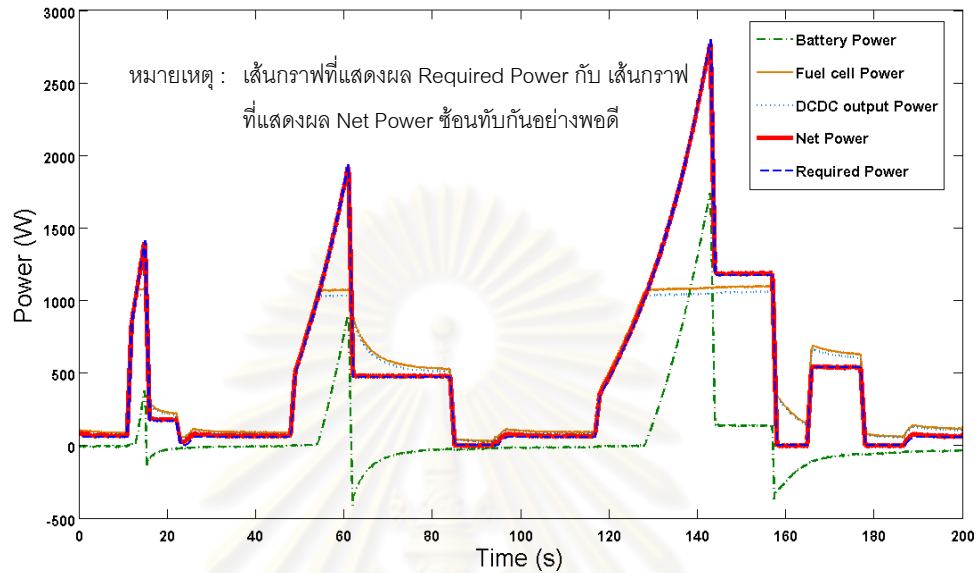
6.2.3.2 การทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่โดยใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load Following

การทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยกลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load following นั้น ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 6.2.2 ที่ได้แบ่งการปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออกเป็นสองรูปแบบคือ 1) ปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าเริ่มแรกของแบตเตอรี่ คือปรับตั้งที่ 52.1 โวลต์ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นของแบตเตอรี่คือ 51.8 โวลต์ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 6-8 และ 2) การปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มแรกของแบตเตอรี่เล็กน้อย คือปรับตั้งที่ 50.0 โวลต์ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเริ่มแรกของแบตเตอรี่คือ 52.2 โวลต์ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 6-9 ซึ่งพบว่าทั้งสองแบบนี้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอแก่ความต้องการตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15

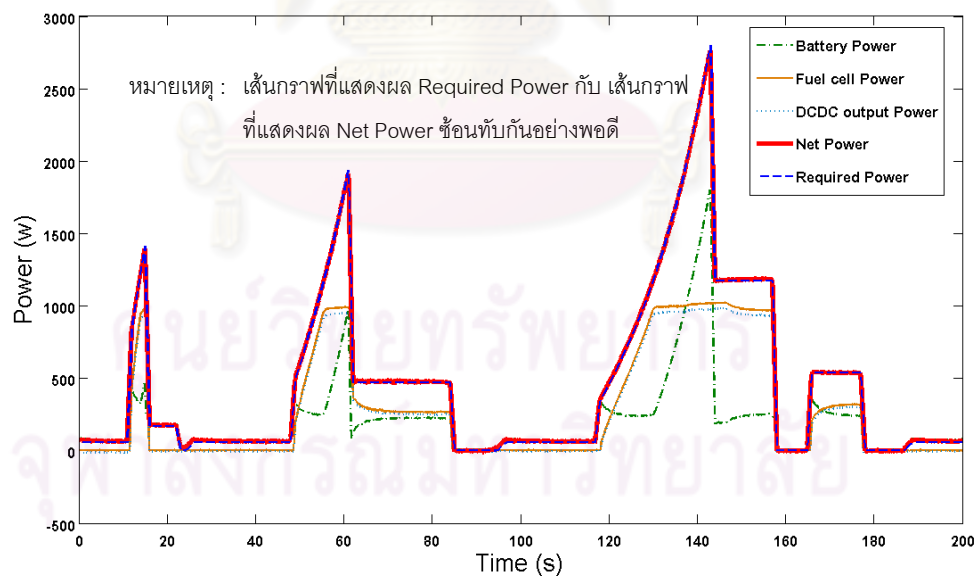
การปรับตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าแบบแรกนั้นสังเกตได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงจะจ่ายกำลังไฟฟ้าตามภาระที่ต้องการก่อน และหากค่าภาระที่ต้องการมีค่ามากเกินกว่าค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง แบตเตอรี่จึงเริ่มจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ามาเสริมให้เพียงพอต่อความต้องการ ในขณะที่การปรับตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าแบบที่สองนั้นสังเกตได้ว่าแบตเตอรี่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าก่อนจากนั้นจึงลดระดับการจ่ายลงตามลำดับพร้อมกันกับการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นดังช่วงเวลา 48 ถึง 55 วินาที และ 118 ถึง 130 วินาที ในรูปที่ 6-9 แต่หากภาระทางไฟฟ้ามีค่ามากเกินกว่าค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง แบตเตอรี่จะทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเสริมให้เพียงพอแก่ความต้องการดังช่วงเวลา 55 ถึง 61 วินาที และ 130 ถึง 143 วินาที นอกจากนั้นหากพิจารณาในด้านการชาร์จคืนให้กับแบตเตอรี่แล้วเห็นได้ว่าการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าแบบแรกนั้น มีการชาร์จคืนให้กับแบตเตอรี่เพียงเล็กน้อย และการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าแบบที่สองนั้นไม่มีการชาร์จคืนให้กับแบตเตอรี่เลย ซึ่งทั้งสองแบบของการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้านั้นสอดคล้องกับแนวคิดของกลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load following ที่ไม่เน้นการชาร์จคืนให้กับแบตเตอรี่ในขณะใช้งาน การปรับตั้งทั้งสองแบบแสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมพัทธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ มีผลต่อรายละเอียดของการแบ่งจ่ายพลังงานแตกต่างกัน แต่ยังคงเป็นไปตามแนวคิดของกลยุทธ์การแบ่งจ่ายแบบ Load following

ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ยต่อหนึ่งวัฏจักรของการปรับแรงดันไฟฟ้าแบบที่หนึ่งและแบบที่สองคือ 18.1 Standard Liters ต่อวัฏจักร และ 12.5 Standard Liters ต่อวัฏจักร ตามลำดับและ

เมื่อคำนวณการใช้เชื้อเพลิงโดยใช้การปรับขนาดเชื้อ คือ 19.7 Standard Liters ต่อวัฏจักร และ 21.3 Standard Liters ต่อวัฏจักร



รูปที่ 6-8 ผลทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load Following โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าให้ใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นของแบตเตอรี่



รูปที่ 6-9 ผลทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load Following โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นของแบตเตอรี่

6.2.4 วิจารณ์ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่

การทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้แบตเตอรี่เข้ามาช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ากับเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเพิ่มขีดความสามารถของการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงได้อย่างเพียงพอแก่ความต้องการทางไฟฟ้าตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 การติดตั้งแบบใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load leveled ซึ่งกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้าคงที่ในช่วงการใช้งานที่ให้ค่าประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงสูง นอกจากนี้จะเป็นการใช้งานที่ประหยัดเชื้อเพลิงแล้ว การที่ให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานคงที่นั้นเป็นการใช้งานที่ช่วยให้ระบบควบคุมกระบวนการภายในเซลล์เชื้อเพลิงไม่ต้องทำงานหนักมากนัก จึงช่วยในเรื่องอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามการใช้งานในลักษณะนี้อาจมองได้ว่าเป็นการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่คุ้มค่าแก่ความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงจะให้ได้ เนื่องจากกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานในระดับกำลังที่ต่ำอยู่ตลอดเวลา นอกจากนั้นสังเกตได้ว่าในแต่ละวัฏจักรพลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายมีค่ามากกว่าพลังงานที่แบตเตอรี่รับ ดังนั้นหากใช้งานเช่นนี้ต่อไปแบตเตอรี่จะมีระดับการประจุที่ลดลงตามลำดับจนถึงระดับที่ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในที่สุด ดังนั้นการนำไปใช้งานจึงจำเป็นต้องมีการนำแบตเตอรี่ออกมาชาร์จโดยอุปกรณ์ภายนอก

การติดตั้งแบบใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load following สามารถมองได้ว่าเป็นการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงที่คุ้มค่าเนื่องจากการใช้งานที่ให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้ามากน้อยตามแต่ภาระ ผลการทดสอบก็แสดงว่าเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าตามภาระได้อย่างรวดเร็วเพียงพอ อย่างไรก็ตามการใช้งานที่ให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงและไม่คงที่นี้ทำให้ระบบควบคุมกระบวนการภายในเซลล์เชื้อเพลิงต้องทำงานหนัก ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้ของเซลล์เชื้อเพลิงได้ โดยเฉพาะการปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าแบบแรก (รูปที่ 6-8) ซึ่งสังเกตได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้าตามภาระทันที ในขณะที่การปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าแบบที่สอง (รูปที่ 6-9) นั้นแบตเตอรี่จะเป็นตัวที่ตอบสนองต่อภาระก่อน ช่วยให้การจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะที่ไม่แปรเปลี่ยนอย่างรวดเร็วเกินไป ดังนั้นหากต้องการใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load following แล้วการปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าแบบที่สองจึงดูเป็นทางเลือกมากกว่า นอกจากนั้นการติดตั้งโดยใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load following นั้นไม่ได้มุ่งเน้นที่การชาร์จคืนให้กับแบตเตอรี่ในขณะที่ขับซึ่งที่นั่นแบตเตอรี่จะมีระดับการประจุที่ลดลงตามลำดับจนถึงระดับที่ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในที่สุด ดังนั้นการนำไปใช้งานจึงจำเป็นต้องมีการนำแบตเตอรี่ออกมาชาร์จโดยอุปกรณ์ภายนอกเช่นกัน

6.2.5 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่

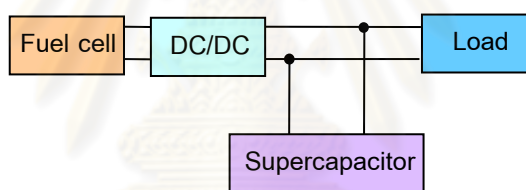
จากข้อสังเกตเกี่ยวกับการทดสอบและการนำไปใช้งานต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ เห็นได้ว่าการติดตั้งโดยใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load leveled นั้นเป็นการใช้งานที่ให้ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงที่สูงพร้อมกันกับเป็นการใช้งานที่ไม่ก่อให้เกิดความเครียดแก่เซลล์เชื้อเพลิงมากเกินไปเนื่องจากเป็นการทำงานแบบจ่ายกำลังไฟฟ้าคงที่ และหากต้องการหลีกเลี่ยงความจำเป็นของการนำแบตเตอรี่ออกมาชาร์จโดยอุปกรณ์ภายนอกนั้น สามารถทำได้โดยการติดตั้งระบบควบคุมค่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเข้าไปในระบบขับเคลื่อน เพื่อปรับการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงให้มีระดับที่สูงขึ้นหากตรวจพบว่าแบตเตอรี่มีระดับประจุที่ต่ำลงจนถึงค่าที่กำหนด หรือปรับลดการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงให้มีระดับที่ต่ำลงหากตรวจพบว่าแบตเตอรี่มีระดับการประจุที่สูงมากพอ ซึ่งหากสามารถนำกลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load leveled มาผสมผสานเข้ากับระบบควบคุมค่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงให้ดำเนินการไปได้เหมาะสมแล้ว ระบบดังกล่าวจะสามารถรักษาระดับการประจุของแบตเตอรี่ให้อยู่ในระดับที่สามารถทำงานได้ตลอดการขับขี่

6.3 ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง

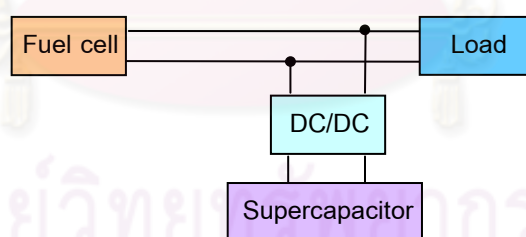
การทดสอบชุดเก็บประจุความจุสูงรวมถึงอุปกรณ์ย่อยอื่นในบทที่ 5 ช่วยให้ทราบถึงข้อพิจารณาเพิ่มเติมสำหรับการติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและชุดเก็บประจุความจุสูงกล่าวคือ นอกจากต้องพิจารณาการออกแบบในเชิงพลังงานแล้ว สิ่งที่ต้องให้ความสำคัญคือแรงดันไฟฟ้าทำงานของอุปกรณ์ย่อยซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำงานร่วมกัน ประกอบกับการออกแบบเพื่อการเปรียบเทียบกับระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและแบตเตอรี่ดังจะกล่าวในบทที่ 7 ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงพิจารณาปรับปรุงการกำหนดขนาดของชุดเก็บประจุความจุสูงจากเดิมที่ได้กำหนดขนาดที่ 1500 ฟารัดต่อหน่วย เชื่อมต่อแบบอนุกรม 14 หน่วย และมีแรงดันไฟฟ้าสูงที่ 37.8 โวลต์ มาเป็นขนาด 3000 ฟารัดต่อหน่วย เชื่อมต่อแบบอนุกรม 18 หน่วย และมีแรงดันไฟฟ้าสูงที่ 48.6 โวลต์

6.3.1 การติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง

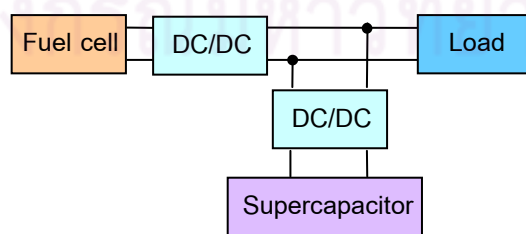
ในเบื้องต้นนั้นแนวทางการติดตั้งระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดแบบทำงานร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูงอาจพิจารณาได้สามแนวทางคือ 1) แบบใช้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 6-10 ก และ 2) แบบใช้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงรูปที่ 6-10 ข และ 3) แบบใช้แหล่งพลังงานทั้งสองทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแต่ละตัวรูปที่ 6-10 ค อย่างไรก็ตาม วิทยานิพนธ์นี้มีกรอบความคิดที่ต้องคำนึงถึงการติดตั้งระบบสำหรับรถจักรยานยนต์ จึงมุ่งเน้นที่การใช้อุปกรณ์ให้น้อยชิ้นที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังนั้นจึงมุ่งมาที่การติดตั้งในสองรูปแบบแรกมากกว่าแบบที่สาม แม้จะพิจารณาว่าการติดตั้งแบบที่สามนั้นจะให้การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าได้คงที่และอยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ดีกว่าดังนั้นในส่วนนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดและข้อพิจารณาในการติดตั้งระบบเฉพาะสองรูปแบบแรก



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 6-10 แนวทางการติดตั้งระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดแบบทำงานร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูง

6.3.1.1 การติดตั้งโดยให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ส่วนแรกที่ต้องพิจารณาคือระดับแรงดันไฟฟ้าใช้งานของแหล่งจ่ายพลังงานทั้งสอง และชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 24.3 ถึง 48.6 โวลต์ ขึ้นอยู่กับพลังงานสะสม และ เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ 26 ถึง 42 โวลต์ ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่จ่าย โดยเซลล์เชื้อเพลิงจะทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดที่การจ่ายกระแส 12 แอมแปร์ ซึ่งเป็นจุดที่ให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงประมาณ 34 โวลต์ และพิจารณาการทำงานของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งสามารถรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าได้ในช่วง 12 ถึง 61 โวลต์ โดยทำงานแบบเพิ่มแรงดัน (Step up) และสามารถปรับตั้งค่ากระแสไฟฟ้าขาออกได้ตามต้องการ แต่ต้องมีค่าสูงกว่าแรงดันขาเข้า 2 โวลต์ และอยู่ในช่วง 14 ถึง 63 โวลต์

จากการพิจารณาด้านแรงดันไฟฟ้าใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะติดตั้งในรูปแบบดังกล่าวนี้ โดยแนวคิดการติดตั้งจะคล้ายกับการติดตั้งระบบที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกับแบตเตอรี่ โดยการติดตั้งนั้นจะต้องปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้ตรงกับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของชุดเก็บประจุความจุสูง ซึ่งก็คือ 48.6 โวลต์ ซึ่งจะเป็นการชาร์จให้กับชุดเก็บประจุความจุสูงตลอดเวลาที่ไม่มีภาระหรือมีภาระต่ำ นอกจากการปรับตั้งค่าแรงดันขาออกแล้วจะต้องปรับตั้งค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าสู่ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งก็คือการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงนั่นเอง ในเบื้องต้นนั้นได้จำกัดกระแสไฟฟ้าที่ 12 แอมแปร์ เพราะเป็นจุดที่เซลล์เชื้อเพลิงให้ประสิทธิภาพสูงสุด

เมื่อพิจารณาการแบ่งจ่ายพลังงานจากการติดตั้งระบบดังกล่าว อาจคาดหมายได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่รับภาระเพียงฝ่ายเดียว หากค่าภาระนั้นไม่เกินจากค่าที่จำกัดไว้ (12 แอมแปร์) แต่ถ้าระบบมีภาระสูงขึ้นเกินกว่าที่จำกัดกระแสเซลล์เชื้อเพลิงไว้ ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะจำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงโดยการลดระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้ต่ำกว่าที่ตั้งไว้ ในจุดนี้จึงเป็นจุดที่ชุดเก็บประจุความจุสูงเริ่มรับภาระ และเมื่อภาระลดต่ำลงเซลล์เชื้อเพลิงก็จะทำหน้าที่รับภาระพร้อมกันกับชาร์จให้ชุดเก็บประจุความจุสูงเช่นเดิม

ดังที่ได้กล่าวไปในตอนต้นว่าชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำงานแบบเพิ่มแรงดัน (Step up) และการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงนั้นก็ทำได้โดยการลดระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงลง ดังนั้นหากเกิดกรณีที่ชุดเก็บประจุความจุสูงจ่ายพลังงานออกไปมากจนทำให้แรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง ลดต่ำลงกว่าแรงดันขาเข้าของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ในที่นี้ คือ 34 โวลต์ หากต้องการจำกัดกระแสไฟฟ้าเซลล์

เชื้อเพลิงที่ 12 แอมแปร์) ผลคือจะไม่สามารถจำกัดกระแสจากเซลล์เชื้อเพลิงได้ จะเหมือนกับการต่อตรงเซลล์เชื้อเพลิงเข้ากับชุดเก็บประจุความจุสูง และหากชุดเก็บประจุความจุสูงจ่ายพลังงานต่อไปอีกจนแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 26 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงขณะรับภาระสูงสุด ผลคือทำให้เซลล์เชื้อเพลิงรับภาระเกิน (Overload) ซึ่งอาจทำความเสียหายแก่เซลล์เชื้อเพลิงได้ อย่างไรก็ตาม ระบบควบคุมภายในเซลล์เชื้อเพลิงจะสั่งให้เซลล์เชื้อเพลิงหยุดการทำงาน (Shutdown) หากตรวจพบว่ามีภาระเกินเพื่อป้องกันความเสียหาย นอกจากนั้นในขณะที่เริ่มต้นติดตั้งหากนำชุดเก็บประจุความจุสูงที่ไม่ได้ชาร์จไว้ก่อนมาติดตั้งทันที ผลจะเหมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงถูกลัดวงจร ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมภายในเซลล์เชื้อเพลิงสั่งให้เซลล์เชื้อเพลิงหยุดการทำงาน (Shutdown) ลงเช่นกัน

การป้องกันไม่ให้เซลล์เชื้อเพลิงเกิดการหยุดทำงานจากสาเหตุดังกล่าวนั้นอาจแก้ไขได้โดยติดตั้งวงจรที่สามารถสลับให้มีการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรมกับเข้ากับเซลล์เชื้อเพลิงหากตรวจพบว่าชุดเก็บประจุความจุสูงมีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 26 โวลต์ แต่วิธีนี้อาจทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปกับตัวต้านทาน

6.3.1.2 การติดตั้งโดยให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

สิ่งแรกที่ต้องพิจารณาก็คือระดับแรงดันไฟฟ้าใช้งานเช่นเดียวกันกับการติดตั้งแบบที่หนึ่งซึ่งพบว่ามีความเป็นไปได้ โดยปรับตั้งให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่าย เช่นในที่นี้คือ 34 โวลต์ ซึ่งเป็นจุดที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกระแสไฟฟ้า 12 แอมแปร์ และเซลล์เชื้อเพลิงให้ประสิทธิภาพสูงสุด

การปรับตั้งแรงดันไฟฟ้านี้จะต้องปรับในขณะที่แรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงมีค่าไม่เกิน 32 โวลต์ เนื่องจากชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีการทำงานแบบเพิ่มแรงดัน (Step up) แต่จะต้องไม่ต่ำกว่า 12 โวลต์ เพราะชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะไม่ทำงานหากแรงดันไฟฟ้าขาเข้าต่ำกว่า 12 โวลต์

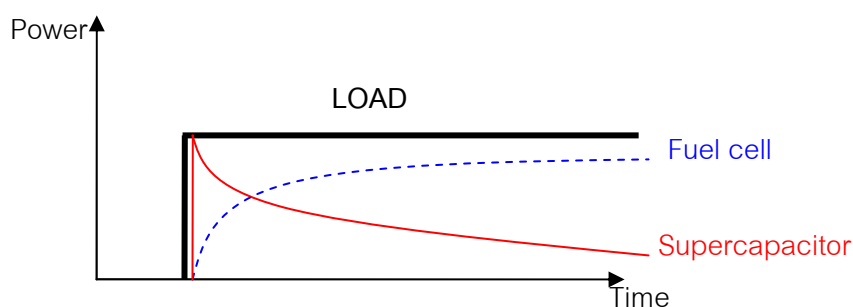
เพื่อให้เกิดความเข้าใจในลักษณะการแบ่งจ่ายพลังงานได้โดยง่ายในที่นี้จะแบ่งลักษณะการทำงานออกเป็น 3 ช่วง โดยแบ่งตามแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง คือ 1) แรงดันไฟฟ้า 12 ถึง 34 โวลต์ 2) แรงดันไฟฟ้า 34 โวลต์ ขึ้นไป และ 3) แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 12 โวลต์

1) แรงดันไฟฟ้าชุดเก็บประจุความจุสูงมีค่า 12 ถึง 34 โวลต์

ในช่วงแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงนี้ ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถทำงานที่แรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 34 โวลต์ ได้ ผลคือเซลล์เชื้อเพลิงจะจ่าย 12 แอมแปร์ (สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง 34 โวลต์) ตลอดเวลา โดยชุดเก็บประจุความจุสูงช่วยจ่ายพลังงานในส่วนที่ขาดหากมีภาระสูง หรือชาร์จให้กับชุดเก็บประจุความจุสูงหากมีภาระน้อย

2) แรงดันไฟฟ้าชุดเก็บประจุความจุสูงมีค่า 34 โวลต์ ขึ้นไป

เมื่อชุดเก็บประจุความจุสูงถูกชาร์จจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นและเมื่อมากขึ้นจนถึงแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ตั้งเอาไว้ (34 โวลต์) ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะไม่ทำงานเนื่องจากชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีการทำงานแบบเพิ่มแรงดัน (Step up) ซึ่งจะเหมือนกับการต่อชุดเก็บประจุความจุสูงตรงเข้ากับเซลล์เชื้อเพลิง ผลคือเซลล์เชื้อเพลิงจะลดการจ่ายกระแสไฟฟ้าลงตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง และแรงดันของชุดเก็บประจุความจุสูงจะมีค่าเข้าใกล้แรงดันสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงในที่สุด (42 โวลต์) และเมื่อมีภาระในช่วงที่ชุดเก็บประจุความจุสูงยังคงมีแรงดันสูงกว่า 34 โวลต์ นี้ การแบ่งจ่ายพลังงานจะมีลักษณะดังรูปที่ 6-11 คือชุดเก็บประจุความจุสูงจะรับภาระก่อนและจากนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงจะเพิ่มระดับการจ่ายกำลังไฟฟ้ามากขึ้นตามการลดลงของแรงดันไฟฟ้าในชุดเก็บประจุความจุสูง



รูปที่ 6-11 ลักษณะการแบ่งจ่ายพลังงานในขณะที่ชุดเก็บประจุความจุสูงมีระดับแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 34 โวลต์

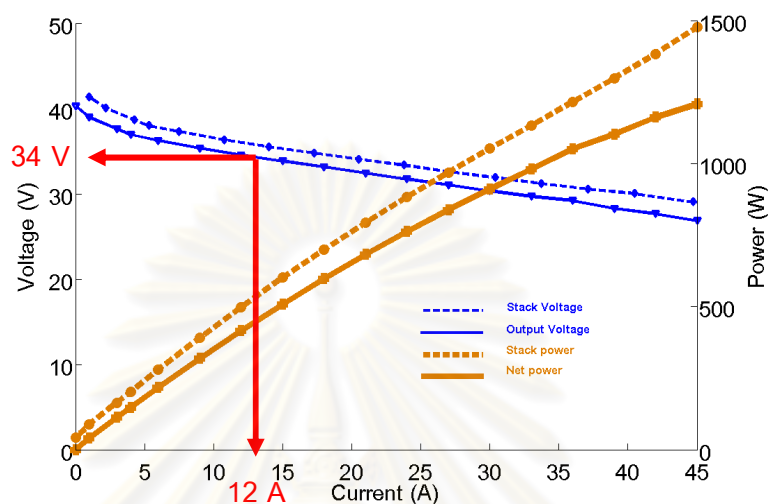
3) แรงดันไฟฟ้าชุดเก็บประจุความจุสูงมีค่าต่ำกว่า 12 โวลต์

หากให้ชุดเก็บประจุความจุสูงจ่ายพลังงานจนมีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 12 โวลต์ แล้วจะทำให้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่ทำงาน ผลคือจะเหมือนการต่อชุดเก็บประจุความจุสูงตรงเข้ากับเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งด้วยระดับแรงดันที่ต่ำนี้จะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงรับภาระเกิน เป็นผลให้ระบบควบคุมภายในเซลล์เชื้อเพลิงสั่งให้เซลล์เชื้อเพลิงหยุดการทำงาน (Shutdown) นอกจากนี้ในการใช้งานชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นไม่ควรที่จะให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานที่แรงดันไฟฟ้าต่ำเพียงนี้เช่นกัน ด้วยเหตุผลในหลายด้าน เช่น ด้านประสิทธิภาพของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือข้อจำกัดของวงจรรักษาสมดุลแรงดันไฟฟ้าในชุดเก็บประจุความจุสูง (Balancing circuit) เป็นต้น โดยทั่วไปมักกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดในการทำงานมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (ในที่นี้ คือ 24.3 โวลต์)

เพื่อป้องกันไม่ให้เซลล์เชื้อเพลิงเกิดการหยุดทำงานจากสาเหตุดังกล่าวนี้วิธีแก้ไขอาจทำได้โดยติดตั้งวงจรที่สามารถสลับให้มีการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรมกับเข้ากับเซลล์เชื้อเพลิงในลักษณะเดียวกับการติดตั้งในรูปแบบแรก

สำหรับการติดตั้งในรูปแบบนี้จะสังเกตว่า ไม่มีการปรับตั้งการจำกัดกระแสที่ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเป็นกระแสไฟฟ้าจากชุดเก็บประจุความจุสูงซึ่งสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงมากได้ จึงไม่มีความจำเป็นในการจำกัดกระแสไฟฟ้าในจุดนี้ แต่จุดที่มีความจำเป็นในการจำกัดกระแสนั้นคือกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งการติดตั้งในรูปแบบที่สองนี้จะจำกัดกระแสไฟฟ้าโดยการปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ให้

กระแสไฟฟ้าตามต้องการ เช่น ต้องการให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่าย 12 แอมแปร์ ต้องตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เท่ากับ 34 โวลต์ ดังรูปที่ 6-12 เป็นต้น



รูปที่ 6-12 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

6.3.2 ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง

6.3.2.1 ผลการทดสอบโดยใช้การติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

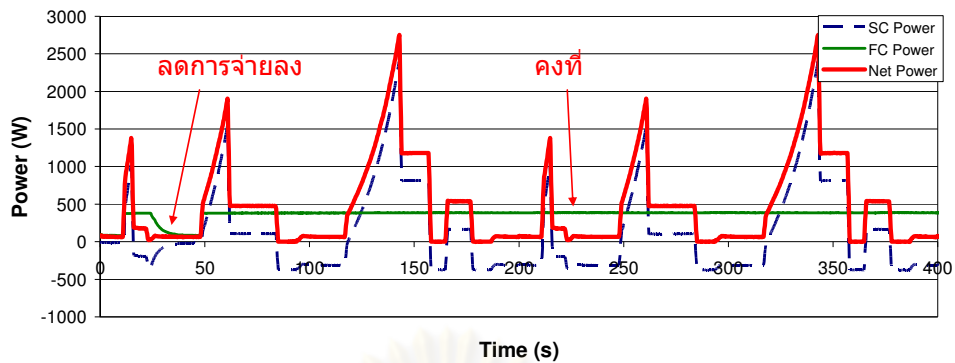
การทดสอบในรูปแบบการติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้แบ่งออกเป็นสองรูปแบบการปรับตั้ง คือ 1) การปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (12 แอมแปร์) และ 2) การปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (24 แอมแปร์)

6.3.2.1.1 ผลการทดสอบโดยการปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

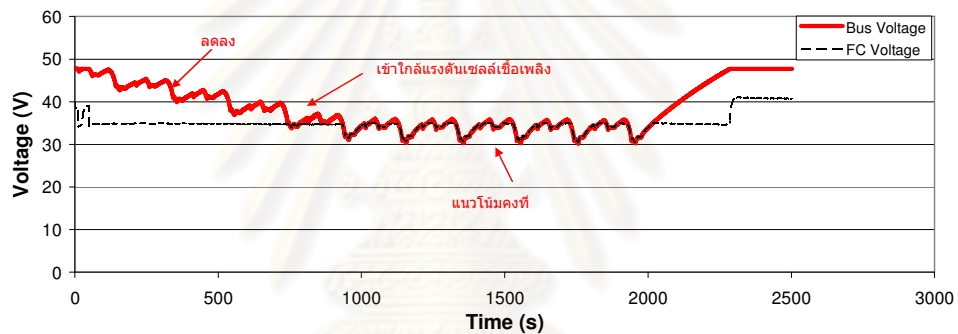
รูปที่ 6-13 แสดงให้เห็นว่าในช่วงวัฏจักรแรกนั้น เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างคงที่ตามที่ได้กำหนดไว้ แต่มีบางช่วงเวลาที่มีการลดการจ่ายลงในช่วงเวลาที่มีภาระน้อยและชุดเก็บประจุความจุสูงมีระดับพลังงานที่เต็ม ซึ่งชุดเก็บประจุความจุสูงก็สามารถทำหน้าที่จ่ายและรับพลังงานไฟฟ้าในส่วนที่เกินได้อย่างดี แต่เมื่อพิจารณาแนวโน้มของระดับพลังงาน (ระดับแรงดันไฟฟ้า) ของชุดเก็บประจุความจุสูง ในช่วงห้าวัฏจักรแรก ซึ่งก็คือช่วงเวลาที่ 0 ถึง 1000 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 6-14 พบว่ามีระดับที่ลดลงตามลำดับ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้าน้อยเกินไปส่งผลให้พลังงานที่ออกจากชุดเก็บประจุความจุสูงมีค่ามากกว่าพลังงานที่รับเข้าสู่ชุดเก็บประจุความจุสูงจึงทำให้ระดับพลังงานมีแนวโน้มที่ลดลงดังกล่าว และเมื่อพิจารณาช่วงห้าวัฏจักรท้าย พบว่าการที่ชุดเก็บประจุความจุสูงมีแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง และลดลงต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงดังรูปที่ 6-14 ส่งผลให้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังรูปที่ 6-15 เนื่องจากชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเป็นชนิดเพิ่มแรงดัน (Step up) ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงต้องจ่ายกำลังไฟฟ้ามากขึ้นและจากการที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้ามากขึ้นนี้ทำให้ระดับพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูงกลับมามีแนวโน้มที่คงที่ โดยไม่ลดต่ำลงไปอีกดังช่วงเวลาที่ 1000 ถึง 2000 วินาที ในรูปที่ 6-14

ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ยต่อหนึ่งวัฏจักรในช่วงเวลาที่ยังคงจำกัดกระแสไฟฟ้าได้อยู่คือ 14.0 Standard Liters ต่อวัฏจักร และปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ยต่อหนึ่งวัฏจักรในช่วงเวลาที่ไม่สามารถจำกัดกระแสไฟฟ้าได้ คือ 18.1 Standard Liters ต่อวัฏจักร และเมื่อคำนวณการใช้เชื้อเพลิงโดยใช้การปรับชดเชย คือ 17.5 Standard Liters ต่อวัฏจักร และ 17.8 Standard Liters ต่อวัฏจักร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าหากมีการคำนวณปรับชดเชยแล้วจะได้ค่าการใช้เชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกัน

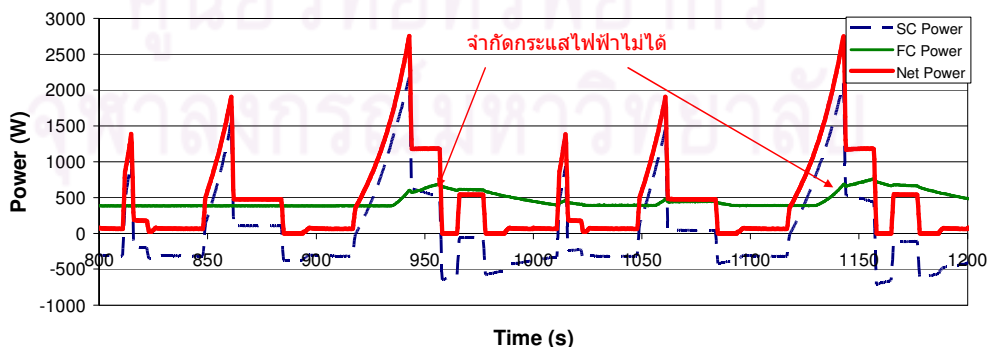
หากพิจารณาในด้านแรงดันไฟฟ้าของระบบ (Bus Voltage) แล้วจะเห็นว่าจากรูปแบบการติดตั้งนั้น แรงดันไฟฟ้าของระบบก็คือแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงนั่นเอง และเห็นได้ว่าตลอดการทดสอบนั้นแรงดันไฟฟ้าของระบบมีการแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วงที่กว้างมากคือ 30 ถึง 48 โวลต์ ซึ่งในการใช้งานจริงนั้น ชุดควบคุมมอเตอร์จะต้องสามารถรองรับการแปรเปลี่ยนของแรงดันไฟฟ้านี้ได้



รูปที่ 6-13 การแบ่งจ่ายพลังงานในสองวัฏจักรแรกของการติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 6-14 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของการติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 6-15 การแบ่งจ่ายพลังงานในสองวัฏจักรสุดท้ายของการติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

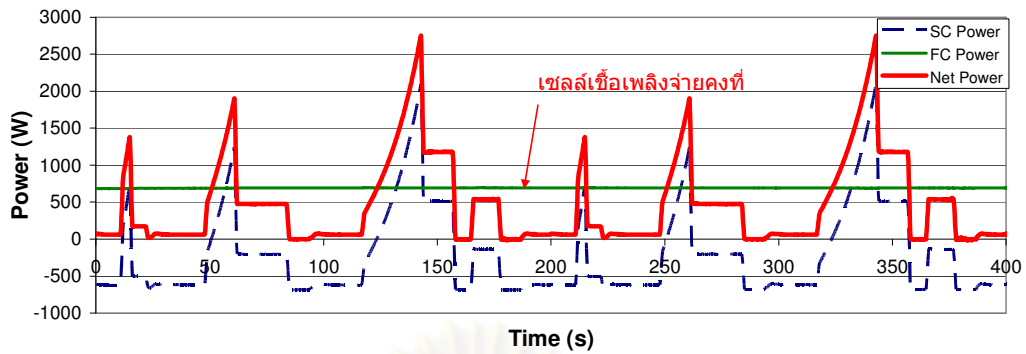
6.3.2.1.2 ผลการทดสอบโดยการปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

การปรับตั้งค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้าในหัวข้อที่ 6.3.2.1.1 พบว่ามีปัญหาการลดลงของระดับพลังงานในชุดเก็บประจุความจุสูง และปัญหาการแปรเปลี่ยนของแรงดันไฟฟ้ามีช่วงที่กว้างมาก แสดงให้เห็นว่าการกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นให้กำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอ ดังนั้นในส่วนนี้จึงใช้การปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นโดยประสิทธิภาพไม่ต่ำลงมากนัก โดยเลือกการจำกัดกระแสไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ 24 แอมแปร์

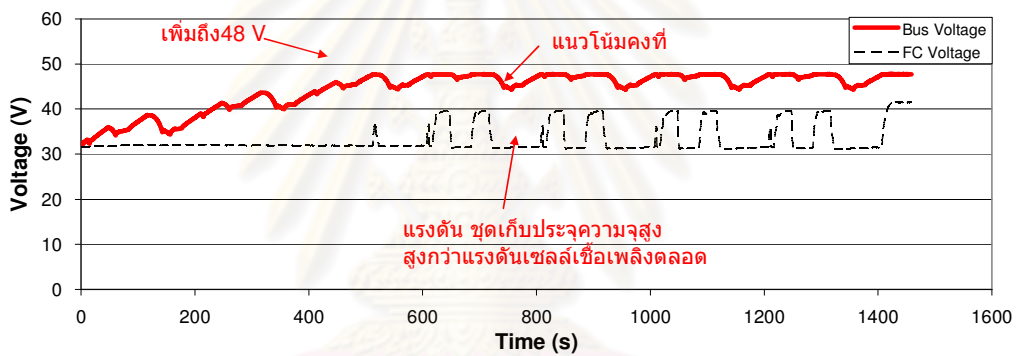
จากรูปที่ 6-16 เห็นได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าแบบคงที่ตลอดเวลาในช่วงสองวัฏจักรแรก เนื่องจากในการทดสอบนั้นกำหนดให้ระดับพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูงในตอนเริ่มต้นมีค่าที่ต่ำ ดังรูปที่ 6-17 ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงจึงยังคงจ่ายกำลังไฟฟ้าคงที่อยู่แม้ว่าเป็นช่วงเวลาที่มีการระคายเพื่อชาร์จให้กับชุดเก็บประจุความจุสูง และชุดเก็บประจุความจุสูงสามารถทำหน้าที่จ่ายและรับพลังงานไฟฟ้าในส่วนที่เกินได้อย่างดี และตั้งแต่วัฏจักรที่สามเป็นต้นไปดังรูปที่ 8 เห็นได้ว่าระดับพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นอยู่ในระดับที่เต็ม ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีการลดระดับการจ่ายกำลังไฟฟ้าลงบางช่วงเวลาดังรูปที่ 6-18 นอกจากนั้นสังเกตได้ว่าชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถจำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงได้ตลอดเวลาเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (แรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง) นั้นไม่เคยลดลงต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง)

ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ยต่อหนึ่งวัฏจักรในช่วงสองวัฏจักรแรกที่ชุดเก็บประจุความจุสูงยังไม่เต็มอยู่ คือ 26.7 Standard Liters ต่อวัฏจักร และปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ยต่อหนึ่งวัฏจักรช่วงวัฏจักรท้ายที่ชุดเก็บประจุความจุสูงเต็ม คือ 19.3 Standard Liters ต่อวัฏจักร และเมื่อคำนวณการใช้เชื้อเพลิงโดยใช้การปรับชดเชย คือ 18.7 Standard Liters ต่อวัฏจักร และ 18.6 Standard Liters ต่อวัฏจักร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าหากมีการคำนวณปรับชดเชยแล้วจะได้ค่าการใช้เชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกัน

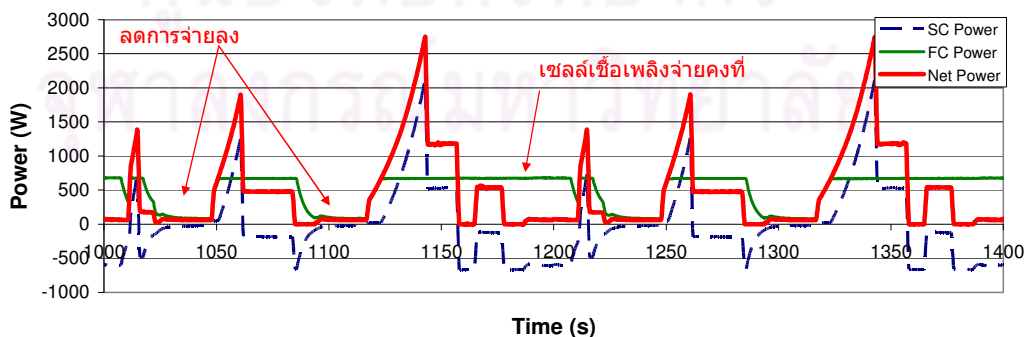
หากพิจารณาในด้านแรงดันไฟฟ้าของระบบ (Bus Voltage) แล้วจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าของระบบมีค่าสูงกว่าการปรับตั้งแบบแรก และแกว่งตัวอยู่ในระดับที่แคบคืออยู่ในช่วง 45 ถึง 48 โวลต์ ซึ่งช่วยให้การนำมาใช้งานร่วมกับชุดควบคุมมอเตอร์เป็นไปได้โดยง่าย



รูปที่ 6-16 การแบ่งจ่ายพลังงานในสองวัฏจักรแรกของการติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 6-17 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของการติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 6-18 การแบ่งจ่ายพลังงานในสองวัฏจักรท้ายของการติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

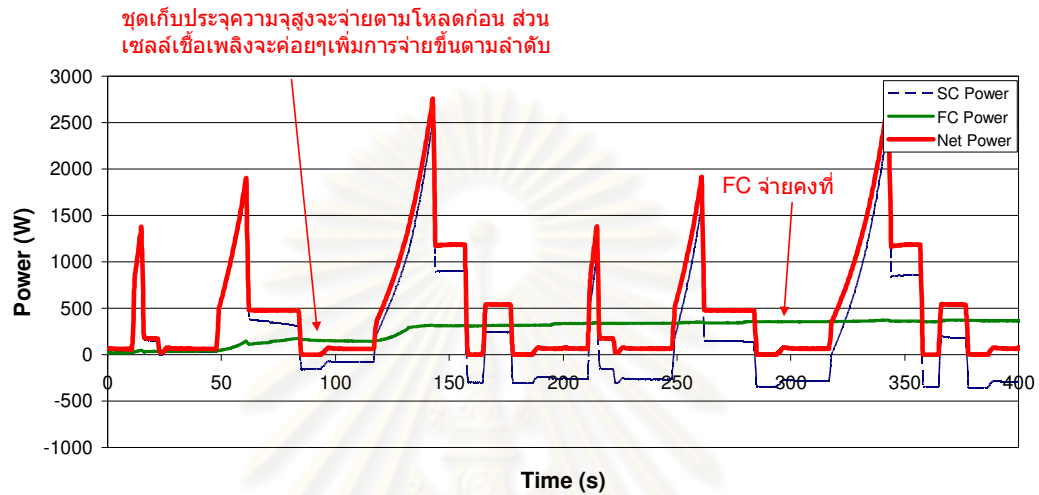
6.3.2.2 ผลการทดสอบโดยใช้การติดตั้งแบบให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

การทดสอบในรูปแบบการการติดตั้งแบบให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้น ได้แบ่งออกเป็นสองรูปแบบการปรับตั้ง คือ 1) การปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (34 โวลต์) และ 2) การปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

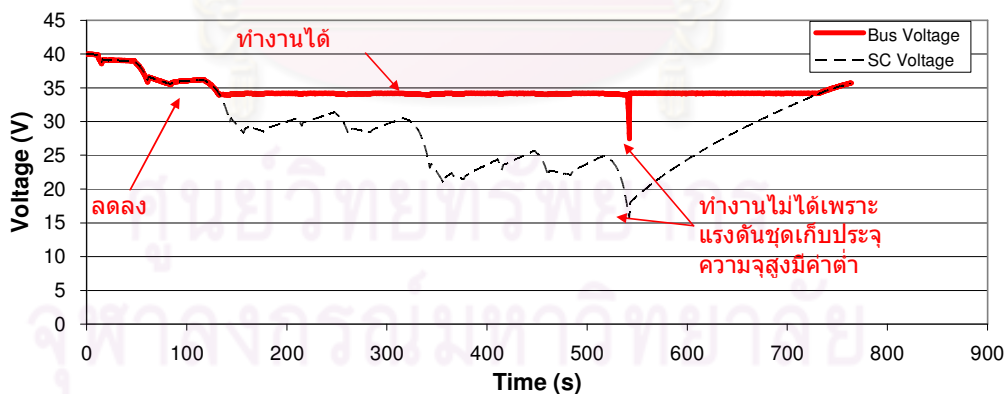
6.3.2.2.1 ผลการทดสอบโดยการปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

จากรูปที่ 6-20 เห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง (แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) ในขณะที่เริ่มต้นมีค่าเกินกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ปรับตั้งไว้ (34 โวลต์) และชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ต่อกับชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นเป็นชนิดเพิ่มแรงดัน (Step up) จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบ(แรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) ไว้ที่ 34 โวลต์ ได้ แต่จะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงส่งผลให้ลักษณะการแบ่งจ่ายพลังงานในขณะที่เริ่มต้นจะเป็นการให้ชุดเก็บประจุความจุสูงจ่ายตามภาระก่อน และเซลล์เชื้อเพลิงจะเพิ่มการจ่ายขึ้นตามระดับแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงที่ลดลงดังรูปที่ 6-19 ในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 150 วินาที หลังจากนั้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงลดลงจนต่ำกว่าที่ปรับตั้งไว้ (34 โวลต์) ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจึงสามารถควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าของระบบคงที่ที่ 34 โวลต์ ได้ ดังช่วงเวลา 100 ถึง 500 วินาที ในรูปที่ 6-20 ในช่วงเวลาที่ 100 ถึง 500 วินาที ซึ่งในช่วงเวลานี้เซลล์เชื้อเพลิงจะจ่ายกำลังไฟฟ้าคงที่ แต่เมื่อสังเกตแนวโน้มของแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง เห็นได้ว่ามีแนวโน้มที่ลดลงอย่างรวดเร็วตลอดการทดสอบ และในเวลา 542 วินาที ในรูปที่ 6-20 แรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงมีค่าลดต่ำมากจนทำให้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถเพิ่มแรงดันได้ต่อไปอีก ผลคือแรงดันไฟฟ้าของระบบลดต่ำลงอย่างรวดเร็วและทำให้ชุดรับภาระทางไฟฟ้าหยุดการทำงานเพื่อป้องกันความเสียหายดังรูปที่ 6-21

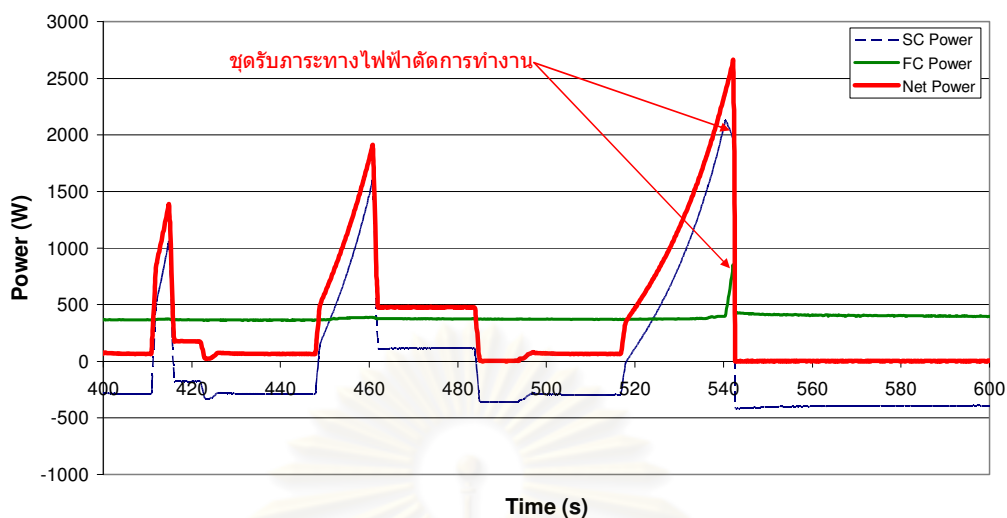
จากปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการลดต่ำลงของระดับแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงจนทำให้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถทำงานได้นั้น การปรับตั้งในรูปแบบนี้จึงถูกมองว่าไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน



รูปที่ 6-19 การแบ่งจ่ายพลังงานในสองวัฏจักรแรกของการติดตั้งแบบให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 6-20 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของการติดตั้งแบบให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 6-21 การแบ่งจ่ายพลังงานในสองวัฏจักรท้ายของการติดตั้งแบบให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

6.3.2.2.2 ผลการทดสอบโดยการปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

เพื่อให้เทียบได้กับการติดตั้งในหัวข้อที่ 6.3.2.1.2 ซึ่งกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดกระแสไฟฟ้าที่ 24 แอมแปร์ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงใช้การปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าเท่ากับ 31 โวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่สอดคล้องกับการจ่ายกระแสไฟฟ้า 24 แอมแปร์ จากเซลล์เชื้อเพลิง

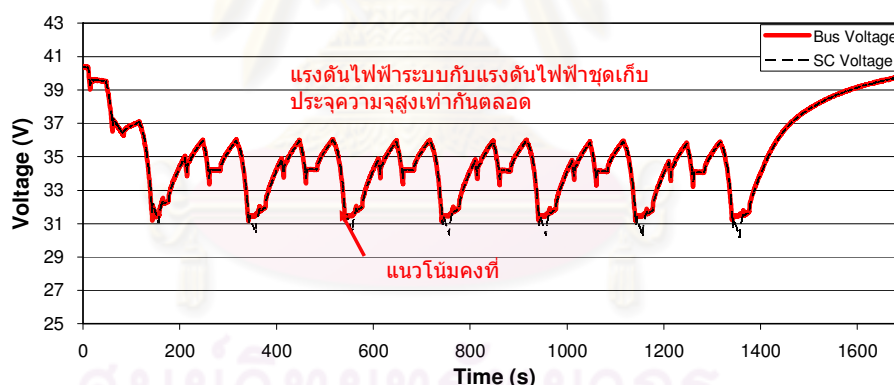
จากรูปที่ 6-22 เห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงตลอดการทดสอบ ไม่มีช่วงเวลาที่ลดลงต่ำกว่าค่าที่ปรับตั้งไว้สำหรับแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (31 โวลต์) ทำให้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบให้คงที่ที่ 31 โวลต์ ได้ จึงเหมือนกับการต่อตรงเซลล์เชื้อเพลิงเข้ากับชุดเก็บประจุความจุสูงซึ่งแรงดันไฟฟ้าของระบบ แรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง และแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงคือค่าเดียวกัน

สำหรับลักษณะการแบ่งจ่ายพลังงานนั้น เซลล์เชื้อเพลิงจะเพิ่มการจ่ายมากขึ้นตามการลดลงของแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (Polarization curve) ดังรูปที่ 6-12 นอกนั้นยังสังเกตได้ว่า

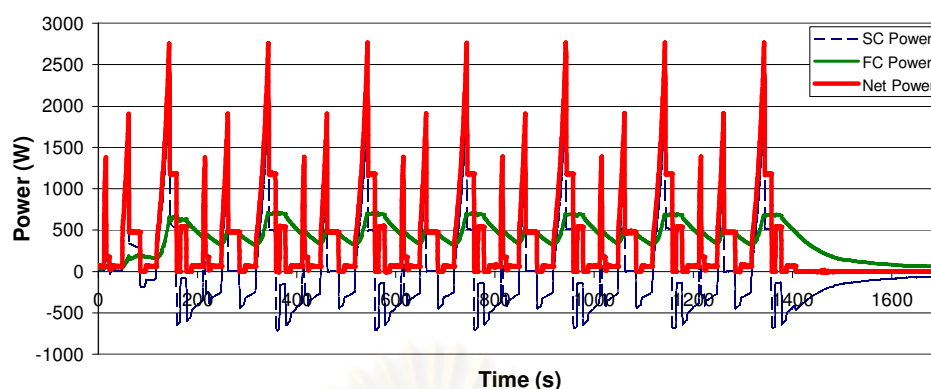
แรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงมีค่าที่ลดลงเฉพาะในช่วงวัฏจักรแรกเท่านั้น เนื่องจากในวัฏจักรแรกแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงมีค่ามาก จึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้าน้อย แต่หลังจากนั้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงมีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำลง ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้ามากขึ้นดังรูปที่ 6-23 ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงจะไม่ลดต่ำลงอีก แต่จะมีแนวโน้มที่คงที่ตลอดการทดสอบดังรูปที่ 6-22

ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ยต่อหนึ่งวัฏจักร คือ 16.5 Standard Liters ต่อวัฏจักร และเมื่อคำนวณการใช้เชื้อเพลิงโดยใช้การปรับชดเชย คือ 18.7 Standard Liters ต่อวัฏจักร

การปรับตั้งในรูปแบบนี้ไม่ได้ใช้ประโยชน์จากชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเลย เพราะว่ามีพฤติกรรมการแบ่งจ่ายพลังงานเหมือนกับการต่อตรงเซลล์เชื้อเพลิงเข้ากับชุดเก็บประจุความจุสูง และหากพิจารณาในด้านแรงดันไฟฟ้าของระบบ (Bus Voltage) แล้วเห็นได้ว่าตลอดการทดสอบนั้นแรงดันไฟฟ้าของระบบมีการแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วงที่กว้างมากคือ 31 ถึง 48 โวลต์ เช่นเดียวกับการติดตั้งในหัวข้อที่ 6.3.2.1.1 ซึ่งในการใช้งานจริงนั้น ชุดควบคุมมอเตอร์จะต้องสามารถรองรับการแปรเปลี่ยนของแรงดันไฟฟ้านี้ได้



รูปที่ 6-22 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของการติดตั้งแบบให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 6-23 ผลการทดสอบการแบ่งจ่ายพลังงานของการติดตั้งแบบให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

6.3.3 วิจัยรณผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง

การทดสอบแสดงให้เห็นว่า รูปแบบการติดตั้งระบบในแต่ละแบบนั้นให้ผลของลักษณะการทำงานที่แตกต่างกัน รวมถึงการปรับตั้งในรายละเอียดนั้นก็ส่งผลต่อลักษณะการทำงานด้วยเช่นกัน การติดตั้งในรูปแบบที่ให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แสดงให้เห็นว่าชุดเก็บประจุความจุสูงสามารถเพิ่มขีดความสามารถของการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงได้อย่างเพียงพอแก่ความต้องการทางไฟฟ้าตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 อย่างไรก็ตามการปรับตั้งโดยกำหนดให้มีการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ณ จุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น ไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ ในขณะที่การปรับตั้งโดยกำหนดให้จำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้นนั้นสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบให้อยู่ในช่วงใช้งานได้ดี คือ อยู่ในช่วง 45 ถึง 48 โวลต์ แต่ก็อาจมองได้ว่าเป็นการใช้งานชุดเก็บประจุความจุสูงได้ไม่คุ้มค่านักเนื่องจากชุดเก็บประจุความจุสูงสามารถใช้งานได้ในช่วงแรงดันไฟฟ้าที่กว้าง แต่การติดตั้งในรูปแบบดังกล่าวนี้ ชุดเก็บประจุความจุสูงถูกใช้งานในช่วงแคบเท่านั้น นอกจากนี้การใช้งานที่กำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นนั้น ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะต่ำลงส่งผลให้มีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อวัฏจักรสูงขึ้น

การติดตั้งในรูปแบบที่ให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้น แรงดันไฟฟ้าของระบบ (Bus Voltage) ถูกบังคับให้อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าใช้งาน

ของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมีค่าต่ำ (26 ถึง 42 โวลต์) นอกจากนั้นการที่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายจากเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีความสัมพันธ์ต่อแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งหากต้องการให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมาจะทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบนั้นต่ำลงด้วย ดังนั้นการปรับตั้งโดยกำหนดให้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าที่ 34 โวลต์ นั้น เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมาน้อย ส่งผลให้ชุดเก็บประจุความจุสูงต้องจ่ายกำลังไฟฟ้ามามากกว่าที่รับ ทำให้ชุดเก็บประจุความจุสูงมีระดับพลังงานที่ลดต่ำลงจนไม่สามารถทำงานได้ในที่สุด หรือหากใช้การปรับตั้งที่กำหนดให้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ต่ำลงเพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้ามากขึ้นนั้น แม้ว่าจากการทดสอบจะเห็นว่าชุดเก็บประจุความจุสูงจะมีระดับพลังงานที่สามารถใช้งานได้ตลอดการทดสอบ แต่พบว่าแรงดันไฟฟ้าของระบบนั้นมีการแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วงที่กว้างมาก ซึ่งจะส่งผลต่อการใช้งานร่วมกับชุดควบคุมมอเตอร์ และสมรรถนะของระบบได้

6.3.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนา

การทดสอบแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งโดยใช้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหนึ่งชุดต่อเข้ากับแหล่งจ่ายพลังงานตัวใดตัวหนึ่งนั้น ทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบ (Bus voltage) ถูกบังคับให้อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าใช้งานของแหล่งพลังงานอีกตัวหนึ่ง เช่น การติดตั้งโดยให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งก็คือแรงดันไฟฟ้าของระบบ จะถูกบังคับให้อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง หรือในกรณีที่ใช้การติดตั้งที่ให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งก็คือแรงดันไฟฟ้าของระบบ จะถูกบังคับให้อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทั้งสองนั้นมีช่วงแรงดันไฟฟ้าใช้งานที่กว้างเช่น เซลล์เชื้อเพลิงมีช่วงใช้งานที่ 26 ถึง 42 โวลต์ และชุดเก็บประจุความจุสูงมีช่วงใช้งานที่ 24.3 ถึง 48.6 โวลต์ จึงเป็นการยากในการนำมาใช้งานร่วมกับชุดควบคุมมอเตอร์โดยไม่ส่งผลต่อสมรรถนะของระบบ แม้ว่าผลการทดสอบในหัวข้อที่ 6.3.2.1.2 แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าของระบบแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วงที่แคบได้ แต่แรงดันไฟฟ้าของระบบก็ยังคงถูกบังคับให้อยู่ในช่วงใช้งานของชุดเก็บประจุความจุสูง ไม่สามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของระบบให้มากกว่าช่วงใช้งานของชุดเก็บประจุความจุสูงได้ นอกจากนั้นยังเป็นการใช้งานชุดเก็บประจุความจุสูงได้ไม่คุ้มค่า

เพื่อแก้ปัญหาในด้านแรงดันไฟฟ้าของระบบ การติดตั้งโดยใช้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงต่อเข้ากับแหล่งจ่ายพลังงานในแต่ละตัวดังรูปที่ 6-10 ค จึงถูกมองว่าเป็นทางออกที่ดี ทางหนึ่งสำหรับการติดตั้งระบบเพื่อควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าของระบบทำงานในช่วงที่แคบ นอกจากนั้นหากมีการติดตั้งระบบควบคุมค่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเข้าไปในระบบขับเคลื่อน เพื่อปรับการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงให้มีระดับที่สูงขึ้นหากตรวจพบว่าชุดเก็บประจุความจุสูงมีระดับพลังงานที่ต่ำลงจนถึงค่าที่กำหนด และปรับลดการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงให้มีระดับที่ต่ำลงหากตรวจพบว่าชุดเก็บประจุความจุสูงมีระดับพลังงานที่สูงมากพอ จะช่วยให้มีการนำพลังงานที่เก็บอยู่ในชุดเก็บประจุความจุสูงออกมาใช้ได้ อย่างคุ้มค่ามากขึ้น พร้อมไปกับการช่วยให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานในช่วงที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นอีกด้วย

6.4 สรุปชุดทดสอบระบบขับเคลื่อนและการทดสอบ

การติดตั้งและการปรับตั้งกลยุทธการแบ่งจ่ายพลังงานระบบขับเคลื่อนสามารถทำได้ในหลายลักษณะ ซึ่งได้สรุปรูปแบบต่างๆ ที่ได้จัดทำขึ้นดังนี้

1. ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่

1.1 การใช้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ก) กลยุทธการแบ่งจ่ายแบบ Load leveled

เป็นรูปแบบที่กำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และเซลล์เชื้อเพลิงทำงานคงที่ทำให้ระบบควบคุมภายในเซลล์เชื้อเพลิงไม่ต้องทำงานหนักมากจึงช่วยในเรื่องอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง แต่การที่กำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานต่ำกว่าค่าเฉลี่ย ส่งผลให้แบตเตอรี่จ่ายพลังงานออกมาทำให้ระดับการประจุของแบตเตอรี่มีแนวโน้มที่ลดลง

ข) กลยุทธการแบ่งจ่ายแบบ Load following

เป็นรูปแบบที่กำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานมากขึ้นเพื่อจ่ายกำลังตามภาระ เซลล์เชื้อเพลิงจึงทำงานแบบไม่คงที่ซึ่งส่งผลให้ระบบควบคุมภายในเซลล์เชื้อเพลิงต้องทำงานหนักจึงส่งผลต่ออายุการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงได้ นอกจากนั้นรูปแบบนี้ไม่มี

แนวคิดในการซาร์จคืนแก่แบตเตอรี่ จึงส่งผลให้ระดับการประจุของแบตเตอรี่ลดลงตลอดเวลา

2. ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง

2.1 การใช้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

- ก) การปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

การปรับตั้งโดยให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายพลังงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดนั้นทำให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังน้อยกว่าค่าภาระเฉลี่ย ส่งผลให้ระดับพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูงลดลง ทำให้ในที่สุดแล้วชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถจำกัดกระแสไฟฟ้าไว้ที่ค่าดังกล่าวได้ ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่กว้าง แต่ระบบก็ยังสามารถดำเนินต่อไปได้

- ข) การปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

การปรับตั้งโดยให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังมากขึ้นนั้นช่วยให้ระดับพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูงมีแนวโน้มที่คงที่ ซึ่งหมายถึงแรงดันไฟฟ้าของระบบมีแนวโน้มที่คงที่เช่นกัน อย่างไรก็ตามการปรับตั้งที่ให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังสูงเกินไปจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงได้

2.2 การใช้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

- ก) การปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

การปรับตั้งในรูปแบบนี้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้าน้อยกว่ากำลังเฉลี่ย ส่งผลให้ชุดเก็บประจุความจุสูงมีระดับพลังงานลดลง ซึ่งในที่สุดแล้วแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงซึ่งก็คือแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีค่า

ลดต่ำลงจนกระทั่งชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถทำงานต่อไปได้ ส่งผลให้ระบบสามารถดำเนินต่อไปได้ ดังนั้น การติดตั้งและการปรับตั้งในรูปแบบนี้จึงไม่สามารถนำมาใช้งานได้

- ข) การปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในจุดที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกว่าจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

การปรับตั้งในรูปแบบนี้ไม่ได้ใช้ประโยชน์จากชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแต่อย่างใด เพราะว่ามีพฤติกรรมการแบ่งจ่ายพลังงานเหมือนกับการต่อตรงเซลล์เชื้อเพลิงเข้ากับชุดเก็บประจุความจุสูง เนื่องจากต้องปรับแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไว้ต่ำ นอกจากนั้นแรงดันไฟฟ้าของระบบมีการแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วงที่กว้าง แต่ระบบก็ยังสามารถดำเนินต่อไปได้

จากการทดสอบระบบขับเคลื่อนที่ผ่านมาช่วยให้สามารถพิจารณาเลือกใช้รูปการติดตั้งและการปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดดังนี้

1. ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่

การติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่นั้นสามารถติดตั้งได้โดยให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานภายใต้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงมีช่วงแรงดันไฟฟ้าใช้งานที่กว้างกว่าแบตเตอรี่ ในส่วนของการปรับตั้งกลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงาน พิจารณาใช้การปรับตั้งโดยแนวคิดแบบ Load leveled เนื่องจากมีแนวคิดที่มีการชาร์จคืนให้แก่แบตเตอรี่ ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนั้นในการปรับตั้งการจำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจะต้องคำนึงถึงค่าภาวะเฉลี่ย ซึ่งจะต้องกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังสูงกว่าค่าภาวะเฉลี่ยนี้เพื่อให้ระดับการประจุของแบตเตอรี่มีแนวโน้มที่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่จะต้องไม่ปรับตั้งให้มีค่าสูงเกินไปเพราะจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิง

2. ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง

การติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง พิจารณาว่าการติดตั้งโดยกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานภายใต้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นรูปแบบการติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจาก การติดตั้งโดยให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานภายใต้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้นไม่สามารถดำเนินการได้ต่อเนื่องและมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดัน กว้างและในส่วนของ การติดตั้งโดยใช้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้าสองตัวนั้นมองว่าไม่ สอดคล้องกับการออกแบบระบบสำหรับรถจักรยานยนต์ซึ่งมุ่งเน้นที่มีการใช้ อุปกรณ์ให้น้อยที่สุดเพื่อพื้นที่การติดตั้ง อย่างไรก็ตามในการปรับตั้งการจำกัด กำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงนั้นต้องคำนึงถึงค่าภาระเฉลี่ยเช่นกันเพื่อให้ระบบ สามารถดำเนินได้อย่างต่อเนื่อง

ด้วยการออกแบบติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด ทั้งสองแบบ สามารถนำรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของทั้งสองแบบมาพิจารณาเปรียบเทียบดังแสดง ต่อไปนี้ในบทที่ 7

บทที่ 7

การเปรียบเทียบระบบขับเคลื่อน

7.1 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบระบบขับเคลื่อน

7.1.1 หลักการและเหตุผล

ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ถึงจุดมุ่งหมายของการศึกษานี้ คือ การวิเคราะห์และหาคำตอบว่าแหล่งจ่ายพลังงานชนิดใดระหว่างแบตเตอรี่หรือชุดเก็บประจุความจุสูง จะเป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ นอกจากการพิจารณาถึงปัจจัยในด้านต่างๆ เช่น ราคาโดยรวมของระบบ การหาได้ง่าย ความเป็นพิษ หรือ ความทนทานแล้ว ในแง่ของประสิทธิภาพของระบบถือเป็นปัจจัยที่ใช้ชี้วัดที่สำคัญอย่างหนึ่งเช่นกัน การเปรียบเทียบในแง่ของประสิทธิภาพของระบบนั้นจำเป็นต้องใช้การทดสอบกับระบบทั้งสองแบบ ในบทนี้จึงได้แสดงถึงแนวคิดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องไปจนถึงการติดตั้งระบบเพื่อทดสอบเปรียบเทียบระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบ

ในบทที่ 6 ที่ผ่านมานั้นได้แสดงถึงรายละเอียดการติดตั้งและการทดสอบเบื้องต้นของระบบขับเคลื่อนโดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้า ทั้งแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่และแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง ซึ่งระบบขับเคลื่อนแต่ละแบบนี้มีรูปแบบในการปรับตั้งที่ให้ผลการทดสอบแตกต่างกันออกไปดังที่ได้กล่าวในบทที่ 6 อย่างไรก็ตามจุดมุ่งหมายของการทดสอบในส่วนนี้คือ การเปรียบเทียบระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบ โดยจะพิจารณาด้านปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อระยะทางในการขับขี่ และความสามารถในการรับภาระในรูปแบบต่างๆ สำหรับในส่วนนี้เพื่อเปรียบเทียบระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบอย่างเหมาะสม ระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบต้องถูกปรับตั้งให้สามารถเปรียบเทียบกันได้ โดยระบบแต่ละแบบจะต้องมีการปรับตั้งที่ให้ผลการดำเนินการได้ตรงตามเป้าหมายของระบบไฮบริดมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ของแต่ละแบบ เป้าหมายของระบบไฮบริดนั้นได้แก่ 1) สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอ 2) ให้ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงดีที่สุด 3) ระดับพลังงานของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ เนื่องจากพิจารณาว่าหากแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิมีแนวโน้มของระดับพลังงานที่ไม่เปลี่ยนแปลงแล้วนั้น แสดงถึงว่าระบบขับเคลื่อนสามารถดำเนินไปได้โดยปกติ トラบเท่าที่ยังมีเชื้อเพลิงอยู่เพียงพอ แต่หากระดับพลังงานของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิมีแนวโน้มที่ลดลงแล้ว ส่งผลให้ในที่สุดแล้ว ระดับพลังงานจะลดลงจนกระทั่งไม่สามารถ

จ่ายพลังงานได้ ซึ่งหมายถึงระบบขับเคลื่อนไม่สามารถดำเนินไปได้โดยปกติ แม้ว่าจะมีเชื้อเพลิง อยู่เพียงพอ และ 4) แรงดันไฟฟ้าของระบบตลอดการทดสอบมีการแปรเปลี่ยนน้อยที่สุด เนื่องจาก แรงดันไฟฟ้าของระบบที่แปรเปลี่ยนนั้นส่งผลต่อสมรรถนะ รวมถึงส่งผลต่อการทำงานร่วมกันกับ ชุดควบคุมมอเตอร์

การทดสอบระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบนี้ ดำเนินการโดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้า เพื่อ จำลองภาระการขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับทดสอบ แทนการนำระบบขับเคลื่อนมาทดสอบกับ รถจักรยานยนต์จริง เนื่องจากพิจารณาว่า การใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้านั้น นอกจากช่วยให้การ ทดสอบระบบขับเคลื่อนรวมถึงการแก้ไขการปรับตั้งเป็นไปได้โดยง่ายแล้ว ยังสามารถควบคุมให้ การทดสอบเป็นไปตามวัฏจักรขับทดสอบที่ต้องการได้อย่างดี และช่วยให้การทดสอบในแต่ละครั้ง นั้นมีลักษณะที่ตรงกันได้นอกจากนั้นยังช่วยให้การทดสอบเป็นไปได้โดยปลอดภัย อย่างไรก็ตาม การนำชุดรับภาระทางไฟฟ้ามาใช้ในการจำลองภาระการขับเคลื่อนนั้นยังคงมีข้อจำกัดที่ว่าไม่ สามารถจำลองสถานการณ์ที่มีการ Regenerative Braking ได้ แต่เมื่อพิจารณาผลของค่า พลังงานไฟฟ้าของการ Regenerative Braking ในรถจักรยานยนต์ พบว่ามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ระบบต้องจ่ายจากวัฏจักรขับทดสอบทั้งหมดที่นำมาใช้ (ดังจะกล่าวในย่อ หน้าถัดไป) การคำนวณพบว่าวัฏจักรขับทดสอบที่ให้ผลของ Regenerative Braking มากที่สุดนั้น ให้ค่าพลังงานย้อนกลับจากการ Regenerative Braking ต่อพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ระบบต้อง จ่ายได้เพียง 12 % ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าสามารถใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้าในการจำลองภาระการ ขับเคลื่อนเพื่อทดสอบระบบขับเคลื่อนได้อย่างแม่นยำ

การใช้วัฏจักรขับทดสอบในการใช้ทดสอบเปรียบเทียบนั้น มีจุดประสงค์เพื่อให้ได้ผลการ ทดสอบที่สอดคล้องกับการขับที่จริงมากที่สุด อย่างไรก็ตามการทดสอบโดยอ้างอิงจากวัฏจักรขับ ทดสอบอันใดอันหนึ่งนั้นยังไม่อาจนำมาบ่งชี้เป็นข้อสรุปได้ เนื่องจากวัฏจักรขับทดสอบแต่ละ รูปแบบนั้น ถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานที่ต่างกัน และแม้ว่าแต่ละรูปแบบจะถูกพัฒนาขึ้นมาโดยมี ความพยายามให้มีลักษณะที่ใกล้เคียงและสอดคล้องกับการขับที่จริงมากที่สุด แต่ในการใช้งาน จริงนั้นรูปแบบของการขับที่เป็นไปได้อย่างหลากหลาย การใช้วัฏจักรขับทดสอบเฉพาะอันใด อันหนึ่งในการทดสอบนั้น อาจนำมาสู่ผลสรุปที่จำเพาะเจาะจงสำหรับวัฏจักรขับทดสอบหนึ่งนั้น และไม่เพียงพอที่จะสรุปเป็นผลทดสอบที่สะท้อนถึงการขับที่จริงได้ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการทดสอบ ที่สามารถสรุปผลได้อย่างครอบคลุมการขับที่ในลักษณะต่างๆ มากที่สุด วิทยานิพนธ์นี้จึง เลือกลงใช้วัฏจักรขับทดสอบสามรูปแบบได้แก่ 1) วัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 ซึ่งเป็นวัฏจักรขับ ทดสอบที่ถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของการขับในเมืองโดย อ้างอิงจากการขับที่ในเมืองของประเทศ ในยุโรป ซึ่งมีลักษณะที่ใช้ความเร็วค่อนข้างสูง (เมื่อเทียบกับวัฏจักรขับทดสอบในเมืองอื่น) แต่มี

การเร่งที่ต่ำและไม่บ่อยครั้ง และมีช่วงจอดหยุดนิ่งนาน 2) วัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75 เป็นวัฏจักรขับทดสอบที่ดัดแปลงมาจากวัฏจักรขับทดสอบแบบ FTP-75 โดยนำมาใช้เฉพาะส่วน Transient Phase เนื่องจากมีความเร็วที่ไม่สูงเกินไป ซึ่งจะเป็นวัฏจักรขับทดสอบที่มีการเร่งความเร็วสูงและบ่อยครั้งสลับกับการจอดหยุดนิ่งเพียงช่วงเวลาสั้น และ 3) วัฏจักรขับทดสอบ NYCC เป็นวัฏจักรขับทดสอบที่ถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของการขับขี่ในเมืองอีกเช่นกัน ซึ่งอ้างอิงจากการขับขี่ของยานยนต์ขนาดเล็กในเมืองนิวยอร์ก โดยมีลักษณะที่ใช้ความเร็วในการขับขี่ต่ำ แต่มีการเร่งความเร็วที่สูงมากและบ่อยครั้ง และมีช่วงการจอดหยุดนิ่งที่ยาวนาน เมื่อพิจารณาวัฏจักรขับทดสอบทั้งสามแบบ เห็นได้ว่าวัฏจักรขับทดสอบทั้งสามแบบนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของการขับขี่ในเมือง ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายของการพัฒนารถจักรยานยนต์ในนิวยอร์กนี้ แม้ว่าวัฏจักรขับทดสอบทั้งสามแบบจะมีลักษณะเฉพาะในรายละเอียดที่แตกต่างกัน แต่ด้วยลักษณะเฉพาะแตกต่างกันนี้จะเป็นส่วนช่วยให้ได้ผลสรุปการทดสอบที่สะท้อนถึงการขับขี่จริงที่มีความหลากหลายได้ดีที่สุด ตารางที่ 7-1 ได้สรุปพารามิเตอร์ต่างๆ และลักษณะเฉพาะของวัฏจักรขับทดสอบทั้งสามแบบ

ตารางที่ 7-1 สรุปพารามิเตอร์และลักษณะเฉพาะของวัฏจักรขับทดสอบทั้งสามแบบ

	ECE 15	Mo. FTP-75	NYCC
Total time (s)	200	867	598
Distance/cycle (km)	1.012	6.211	1.858
Average speed (kph)	18.1	25.7	11.2
Average speed (kph) ไม่คิดช่วง idle	27.4	31.7	18.6
Max speed (kph)	50	55.2	44.6
% idle	33.5	18.7	40
Average Acceleration (kph/s)	2.24	1.79	2.36
Average Deceleration (kph/s)	-2.6	-2.09	-2.34
% Acceleration	21.5	40	30.4
% Deceleration	18.5	34.3	30.6
% Acceleration ไม่คิดช่วง idle	32.3	49.1	50.7
% Deceleration ไม่คิดช่วง idle	27.8	42.1	51

ตารางที่ 7-1 ต่อ สรุปพารามิเตอร์และลักษณะเฉพาะของวัฏจักรขับทดสอบทั้งสามแบบ

	ECE 15	Mo. FTP-75	NYCC
Max Acceleration (kph/s)	3.5	5.8	7.88
Max Deceleration (kph/s)	-3.5	-5.3	-7.56
Max Power (W)	2797	3912	8208
Average Power (W)	422	647	378
Average Power ไม่นับช่วงลบบ	465	714	436
% P(-)/P(+)	8.8	9.1	12
หมายเหตุ. 1	อ้างอิงจากการขับในเมืองของประเทศไทย เช่น ปารีส์ และ โรม เป็นต้น	ดัดแปลงจาก FTP-75 โดยเลือกเฉพาะช่วง Transient Phase เนื่องจากมีความเร็วไม่มากเกินไป	อ้างอิงจากการขับที่ของยานยนต์ขนาดเล็กในเมืองนิวยอร์ก
หมายเหตุ. 2	hi speed	hi speed	low speed
	long idle	short idle	long idle
	Low acceleration	high acceleration	very high acceleration
	rare acceleration	frequently acceleration	frequently acceleration
	low average power	high average power	low average power
	low peak power	mid peak power	very high power

7.1.1 การติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่

ดังที่กล่าวในขั้นต้นถึงการติดตั้งระบบที่จะต้องให้ได้ตามเป้าหมายนั้น สำหรับระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่นั้นได้เลือกใช้การติดตั้งให้มีกลยุทธการแบ่งจ่ายพลังงานตามแนวคิดแบบ Load leveled เนื่องจากเป็นกลยุทธการแบ่งจ่ายพลังงานที่มีแนวคิดให้มีการชาร์จคืนให้กับแบตเตอรี่ในช่วงเวลาที่มีภาระต่ำ ซึ่งจะต่างกับแนวคิดของกลยุทธการแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load Following ซึ่งไม่มุ่งเน้นที่การชาร์จคืนสู่แบตเตอรี่ โดยหากใช้กลยุทธการแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load Following เข้ากับระบบขับเคลื่อน จะส่งผลให้ในระหว่างการใช้งาน แบตเตอรี่จะมีระดับการประจุลดลงตามลำดับจนไม่สามารถจ่ายพลังงานได้ในที่สุด ดังนั้นกลยุทธการแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load Following จึงไม่สอดคล้องกับเป้าหมาย

กลยุทธการแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load leveled นั้นจะต้องกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงไว้ที่ค่าๆ หนึ่ง การกำหนดนั้นจะพิจารณาจากค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของวัฏจักรขับ

ทดสอบทั้งสามวัฏจักร ซึ่งค่าที่กำหนดนั้นจะต้องมากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย แต่ก็ต้องไม่กำหนดให้สูงเกินไปเนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีประสิทธิภาพที่ต่ำหากต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าสูง โดยจะกำหนดให้มีค่าประมาณ 750 วัตต์ เนื่องจากเป็นค่าที่สูงกว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของวัฏจักรขับทดสอบพร้อมกับการทำงานที่ยังคงให้ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงที่สูงอยู่ ซึ่งการกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงนั้นทำได้โดยกำหนดผ่านทางชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยในบทที่ 6 ได้ให้รายละเอียดถึงวิธีการปรับตั้งไว้แล้ว อย่างไรก็ตามสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างหนึ่งคือ การชาร์จแบตเตอรี่ด้วยกระแสไฟฟ้าที่สูงเกินไปนั้นจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดให้มีการลดระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงลงจากแรงดันสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ เพื่อป้องกันไม่ให้มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่แบตเตอรี่มากเกินไปในระหว่างที่มีการชาร์จประจุคืนสู่แบตเตอรี่ในระหว่างการทดสอบระบบโดยปรับลดลงจาก 13.8 โวลต์ ต่อแบตเตอรี่หนึ่งลูก มาเป็น 13.2 โวลต์ ต่อแบตเตอรี่หนึ่งลูก ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองในเบื้องต้นว่าเป็นค่าที่เหมาะสม

การใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานทุติยภูมิให้แก่ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดนั้น โดยทั่วไปจะไม่กำหนดให้แบตเตอรี่อยู่ในระดับการประจุที่เต็ม แต่จะกำหนดให้แบตเตอรี่ทำงานในช่วงระดับการประจระหว่าง 50 % ถึง 70 % [39] เพื่อให้มีประสิทธิภาพทั้งการจ่ายและรับพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นในการทดสอบระบบ แบตเตอรี่ที่นำมาใช้จะต้องมีระดับการประจอยู่ในช่วงดังกล่าว เพื่อให้เทียบเคียงได้กับการใช้งานจริง

7.1.2 การติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง

จากการทดสอบในเบื้องต้นกับระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง โดยใช้รูปแบบการติดตั้งแบบต่างๆ ดังที่ได้แสดงในบทที่ 6 ซึ่งพิจารณาได้ว่าการติดตั้งในรูปแบบที่กำหนดให้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงติดตั้งอยู่กับเซลล์เชื้อเพลิงดังรูปที่ 6-7 (ก) ในบทที่ 6 นั้นมีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งเป็นรูปแบบการติดตั้งที่ให้ผลการดำเนินงานได้ตามเป้าหมายได้ดีที่สุด แม้ว่าการติดตั้งในรูปแบบที่ใช้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสองชุดติดตั้งอยู่กับทั้งเซลล์เชื้อเพลิงและชุดเก็บประจุความจุสูงอย่างละชุดดังรูปที่ 6-7 (ค) ในบทที่ 6 นั้นมองว่าเป็นรูปแบบการติดตั้งที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบได้ดีที่สุด แต่เนื่องจากการติดตั้งในรูปแบบดังกล่าวนั้น ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับติดตั้งเข้ากับชุดเก็บประจุความจุสูงจำเป็นต้องมีพิกัดกำลังไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากชุดเก็บประจุความจุสูงต้องทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงที่เกินกว่าเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายได้ นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นที่การออกแบบสำหรับ

รถจักรยานยนต์ จึงมุ่งเน้นที่การใช้อุปกรณ์ให้น้อยขึ้นที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังนั้นจึงหลีกเลี่ยงการติดตั้งในรูปแบบดังกล่าวนี้

ในส่วนของ การปรับตั้งในรายละเอียดนั้น เช่นเดียวกับการติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ คือเลือกใช้กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานตามแนวคิดแบบ Load leveled โดยกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้าประมาณ 750 วัตต์ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้พิจารณาจากกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของวัฏจักรขับทดสอบทั้งสามที่นำมาใช้ทดสอบ เช่นเดียวกันกับระบบที่ทำงานร่วมกับแบตเตอรี่ แต่ในส่วนของ การปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะปรับตั้งด้วยค่าที่แตกต่างกับระบบที่ใช้งานร่วมกับแบตเตอรี่ เนื่องจากชุดเก็บประจุความจุสูงมีแรงดันไฟฟ้าใช้งานที่ต่างกับแบตเตอรี่คือมีแรงดันไฟฟ้าใช้งานไม่เกิน 48.6 โวลต์ โดยรายละเอียดวิธีการปรับตั้งได้แสดงในบทที่ 6

7.1.3 ขั้นตอนการทดสอบ

7.1.3.1 ขั้นตอนการทดสอบกับระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่

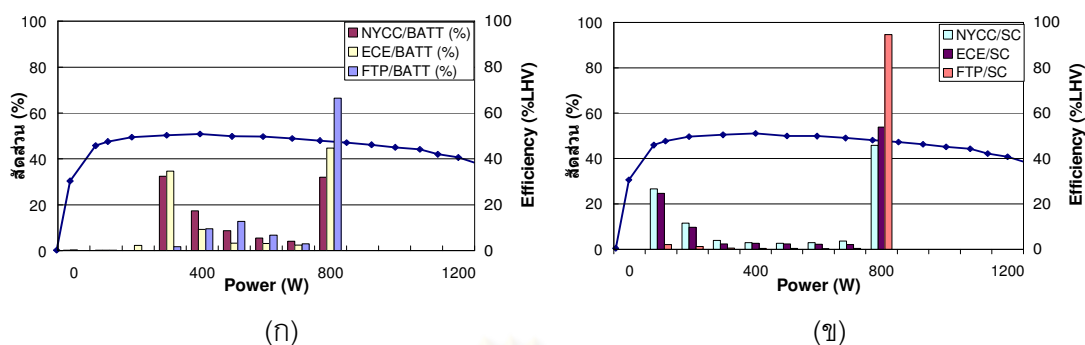
- 1 ใช้การติดตั้งแบบ Load Leveled โดยปรับตั้งการจำกัดกระแสไฟฟ้าให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ประมาณ 24 แอมแปร์ ,750 วัตต์
- 2 แบตเตอรี่ที่นำมาทดสอบจะต้องไม่ถูกใช้งานหรือถูกชาร์จมาเป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 24 ชั่วโมง และวัดแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ก่อนที่จะทดสอบเพื่อประเมินระดับการประจุของแบตเตอรี่ก่อนการทดสอบ
- 3 กำหนดให้ระบบจ่ายภาระตามวัฏจักรขับทดสอบแบบใดแบบหนึ่งพร้อมกันกับบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง โดยให้มีจำนวนการวนซ้ำของวัฏจักรมากพอที่จะให้เห็นผลของการเปลี่ยนแปลงของระดับการประจุของแบตเตอรี่เมื่อสิ้นสุดการทดสอบอย่างชัดเจน
- 4 ปลดแบตเตอรี่ออกจากระบบแล้วปล่อยให้พักไว้โดยไม่ให้มีการใช้งานหรือชาร์จอีกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และวัดแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เพื่อประเมินระดับการประจุของแบตเตอรี่หลังจากทำการทดสอบ
- 5 ทดสอบตามข้อที่ 2 ถึง 4 ซ้ำ โดยใช้วัฏจักรขับทดสอบในรูปแบบถัดไป
- 6 นำค่าที่บันทึกมาประเมินการใช้เชื้อเพลิงและระยะการขับขี่โดยใช้การปรับขนาดของระดับการประจุที่เปลี่ยนแปลงของแบตเตอรี่ซึ่งได้แสดงวิธีการปรับแก้ในภาคผนวก ข

7.1.3.2 ขั้นตอนการทดสอบกับระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุ ความจุสูง

- 1 ใช้การติดตั้งแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและปรับตั้งการจำกัดกระแสไฟฟ้าให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ประมาณ 750 วัตต์ เช่นเดียวกับระบบไฮบริดเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับแบตเตอรี่
- 2 กำหนดให้ระบบจ่ายภาระตามวัฏจักรขับทดสอบแบบใดแบบหนึ่งพร้อมกันกับบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ในตำแหน่งต่างๆ และ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง โดยให้มีจำนวนการวนซ้ำของวัฏจักรมากพอที่เพื่อให้สังเกตได้ชัดเจนว่าระดับพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูงมีการแกว่งตัวอยู่ในช่วงที่คงที่
- 3 ทดสอบตามข้อที่ 2 ถึง 3 ซ้ำ โดยใช้วัฏจักรขับทดสอบในรูปแบบถัดไป
- 4 นำค่าที่บันทึกมาประเมินการใช้เชื้อเพลิงและระยะเวลาขับขี่

7.1.4 ผลการทดสอบ

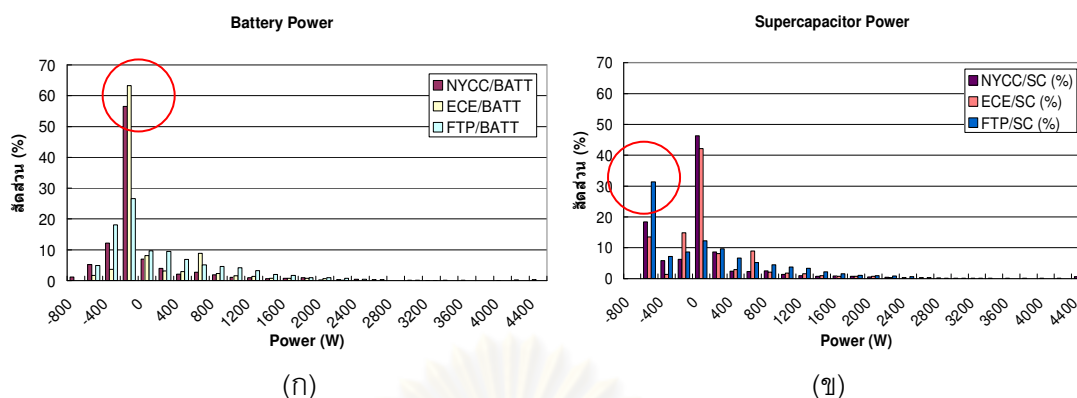
การทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดทั้งสองแบบโดยใช้วัฏจักรขับทดสอบ แสดงให้เห็นถึงความสามารถของระบบขับเคลื่อนในการจ่ายกำลังไฟฟ้าตามวัฏจักรขับทดสอบได้อย่างรวดเร็วและเพียงพอ และแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิทั้งสองชนิดสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าตามภาระส่วนที่เกินจากเซลล์เชื้อเพลิงได้ดี ผลการแบ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าตามวัฏจักรขับทดสอบได้แสดงในภาคผนวก ก นอกจากนั้นได้พิจารณาการกระจายตัวของกำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงของทั้งสองระบบดังรูปที่ 7-1 ก และ ข โดยจะเห็นได้ว่าสำหรับระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดทั้งสองแบบนี้ เซลล์เชื้อเพลิงจะไม่ทำงานเกินกว่าที่ได้ปรับตั้งไว้คือประมาณ 750 วัตต์ ระบบไฮบริดแบบเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะมีความถี่ในการทำงานที่ค่าจำกัดสูงสุดบ่อยครั้งมาก ในขณะที่ระบบไฮบริดแบบเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่นั้น จะมีการกระจายการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงไปสู่ช่วงกำลังอื่นมากขึ้น เนื่องจากการทำงานกับแบตเตอรี่นั้นจำเป็นที่จะต้องปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงลดการจ่ายกำลังลงในขณะที่มีการชาร์จเข้าสู่แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิงจึงทำงานในช่วงกำลังที่ต่ำกว่าค่าจำกัดมากขึ้น



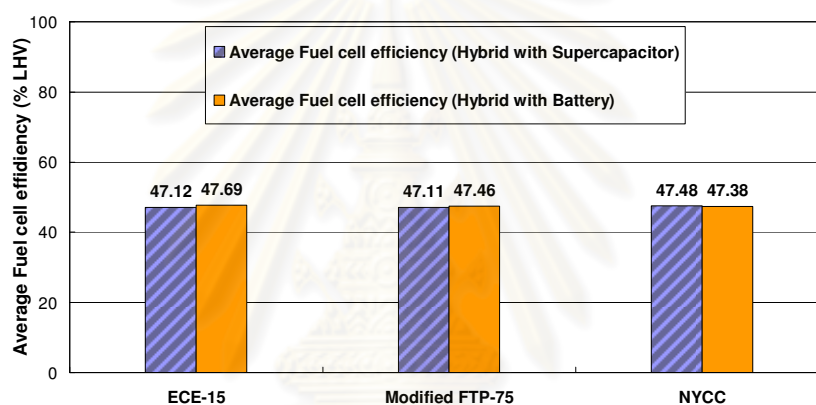
รูปที่ 7-1 การกระจายตัวของค่ากำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานกับแบตเตอรี่ (ก) และทำงานกับชุดเก็บประจุความจุสูง (ข)

นอกจากนั้นพิจารณาเปรียบเทียบการกระจายตัวของกำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิทั้งสองดังรูปที่ 7-2 ก และ ข เห็นได้ว่าการกระจายตัวของกำลังไฟฟ้าในส่วนที่จ่ายออกไป (ด้านบวก) ของระบบทั้งสองแบบมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่การกระจายตัวของกำลังไฟฟ้าในส่วนที่รับพลังงาน(ด้านลบ) นั้นเห็นได้ชัดว่าชุดเก็บประจุความจุสูงจะมีความถี่ในการรับพลังงานในช่วง 800 ถึง 600 วัตต์ มาก ในขณะที่แบตเตอรี่นั้นจะมีความถี่ในการรับพลังงานในช่วงที่ต่ำกว่า (ลบน้อยกว่า) คือช่วง 400 ถึง 200 วัตต์ เนื่องจากชุดเก็บประจุความจุสูงเป็นแหล่งพลังงานที่มีความต้านทานภายในต่ำและไม่มีข้อจำกัดในด้านกำลังในการชาร์จเหมือนแบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิงจึงจ่ายกำลังในการชาร์จให้แก่ชุดเก็บประจุความจุสูงด้วยค่าจำกัดสูงสุดที่ปรับตั้งไว้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการกระจายตัวของกำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงดังรูปที่ 7-1 ก และ ข ที่ได้กล่าวไปแล้ว

แม้ว่าการกระจายตัวของกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งสองแบบจะมีลักษณะที่ต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงตลอดการทำงานตามวัฏจักรขั้วทดสอบของระบบทั้งสองแบบแล้ว เห็นได้ว่ามีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันมากดังรูปที่ 7-3 เนื่องจากหากพิจารณาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงบนช่วงที่มีการทำงานดังรูปที่ 7-1 เห็นได้ว่าอยู่บนช่วงทำงานที่ให้ค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจะมีส่วนสำคัญต่อปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของระบบขับเคลื่อนดังกล่าวในส่วนถัดไป



รูปที่ 7-2 การกระจายตัวของกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ (ก) และชุดเก็บประจุความจุสูง (ข)



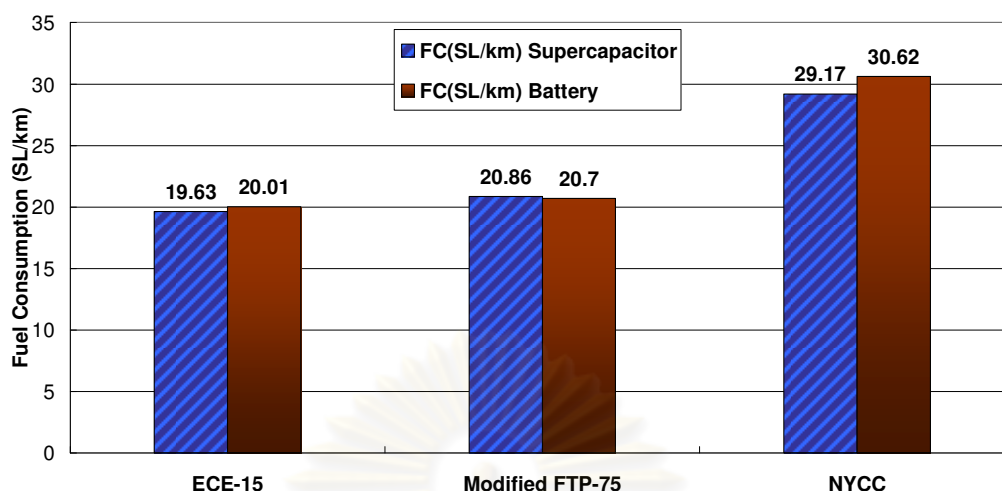
รูปที่ 7-3 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงตลอดการทำงานตามวัฏจักรขับทดสอบ

การเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อระยะทางการขับขี่ของระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบนี้ถือได้ว่าเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา รูปที่ 7-4 ได้แสดงปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อระยะทางการขับขี่ของระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบในแต่ละวัฏจักรขับทดสอบโดยใช้การปรับแก้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในภาคผนวก ข ซึ่งเห็นได้ว่าระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบนี้ให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกัน โดยวัฏจักรขับทดสอบ NYCC ซึ่งให้ผลอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อระยะทางแตกต่างกันมากที่สุด ก็ยังให้ผลที่แตกต่างกันเพียง 4.7 % ในขณะที่วัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 และ Modified FTP-75 ให้ผลอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อระยะทางแตกต่างกันเพียง 1.9 % และ 0.7 % ตามลำดับ นอกจากนี้เห็นได้ว่า วัฏจักรขับทดสอบ NYCC นั้นให้ผลอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อระยะทางมากที่สุด เนื่องจากหากพิจารณาตารางที่ 7-1 พบว่าวัฏจักรขับทดสอบ NYCC เป็นวัฏจักรขับทดสอบที่มีลักษณะที่มีความเร็วเฉลี่ยต่ำ แต่มีการเร่งความเร็วที่สูงและบ่อย ดังนั้นกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนจึงเสียไปกับการเร่งความเร็วมากโดยที่กำลังที่ใช้นั้นกลับไม่ได้ระยะทางที่มาก

นัก ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังเฉลี่ยในการขับเคลื่อนนั้นมีค่าถึง 436 วัตต์ ซึ่งใกล้เคียงกับวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 แต่ระยะทางที่ได้ต่อหนึ่งวัฏจักร (598 วินาทีต่อหนึ่งวัฏจักร) นั้นกลับได้ระยะทางเพียง 1.858 กิโลเมตร ในขณะที่วัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 และวัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75 เมื่อใช้เวลาขับซึ่งเท่ากันแล้วจะได้ระยะทางถึง 3.036 กิโลเมตร และ 4.283 กิโลเมตรตามลำดับ ดังนั้นผลทดสอบตามวัฏจักรขับทดสอบ NYCC จึงคำนวณปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อระยะทางได้ค่ามากกว่าวัฏจักรขับทดสอบอื่น

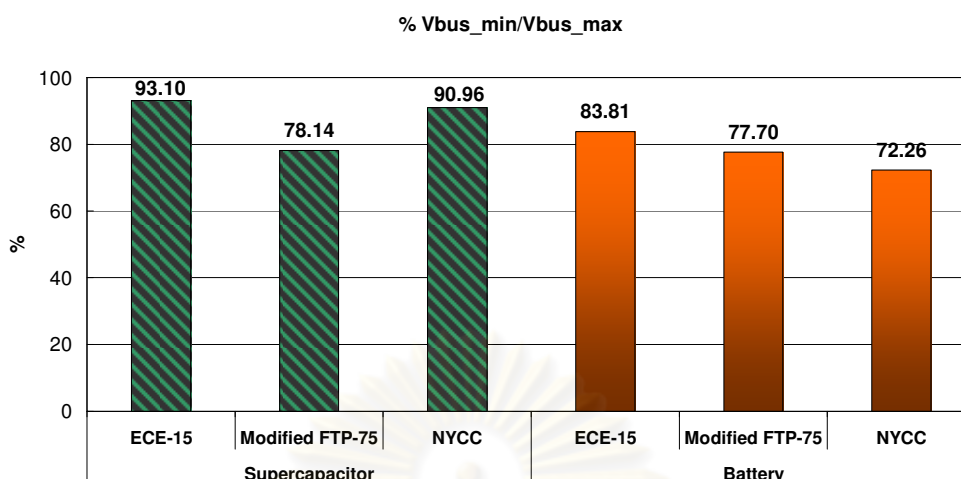
จากการที่ได้ผลการเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจากระบบทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกันนั้น สามารถอธิบายได้โดยการพิจารณาสมการที่ ข-4 และ ข-5 ในภาคผนวก ข ซึ่งแสดงการคำนวณการปรับแก้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง โดยพิจารณาตามส่วนประกอบดังนี้ คือ 1) พิจารณาพจน์ $\left(\frac{H_{meas}}{E_{FC}}\right)$ ในสมการที่ ข-4 ในภาคผนวก ข เป็นพจน์ที่แสดงถึงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงตลอดการทำงานตามวัฏจักรขับทดสอบ ซึ่งระบบทั้งสองนั้นให้ค่าที่ใกล้เคียงกันดังที่ได้แสดงในรูปที่ 7-3 และ 2) พจน์ $(E_{FC} - \Delta E_{STORE,BATT})$ ในสมการที่ ข-4 ในภาคผนวก ข คือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ต้องจ่ายออกจากระบบหากไม่คิดผลของประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ และการที่กำหนดให้แบตเตอรี่ทำงานในช่วงระดับการประจุที่ 50 % ถึง 70 % นั้นเป็นช่วงที่แบตเตอรี่ให้ประสิทธิภาพการจ่ายและรับพลังงานที่ดี ส่งผลให้ค่าของพจน์ดังกล่าวมีค่าเข้าใกล้ค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ต้องจ่ายออกจากระบบ ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ต้องจ่ายออกจากระบบนี้จะถูกกำหนดโดยวัฏจักรขับทดสอบ ดังนั้นที่วัฏจักรขับทดสอบเดียวกัน ค่าของพจน์ดังกล่าวของระบบแต่ละแบบจึงมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ ก-1 ในภาคผนวก ก จากเหตุผลทั้งหมดดังกล่าวนี้ส่งผลให้ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจากระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7-4 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อระยะทางสำหรับวัฏจักรขับทดสอบทั้งสามแบบ

ในส่วนของการพิจารณาในด้านแรงดันไฟฟ้าของระบบ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าทำงานของแบตเตอรี่และชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นต่างกัน คือ แบตเตอรี่มีแรงดันไฟฟ้าทำงานสูงสุดที่ 52.8 โวลต์ แต่ชุดเก็บประจุความจุสูงมีแรงดันไฟฟ้าทำงานสูงสุดที่ 48.6 โวลต์ ดังนั้นการเปรียบเทียบในด้านการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าให้เห็นอย่างชัดเจนนั้นจึงใช้การเปรียบเทียบโดยสัดส่วน (%) ของแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุด รูปที่ 7-5 แสดงให้เห็นว่าระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูงมีการแปรเปลี่ยนของแรงดันไฟฟ้าของระบบน้อยกว่าระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่อย่างชัดเจนเมื่อทำงานด้วยวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 และ NYCC ในขณะที่เมื่อทำงานด้วยวัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75 แล้วกลับพบว่าระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง มีการแปรเปลี่ยนของแรงดันไฟฟ้าของระบบมาก เนื่องจากชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นมีค่าความต้านทานภายในต่ำกว่าแบตเตอรี่มาก แต่แรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นแปรตามระดับพลังงาน ดังนั้นวัฏจักรขับทดสอบที่มีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำ เช่น วัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 และ NYCC จึงให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าสำหรับชุดเก็บประจุความจุสูงน้อย แต่วัฏจักรขับทดสอบที่มีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงนั้น จะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าสำหรับชุดเก็บประจุความจุสูงมาก แต่สำหรับแบตเตอรี่ซึ่งมีค่าความต้านทานภายในสูง เมื่อทำงานกับวัฏจักรขับทดสอบที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงที่สุดมาก เช่น วัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75 และ NYCC จึงให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ามาก



รูปที่ 7-5 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าของระบบตลอดการทำงานตามวัฏจักรขับทดสอบตามสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุด

7.1.5 สรุปผลการทดสอบ

ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดทั้งแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ และแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูงได้ถูกติดตั้งและทดสอบการทำงานตามวัฏจักรขับทดสอบสามแบบ คือ 1) ECE-15 2) Modified FTP-75 และ 3) NYCC โดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้าในการจำลองภาระการขับเคลื่อน เพื่อเปรียบเทียบการทำงานของระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบ พบว่าระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบมีการแบ่งจ่ายพลังงานได้สอดคล้องกับเป้าหมายของระบบไฮบริดที่ได้กำหนดไว้ในตอนต้น และแม้ว่าระบบทั้งสองแบบจะมีความแตกต่างกันในรายละเอียดของการแบ่งจ่ายพลังงาน แต่ระบบทั้งสองนั้นให้ผลปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อระยะทางที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงนั้นไม่ขึ้นอยู่กับว่าระบบขับเคลื่อนใช้แหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิชนิดใดระหว่างแบตเตอรี่หรือชุดเก็บประจุความจุสูง แต่สิ่งที่มีผลต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงนั้นได้แก่ กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงาน ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง และ วัฏจักรขับทดสอบ เป็นต้น ดังนั้นการเปรียบเทียบในด้านประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงอย่างเดียว จึงยังไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่าแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิชนิดใดมีความเหมาะสมแก่การนำมาใช้ในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดได้ดีกว่ากัน จึงต้องพิจารณาถึงปัจจัยในด้านอื่นประกอบ

หากพิจารณาในด้านการใช้งานแล้วเห็นได้ว่าระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นสามารถควบคุมให้ระดับพลังงานของแหล่งจ่ายทุติยภูมิมีระดับที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าเริ่มต้นเมื่อสิ้นสุดการทดสอบได้ดี ในขณะที่ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่นั้นทำได้ยาก และนอกจากนั้นถึงแม้ว่าในขณะที่เริ่มต้นทำงานหากระดับพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูงอยู่ในระดับที่ต่ำ ก็ใช้เวลาเพียงช่วงที่สั้นเท่านั้นในการให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายพลังงานเพื่อชาร์จให้แก่ชุดเก็บประจุความจุสูงมีระดับพลังงานกลับมาอยู่ในระดับที่เต็มและพร้อมที่จะใช้งาน ดังนั้นในการใช้งานระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำชุดเก็บประจุความจุสูงออกมาชาร์จโดยอุปกรณ์ภายนอกเลย ซึ่งต่างกับระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ ที่ต้องนำแบตเตอรี่ออกมาชาร์จโดยอุปกรณ์ภายนอกบ้างเป็นครั้งคราว เนื่องจากไม่สามารถควบคุมให้ระดับพลังงานของแหล่งจ่ายทุติยภูมิมีระดับที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อสิ้นสุดการทดสอบได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่สามารถกักเก็บพลังงานได้มากกว่าชุดเก็บประจุความจุสูงอย่างเทียบกันไม่ได้ ดังนั้นหากเกิดกรณีฉุกเฉินที่เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถจ่ายพลังงานได้ แบตเตอรี่ยังสามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานเพียงลำพังเพื่อให้สามารถขับเคลื่อนต่อไปได้ ในขณะที่ชุดเก็บประจุความจุสูงสามารถจ่ายพลังงานเพื่อให้สามารถขับเคลื่อนต่อไปได้เป็นระยะที่สั้นมากเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่

7.2 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย อายุการใช้งาน ขนาดและน้ำหนักของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิ

นอกเหนือจากการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงระหว่างระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบแล้ว การพิจารณาเปรียบเทียบในประเด็นอื่นนั้น ถือได้ว่าเป็นสิ่งที่สำคัญเช่นกัน ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาเปรียบเทียบในด้านราคาของอุปกรณ์ที่แตกต่างกันของทั้งสองระบบ ซึ่งก็คือราคาของแบตเตอรี่และชุดเก็บประจุความจุสูง โดยในส่วนนี้จะไม่นำราคาของอุปกรณ์อื่นในระบบมาพิจารณาเนื่องจากวัตถุประสงค์ของหัวข้อนี้คือการพิจารณาเปรียบเทียบระบบทั้งสองแบบ ดังนั้นอุปกรณ์ส่วนใดที่ไม่มี ความแตกต่างกันระหว่างระบบทั้งสองแบบ เช่น เซลล์เชื้อเพลิง และชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จึงไม่นำมาพิจารณา นอกจากนี้ในด้านอายุการใช้งานของแบตเตอรี่และชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นจำเป็นต้องพิจารณาไปพร้อมกันกับราคาด้วย เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์ทั้งหมดอายุที่นับได้ว่าเป็นส่วนหนึ่งของราคาที่จ่ายตลอดอายุการใช้งานของรถจักรยานยนต์

จากการรวบรวมข้อมูลในด้านราคาต่อขนาดของแบตเตอรี่และชุดเก็บประจุความจุสูงจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงในตารางที่ 7-2 ซึ่งในส่วนนี้เลือกใช้ค่า \$150 ต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง สำหรับการประมาณราคาแบตเตอรี่เนื่องจากราคาที่คำนวณได้สอดคล้องกับราคาในปัจจุบันซึ่งแบตเตอรี่มีการใช้งานอย่างกว้างอยู่แล้ว และใช้ค่า \$0.01 ต่อฟารัด สำหรับการประมาณราคาชุดเก็บประจุความจุสูงเนื่องจากเป็นราคาที่ผู้ผลิตใช้ประมาณค่าเมื่อมีการผลิตในปริมาณมาก

ตารางที่ 7-2 การประมาณราคาแบตเตอรี่และชุดเก็บประจุความจุสูง

	Battery	Supercapacitor
A.G. Simpson (2002) [40]	\$407 / kWh	\$0.011 / Farad
Andrew Burke (2005) [41]	-	\$2-\$3 / Farad
Robert Spotnitz (2005) [42]	\$200 / kWh	\$4000 / kWh
Maxwell Technologies (2008) [43]	-	\$0.01 / Farad
Husain (2003) [19]	\$100-150 / kWh	-

ในส่วนของข้อมูลทางด้านอายุการใช้งานของแบตเตอรี่และชุดเก็บประจุความจุสูงนั้น โดยมากจะกำหนดเป็นจำนวนวัฏจักรของการจ่ายและประจุพลังงาน ซึ่งการกำหนดอายุการใช้งานในลักษณะนี้จะสอดคล้องกับการใช้งานแบตเตอรี่หรือชุดเก็บประจุความจุสูงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานเพียงแหล่งเดียวมากกว่าการใช้งานเป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิในระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดที่มีการจ่ายและรับพลังงานสลับกันตลอดเวลาที่ใช้งาน อย่างไรก็ตามจากข้อจำกัดเกี่ยวกับข้อมูลทางด้านอายุการใช้งานของแบตเตอรี่และชุดเก็บประจุความจุสูงในลักษณะที่ใช้งานเป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิในระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด รวมถึงข้อจำกัดในด้านของเวลาสำหรับการทดสอบระบบเพื่อให้ทราบผลของอายุการใช้งาน ดังนั้นในส่วนนี้จึงใช้การเปรียบเทียบอายุการใช้งานโดยอ้างอิงจากจำนวนวัฏจักรที่กำหนดการผู้ผลิต โดยผู้ผลิตแบตเตอรี่ได้กำหนดอายุการใช้งานไว้ที่ 500 วัฏจักรที่ความลึกของการจ่าย (Depth of discharge) 50 % และนิยามเงื่อนไขของการหมดอายุ คือแบตเตอรี่มีค่าความจุ (แอมแปร์-ชั่วโมง) ลดลงเหลือ 60 % ของค่าที่กำหนดไว้เริ่มต้น และในส่วนของชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นผู้ผลิตได้กำหนดอายุการใช้งานไว้ที่หนึ่งล้าน วัฏจักรที่ความลึกของการจ่าย 75 % และนิยามเงื่อนไขของการหมดอายุ คือชุดเก็บประจุความจุสูงมีค่าความจุ (ฟารัด) ลดลงเหลือ 80 % ของค่าที่กำหนดไว้เริ่มต้นหรือมีความต้านทานภายในเพิ่มขึ้นสองเท่า

จากวิธีการกำหนดอายุการใช้งานดังกล่าวนั้น เห็นได้ว่าแหล่งจ่ายพลังงานทั้งสองชนิดมีปริมาณของพลังงานที่กักเก็บได้ต่อหนึ่งวัฏจักรที่ต่างกัน และมีการนิยามความหมายของการหมดอายุที่ต่างกัน ดังนั้นหากใช้การเปรียบเทียบอายุการใช้งานโดยสังเกตเพียงค่าจำนวนวัฏจักรนั้น พิจารณาได้ว่าเป็นการเปรียบเทียบที่ไม่เหมาะสม ในส่วนนี้จึงพิจารณาเปรียบเทียบอายุการใช้งาน โดยการคำนวณค่าพลังงานที่แหล่งจ่ายพลังงานแต่ละชนิดจ่ายได้ตลอดอายุการใช้งาน โดยสมมุติลักษณะการเสื่อมสภาพโดยให้การลดลงของค่าความจุมีลักษณะแบบเชิงเส้น ซึ่งการคำนวณพลังงานที่จ่ายได้ตลอดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ และชุดเก็บประจุความจุสูง แสดงในสมการที่ 7-1 และ 7-2 ซึ่งค่าพลังงานตลอดอายุการใช้งานนี้จะนำมาพิจารณาร่วมกับราคาค่าได้กล่าวในส่วนถัดไป

$$E_{life/Batt} = \frac{(C_{Batt/int} + C_{Batt/end})}{2} V_{Nom,Batt} \times DOD \times N_{cyc} \times N_{pack} \quad (7-1)$$

$$E_{life/SC} = \frac{1}{2} \frac{1}{N_{Cell}} \frac{(C_{SC/int} + C_{SC/end})}{2} (V_{rate} N_{Cell})^2 \times DOD \times N_{cyc} \times \frac{1}{3600} \quad (7-2)$$

โดย

$E_{life/Batt}$	คือ พลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (วัตต์-ชั่วโมง)
$E_{life/SC}$	คือ พลังงานที่ชุดเก็บประจุความจุสูงจ่ายตลอดอายุการใช้งาน (วัตต์-ชั่วโมง)
$C_{Batt/int}$	คือ ความจุของแบตเตอรี่เมื่อเริ่มต้นใช้งาน (แอมแปร์-ชั่วโมง)
$C_{SC/int}$	คือ ความจุของชุดเก็บประจุความจุสูงเมื่อเริ่มต้นใช้งาน (ฟารัด)
$C_{Batt/end}$	คือ ความจุของแบตเตอรี่เมื่อหมดอายุการใช้งาน (แอมแปร์-ชั่วโมง)
$C_{SC/end}$	คือ ความจุของชุดเก็บประจุความจุสูงเมื่อหมดอายุการใช้งาน (ฟารัด)
$V_{Nom,Batt}$	คือ แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (โวลต์)
V_{rate}	คือ แรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูง (โวลต์)
DOD	คือ ความลึกของการจ่ายพลังงาน (% Depth of discharge)
N_{cyc}	คือ จำนวนวัฏจักรตลอดอายุการใช้งาน
N_{pack}	คือ จำนวนของแบตเตอรี่
N_{cell}	คือ จำนวนของหน่วยของชุดเก็บประจุความจุสูง

จากผลทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 สามารถพิจารณาเพิ่มเติมได้ว่า ชุดเก็บประจุความจุสูงสำหรับนำมาใช้กับระบบขับเคลื่อนนั้นสามารถกำหนดขนาดให้มีขนาดเล็กกว่าชุดที่ใช้ในการทดสอบได้ โดยสามารถใช้แบบจำลองชุดเก็บประจุที่มีขนาดแตกต่างกันในการช่วยกำหนดขนาดแทนการทดสอบจริง ซึ่งเป็นการหลีกเลี่ยงความเสี่ยงเนื่องจากการจัดซื้อชุดเก็บประจุความจุสูงขนาดต่างๆ เพิ่มเติมสำหรับทดสอบ รูปที่ ก-8 และ รูปที่ ก-9 ในภาคผนวก ก แสดงผลการจำลองร่วมกับผลจากการทดสอบ ซึ่งจากการทดลองปรับค่าขนาดต่างๆ ของชุดเก็บประจุความจุสูงในแบบจำลองพบว่า ชุดเก็บประจุความจุสูงขนาด 2000 ฟารัด ต่ออนุกรม 18 หน่วย และชุดเก็บประจุความจุสูงขนาด 1500 ฟารัด ต่ออนุกรม 20 หน่วย มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้กับระบบขับเคลื่อน อย่างไรก็ตามการใช้ชุดเก็บประจุความจุสูงที่มีขนาดเล็กลงนั้น ส่งผลให้ช่วงของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงมีค่ามากขึ้นดังนั้นหากนำชุดเก็บประจุความจุสูงขนาดดังกล่าวมาใช้ จำเป็นต้องใช้งานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอีกหนึ่งชุดเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าของระบบมีความคงที่ ซึ่งรูปแบบการติดตั้งจะมีลักษณะดังรูปที่ 6-7 (ค) ในบทที่ 6 และการเพิ่มชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอีกหนึ่งชุดเข้าไปในระบบนั้นย่อมส่งผลให้ระบบมีราคาที่สูงขึ้นเช่นกัน โดยจะสมมุติให้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีนี้มีราคาเท่ากับชุดเก็บประจุความจุสูง [40] สำหรับแบตเตอรี่นั้นพิจารณาได้ว่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้มีความเหมาะสมที่สุดแล้วภายใต้เงื่อนไขของขนาดและน้ำหนักสำหรับรถจักรยานยนต์

การเปรียบเทียบในประเด็นต่างๆ ได้แก่ ราคา อายุการใช้งาน ขนาดและน้ำหนักได้แสดงในตารางที่ 7-3 พบว่าระบบที่ใช้แบตเตอรี่มีราคาเริ่มต้นต่ำที่สุด ในขณะที่ระบบที่ใช้ชุดเก็บประจุความจุสูงทั้งสามขนาดมีราคาเริ่มต้นที่สูงกว่าแบตเตอรี่มาก และระบบที่ใช้ชุดเก็บประจุความจุที่ลดขนาดลงกลับมีราคาเริ่มต้นสูงขึ้นเนื่องจากมีราคาของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอีกหนึ่งชุดเพิ่มเข้ามา ในด้านอายุการใช้งานนั้นสามารถพิจารณาเปรียบเทียบได้โดย พลังงานตลอดอายุการใช้งาน พบว่าชุดเก็บประจุความจุสูงทั้งสามแบบมีพลังงานตลอดอายุการใช้งานสูงกว่าแบตเตอรี่มาก โดยชุดเก็บประจุความจุสูงขนาด 3000 ฟารัด 18 หน่วย ซึ่งมีพลังงานตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุด มีพลังงานตลอดอายุการใช้งานมากกว่าแบตเตอรี่ถึงสองร้อยเท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชุดเก็บประจุความจุสูงมีอายุการใช้งานมากกว่าแบตเตอรี่อย่างเทียบไม่ได้ นอกจากนั้นได้พิจารณาความคุ้มค่าของราคาและอายุการใช้งานของอุปกรณ์โดยการพิจารณาค่าพลังงานตลอดอายุการใช้งานต่อราคา พบว่าชุดเก็บประจุความจุสูงมีค่าพลังงานตลอดอายุการใช้งานต่อราคาสูงกว่าแบตเตอรี่มากโดยชุดเก็บประจุความจุสูงขนาด 3000 ฟารัด 18 หน่วย ที่ไม่ใช้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพิ่ม มีพลังงานตลอดอายุการใช้งานต่อราคาสูงที่สุดอีกเช่นกัน นอกจากนั้นหากพิจารณาค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนอุปกรณ์ตลอดอายุการใช้งานของ

รถจักรยานยนต์ เห็นได้ว่าแม้ราคาเริ่มต้นของแบตเตอรี่จะมีราคาที่สูงกว่า แต่จากการที่ชุดเก็บประจุความจุสูงมีอายุการใช้งานมากกว่าแบตเตอรี่มาก ซึ่งครอบคลุมอายุการใช้งานของรถจักรยานยนต์ ดังนั้นเมื่อมองในระยะยาวแล้ว พบว่าชุดเก็บประจุความจุสูงให้ความคุ้มค่ามากกว่าดังรูปที่ 7-6

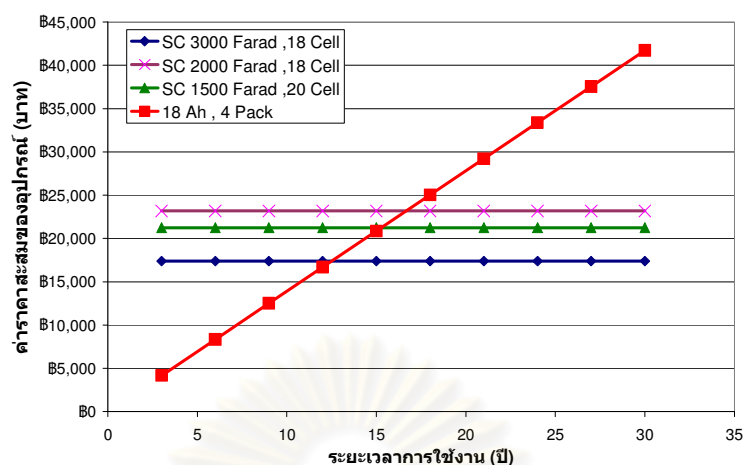
ในด้านของขนาดและน้ำหนักนั้นจากจุดมุ่งหมายในการออกแบบและการกำหนดขนาดของแหล่งจ่ายพลังงานในมีขนาดและน้ำหนักที่มีความเป็นไปได้สำหรับการติดตั้งเป็นแหล่งพลังงานทุติยภูมิในรถจักรยานยนต์ ประกอบกับความมุ่งหมายในการเปรียบเทียบระบบทั้งสองแบบ ดังนั้นแหล่งจ่ายพลังงานทั้งสองชนิดที่เลือกใช้จึงถูกกำหนดขนาดให้มีขนาดและน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยจะเห็นได้ว่าชุดเก็บประจุความจุสูงและแบตเตอรี่ที่ใช้นั้นมีปริมาตรที่ใกล้เคียงกัน แต่แบตเตอรี่ยังคงมีน้ำหนักที่มากกว่าชุดเก็บประจุความจุสูงมาก

ในส่วนของ การบำรุงรักษาตลอดการใช้งานนั้น แบตเตอรี่จำเป็นต้องมีการนำออกมาชาร์จ โดยอุปกรณ์ภายนอกเป็นครั้งคราว เพื่อให้แบตเตอรี่แต่ละเซลล์ในระบบมีระดับการประจุที่เท่าเทียมกัน (Equalization) ในขณะที่ชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาเลย

ตารางที่ 7-3 การเปรียบเทียบราคา อายุการใช้งาน ขนาดและน้ำหนัก ระหว่างแบตเตอรี่กับชุดเก็บประจุความจุสูง

	SC 3000 Farad ,18 Cell	SC 2000 Farad ,18 Cell	SC 1500 Farad ,20 Cell	18 Ah ,4 Pack
น้ำหนัก (กิโลกรัม)	14.2	12.4	11.6	23.6
ปริมาตร (ลิตร)	12.6	9.8	9.2	9.3
ราคา (บาท)	17400	11600	9700	4200
ราคา DC/DC converter	0	11600	11600	0
ราคารวม	17400	23200	21300	4200
อายุการใช้งาน (วัฏจักร)	1×10^6	1×10^6	1×10^6	500
พลังงานตลอดอายุการใช้งาน (วัตต์-ชั่วโมง)	3.49×10^7	2.32×10^7	1.94×10^7	1.73×10^5
พลังงานตลอดอายุการใช้งานเทียบ กับแบตเตอรี่	202	134	112	1
พลังงานตลอดอายุการใช้งาน ต่อ ราคา (วัตต์-ชั่วโมงต่อบาท)	2005	1002	911	41

หมายเหตุ - อัตราแลกเปลี่ยน 32.2 บาทต่อหนึ่ง U.S. Dollar (พฤษภาคม 2551)



รูปที่ 7-6 ค่าใช้จ่ายตามระยะเวลาใช้งานระหว่างแบตเตอรี่กับชุดเก็บประจุความจุสูง

7.3 สรุปการเปรียบเทียบ

จากการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบในด้านประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงของระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบในหัวข้อที่ 7.1 พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนสำหรับการบ่งชี้ว่าแหล่งจ่ายพลังงานชนิดใดระหว่างสองชนิด จะเป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด แต่จากการพิจารณาประเด็นที่เกี่ยวข้องของในด้านต่างๆ นอกเหนือจากการทดสอบเปรียบเทียบ เช่น ด้านราคา และอายุการใช้งาน เห็นได้ว่า แบตเตอรี่แม้ว่าจะมีราคาเริ่มต้นที่ต่ำกว่าชุดเก็บประจุความจุสูงมาก แต่จากการที่ชุดเก็บประจุความจุสูงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าแบตเตอรี่มาก ดังนั้นเมื่อพิจารณาในระยะยาวแล้วชุดเก็บประจุความจุสูงจะมีความคุ้มค่าด้านราคามากกว่า รวมถึงชุดเก็บประจุความจุสูงไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาตลอดการใช้งานอย่างสิ้นเชิง ดังนั้นชุดเก็บประจุความจุสูงจึงถือเป็นทางเลือกที่เหมาะสมอย่างหนึ่งสำหรับการนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิภายในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์

บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์เป็นการพัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ โดยพิจารณาใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM พิกัด 1.2 กิโลวัตต์ เป็นแหล่งพลังงานปฐมภูมิและใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานทุติยภูมิ นอกจากนั้นชุดเก็บประจุความจุสูง ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายพลังงานชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าได้ในระดับที่สูงมาก ได้รับการพิจารณาเพื่อทดสอบเปรียบเทียบให้เป็นทางเลือกของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดแทนการใช้แบตเตอรี่

ส่วนแรกนั้นได้ศึกษาถึงระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า ซึ่งถือได้ว่าเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญสำหรับการวิจัยด้านระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

ส่วนถัดมาได้กำหนดเป้าหมายทางสมรรถนะของรถจักรยานยนต์ต้นแบบในรายละเอียด โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนซึ่งสามารถแสดงสมรรถนะการขับเคลื่อน การเร่ง การขึ้นทางชัน และความเร็วสูงสุด แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังช่วยในการออกแบบและกำหนดพารามิเตอร์การออกแบบได้อย่างเหมาะสม จากนั้นได้วิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการใช้งานระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ โดยประเมินจากค่าภาระการขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับ ผลการจำลองยืนยันถึงความจำเป็นของระบบไฮบริด พร้อมกับแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในเชิงพลังงานของการใช้เซลล์เชื้อเพลิงที่กำหนดไว้ มาใช้เป็นแหล่งพลังงานปฐมภูมิร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิ ซึ่งได้แก่ ชุดเก็บประจุความจุสูง หรือแบตเตอรี่ให้แก่ระบบขับเคลื่อนในรถจักรยานยนต์

จากนั้นได้ทดสอบอุปกรณ์ย่อยได้แก่ ชุดเซลล์เชื้อเพลิง แบตเตอรี่ และ ชุดเก็บประจุความจุสูง และนำผลทดสอบที่ได้มาใช้สร้างแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากขึ้น ไปจนถึงการทดสอบเพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้การจ่ายพลังงานแบบเป็นวัฏจักรที่สอดคล้องกับการใช้งานในรถจักรยานยนต์ การทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของอุปกรณ์ย่อยทั้งสามชนิดให้ความแม่นยำที่เพียงพอ และสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงการออกแบบระบบขับเคลื่อนต่อไปได้ นอกจากนั้นเป้าหมายสำคัญอีกประการของการทดสอบ

อุปกรณ์ย่อยคือ เพื่อเรียนรู้ลักษณะเฉพาะในการทำงานของอุปกรณ์ ข้อพิจารณาในการใช้งาน และข้อควรระวังในด้านความปลอดภัย ซึ่งนับได้ว่าเป็นมีความสำคัญต่อการติดตั้งระบบขับเคลื่อน

จากที่ได้ทราบถึงคุณลักษณะของอุปกรณ์ต่างๆ แล้ว ส่วนถัดมาได้ปรับปรุงการกำหนดขนาดของอุปกรณ์ย่อยโดยเพื่อเติมข้อพิจารณาในการทำงานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์ และได้ศึกษาถึงรูปแบบการจัดวางสำหรับระบบสองชนิดคือ 1) ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ และ 2) ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุ ความจุสูง การศึกษาระบบขับเคลื่อนทั้งสองได้ถูกทดสอบโดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้าเพื่อจำลองภาระการขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับทดสอบ พร้อมทั้งแสดงให้เห็นว่าระบบทั้งสองชนิดมีวิธีการติดตั้งได้หลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละวิธีนั้นให้ผลการแบ่งจ่ายพลังงานและปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ต่างกัน จากนั้นได้พิจารณารูปแบบการติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบทั้งสอง เพื่อการพิจารณาเปรียบเทียบแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ระหว่างการใช้แบตเตอรี่หรือชุดเก็บประจุความจุสูง ผลการทดสอบแสดงถึงความสามารถของระบบขับเคลื่อนในการจ่ายกำลังไฟฟ้าตามวัฏจักรขับทดสอบได้อย่างรวดเร็วและเพียงพอ และพบว่าระบบทั้งสองมีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นเพื่อชี้ชัดถึงการเลือกใช้แหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิ จึงได้พิจารณาประเด็นอื่นที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม ในด้านค่าใช้จ่ายนั้นชุดเก็บประจุความจุสูงมีความคุ้มค่าในระยะยาวมากกว่าแบตเตอรี่ แม้ว่าราคาเริ่มต้นที่สูงกว่ามาก นอกจากนั้นชุดเก็บประจุความจุสูงยังมีข้อได้เปรียบที่ไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาอย่างสิ้นเชิง โดยสรุปแล้วชุดเก็บประจุความจุสูงจึงถือเป็นทางเลือกที่ควรให้ความสนใจอย่างหนึ่งสำหรับการนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิภายในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์

8.2 ข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้ได้แบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกกล่าวถึงข้อเสนอแนะการพัฒนาขานยนต์เซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจะกล่าวถึงข้อเสนอการพัฒนาในภาพกว้างเกี่ยวกับการพัฒนาขานยนต์เซลล์เชื้อเพลิง ส่วนที่สองเป็นข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อเนื่อง ซึ่งจะกล่าวโดยจำกัดขอบเขตที่ช่องว่างทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้

8.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนายานยนต์เซลล์เชื้อเพลิง

การใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงในรูปแบบไฮบริดในยานยนต์นั้นมีเหตุผลสำคัญคือข้อจำกัดทางด้านสมรรถนะต่อขนาดของชุดเซลล์เชื้อเพลิงนั่นเองซึ่งหากเซลล์เชื้อเพลิงได้รับการวิจัยและพัฒนาให้มีสมรรถนะสูงขึ้น ตอบสนองต่อภาระได้รวดเร็วขึ้น พร้อมกับลดขนาดและน้ำหนักลงย่อมสามารถลดความสำคัญของการใช้งานในรูปแบบไฮบริดได้ ดังนั้นการสนับสนุนให้มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงทั้งการผลิตในส่วนประกอบย่อยไปจนถึงการประกอบขึ้นเป็นชุดเซลล์เชื้อเพลิง โดยเฉพาะการผลิตในประเทศไทยนั้นเป็นสิ่งที่สมควรอย่างยิ่ง นอกจากนั้นสิ่งที่ต้องได้รับการพัฒนาไปพร้อมกันคือ การกักเก็บก๊าซไฮโดรเจนซึ่งในปัจจุบันการกักเก็บก๊าซไฮโดรเจนยังมีข้อจำกัดอยู่อีกมาก รวมถึงการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ย่อยที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ เช่น ชุดควบคุมมอเตอร์ มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงที่สามารถรองรับพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงได้ และชุดสมองกลสำหรับการควบคุมการแบ่งจ่ายพลังงานอย่างละเอียด เป็นต้น

8.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อเนื่อง

วิทยานิพนธ์นี้ทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้าเพื่อจำลองภาระการขับเคลื่อน อย่างไรก็ตามการใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้ายังมีข้อจำกัดในหลายประการ กล่าวคือไม่สามารถจำลองสถานการณ์ของการนำพลังงานจากการหยุดรถกลับมาเก็บได้ (Regenerative braking) แม้ว่าจากการประเมินผลของการนำพลังงานจากการหยุดรถกลับมาเก็บสำหรับกรณีของรถจักรยานยนต์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์บ่งชี้ว่ามีผลต่อระบบเพียงเล็กน้อย นอกจากนั้นกำลังไฟฟ้าที่กำหนดให้ระบบทำงานผ่านชุดรับภาระทางไฟฟ้านั้นได้จากการประเมินโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้านั้นยังไม่สามารถสะท้อนถึงการทำงานร่วมกันระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานกับชุดควบคุมมอเตอร์และมอเตอร์ได้ ดังนั้นเพื่อการต่อยอดทางวิชาการ การนำระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ไปติดตั้งลงบนรถจักรยานยนต์และทดสอบด้วยไดนาโมมิเตอร์หรือทดสอบด้วยการขับที่จริง ย่อมให้ผลที่บ่งชี้ในประเด็นต่างๆ ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น เช่น ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อระยะการขับขี่ และผลของการนำพลังงานจากการหยุดรถกลับมาเก็บระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิสองชนิด

ด้วยเหตุผลของการพัฒนาระบบขับเคลื่อนสำหรับรถจักรยานยนต์ แบตเตอรี่ที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นชนิด VRLA ดังนั้นรายละเอียดการติดตั้งและข้อพิจณาต่างๆ ย่อมอยู่บน

พื้นฐานของแบตเตอรี่ชนิดดังกล่าว อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ชนิดพิเศษ เช่น ชนิด ลิเทียมไอออน (Lithium-ion) หรือ ชนิด นิกเกิลเมทเทิลไฮไดรด์ (Ni-MH) หากมีราคาที่ต่ำกว่าในปัจจุบัน ย่อมต้องถูกมองว่าเป็นทางเลือกสำหรับใช้ในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ได้เช่นกัน ซึ่งแบตเตอรี่ต่างชนิดกันนั้นมีคุณลักษณะและข้อพิจารณาที่ต่างกัน ดังนั้นรายละเอียดการติดตั้ง เช่น การกำหนดวิธีการชาร์จคืนให้แบตเตอรี่ การวัดระดับการประจุ และแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น จึงมีความแตกต่าง ดังนั้นงานวิจัยโดยพิจารณาใช้แบตเตอรี่ชนิดอื่นจึงนับได้ว่าเป็นสิ่งที่ช่วยเติมเต็มช่องว่างทางวิชาการได้อย่างดี



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Fuel Cell Vehicle World Survey 2003. Washington D.C. 20006: Breakthrough Technologies Institute, Feb 2004.
- [2] Folkesson, A., et.al. Real life testing of a Hybrid PEM Fuel Cell Bus. Journal of Power Sources 118 (2003) : 349–357.
- [3] Gao, W. Performance Comparison of a Fuel Cell-Battery Hybrid Powertrain and a Fuel Cell-Ultracapacitor Hybrid Powertrain. IEEE Transaction on vehicular technology 54, 3 (May 2005) : 846-855.
- [4] J. P. Zheng, T. R. Jow, and M. S. Ding. Hybrid power sources for pulsed current applications. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst 37, 1 (Jan. 2001) : 288–291.
- [5] Emadi, A., et.al. Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations. " IEEE Transaction on vehicular technology 54, 3 (2005) : 763-770.
- [6] Rajesh K. Ahluwalia and X. Wang. Direct hydrogen fuel cell systems for hybrid vehicles. Journal of Power Sources 139 (2005) : 152–164.
- [7] Schenck, M.E., et.al. Fuel Cell and Power Conditioning System Interactions. IEEE 07803-8975-1 (2005) : 114-120.
- [8] Guezennec, Y., et.al. Supervisory Control of Fuel Cell Vehicles and its Link to Overall System Efficiency and Low-Level Control Requirements. IEEE 0-7803-7896 (2003) : 2055-2061.
- [9] P. Corbo, et.al. Experimental study of a fuel cell power train for road transport application. Journal of Power Sources 145 (2005) : 610–619.
- [10] P. Corbo, et.al. Experimental assessment of energy-management strategies in fuel-cell propulsion systems. Journal of Power Sources 157 (2006) : 799–808.
- [11] Min Joong Kim et.al. Testing, Modeling, and Control of a Fuel Cell Hybrid Vehicle. Journal of Power Sources 157 (2006) : 799–808.
- [12] R.M. Moore et.al. Energy utilization and efficiency analysis for hydrogen fuel cell vehicles. Journal of Power Sources 159 (2006) : 1214–1230.

- [13] Joeri Van Mierlo et.al. Comparison of Fuel Cell Hybrid Propulsion Topologies with Super-Capacitor. IEEE 1-4244-0121-6/06 (2006)
- [14] Jyh-Rong Chou and Shih-Wen Hsiao. Product design and prototype making for an electric scooter. Materials and Design 26 (2005) : 439–449.
- [15] Chunto Tso and Shih-Yun Chang. A viable niche market—fuel cell scooters in Taiwan. International Journal of Hydrogen Energy 28 (2003) : 757–762.
- [16] G. Pede et.al. FC vehicle hybridisation: an affordable solution for an energy-efficient FC powered drive train. Journal of Power Sources 125 (2004) : 280–291.
- [17] Bruce Lin. Conceptual design and modeling of a fuel cell scooter for urban Asia. Master Thesis Department of Mechanical and Aerospace Engineering School of Engineering and Applied Sciences Princeton University, 1999.
- [18] Arne LaVen. Development of a Prototype fuel cell powered motor scooter. Master Thesis University of Nevada, 1999.
- [19] Iqbal Husain. Electric and Hybrid Vehicles design fundamentals. 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431 : CRC Press LLC, 2003.
- [20] K.Haraldsson. On Direct Hydrogen Fuel Cell Vehicles-Modelling and Demonstration. Doctoral Thesis KTH- Royal Institute of Technology, Sweden, 2005.
- [21] C.C. Chan and Y.S. Wong. The State of the Art of Electric Vehicles Technology. Power Electronics and Motion Control Conference, The 4th International 1 (2004) : 46 - 57.
- [22] M. Zeraouia. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study. Doctoral Thesis Laboratoire d'Ingénierie Mécanique et Electrique (LIME) IUT of Brest University of Western Brittany Rue de Kergoat France
- [23] James Larminie, John Lowry. Electric Vehicle Technology Explained. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex U.S.A. : John Wiley & Sons, 2003.

- [24] Glenn Zorpette. Super charged. IEEE Spectrum (Jan. 2005) : 32-37
- [25] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay and Ali Emadi. Modern Electric Hybrid Electric and Fuel cell Vehicles Fundamentals Theory and Design. 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431 : CRC Press LL, 2005.
- [26] Nexa™ (310-0027) Power Module User's Manual, Ballard Power Systems Inc
- [27] James H. Wang , Wei-Li Chiang and Jet P.H. Shu. The prospects fuel cell motorcycle in Taiwan. Journal of Power Sources (2000) : 151–157.
- [28] Nathan J. English and Ramesh K. Shah. Technology status and design overview of a hybrid fuel cell engine for a motorcycle. Second International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology
- [29] Wolfgang Friede, Stéphane Raëland and Bernard Davat. Mathematical Model and Characterization of the Transient Behavior of a PEM Fuel Cell. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS 19, 5 (September 2004)
- [30] James Gamier, Marie-Cecile Pera, Daniel Hissel, Alexandre De Bernardinis, Jean-Marie Kauffmann and Gerard Coquery. Dynamic Behavior of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell under Transportation Cycle Load. Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium 1 (May 2004) : 329- 333.
- [31] Woojin Choi, Prasad N. Enjeti and Jo W. Howze. Development of an Equivalent Circuit Model of a Fuel Cell to Evaluate the Effects of Inverter Ripple Current. Journal of Power Sources 158, 2, (August 2006) : 1324-1332.
- [32] Yongping Hou, Mingxi Zhuang and Gang Wan. A transient semi-empirical voltage model of a fuel cell stack. International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) : 857–862.
- [33] V.H. Johnson. Battery performance models in ADVISOR. Journal of Power Sources 110 (2002) : 321–329.
- [34] Matthias Dürr, Andrew Cruden, Sinclair Gair and J.R. McDonald. Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system. Journal of Power Sources 161 (2006) : 1400–1411.

- [35] Valerie H. Johnson and Ahmad A Pesaran. Temperature-Dependent Battery Models for High-Power Lithium-Ion Batteries. The 17th Annual Electric Vehicle Symposium (October 2000)
- [36] J. N. Harb, V. H. Johnson and D. Rausen. Use of a fundamentally based lead-acid battery model in hybrid vehicle simulations. Annual Electrochemical Society Conference (1999)
- [37] R. L. Spyker and R. M. Nelms. Classical Equivalent Circuit Parameters for a Double-Layer Capacitor. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems 36, 3 (JULY 2000)
- [38] Andrew Chu and Paul Braatz. Comparison of commercial supercapacitors and high-power lithium-ion batteries for power-assist applications in hybrid electric vehicles I. Initial characterization. Journal of Power Sources 112 (2002) : 236–246.
- [39] Donald W. Corson. High Power Battery systems for hybrid vehicles. Journal of Power Sources 105 (2002) : 110-113.
- [40] Simpson, A.G. and Walker, G.R. Lifecycle costs of ultracapacitors in electric vehicle applications. Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual 2 (2002) : 1015- 1020.
- [41] Andrew Burke. The present and projected performance and cost of double-layer pseudo-capacitive ultracapacitors for hybrid vehicle applications. Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference (Sept. 2005)
- [42] Robert Spotnitz. Advanced EV and HEV batteries. Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference (Sept. 2005)
- [43] Maxwell Technologies <http://www.maxwell.com/ultracapacitors/products/index.asp>
- [44] Randall Donn Senger. Validation of ADVISOR as a Simulation Tool for a Series Hybrid Electric Vehicle Using the Virginia Tech FutureCar Lumina. Master Thesis Mechanical Engineering the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.

- [45] Chan-Chiao Lin, et.al. Power Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck. IEEE Transactions on control systems 11, 6 (NOVEMBER 2003) : 839-849.
- [46] Xiaolin Hu, et al. Multi-Objective Optimization of HEV Fuel Economy and Emissions using Evolutionary Computation. SAE International 2004-01-1153 (2004)
- [47] Aymeric Rousseau, et al. Trade-Offs Between Fuel Economy and NOx Emission Using Fuzzy Logic Control With a Hybrid CVT Configuration. 19th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition (Aug 2002)
- [48] Yi Ding et.al. Hydrogen Fuel Cell Vehicle Fuel Economy Measurements and Calculation. SAE TECHNICAL PAPER SERIES 2004-01-1339 (2004)
- [49] OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS NI 9201/9221, National Instruments, www.ni.com/manuals
- [50] Current Sensor: ACS754xCB-050, Allegro Microsystem Inc.
- [51] Current Sensor: ACS754SCB-200, Allegro Microsystem Inc.
- [52] OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS NI 9205, National Instruments, www.ni.com/manuals



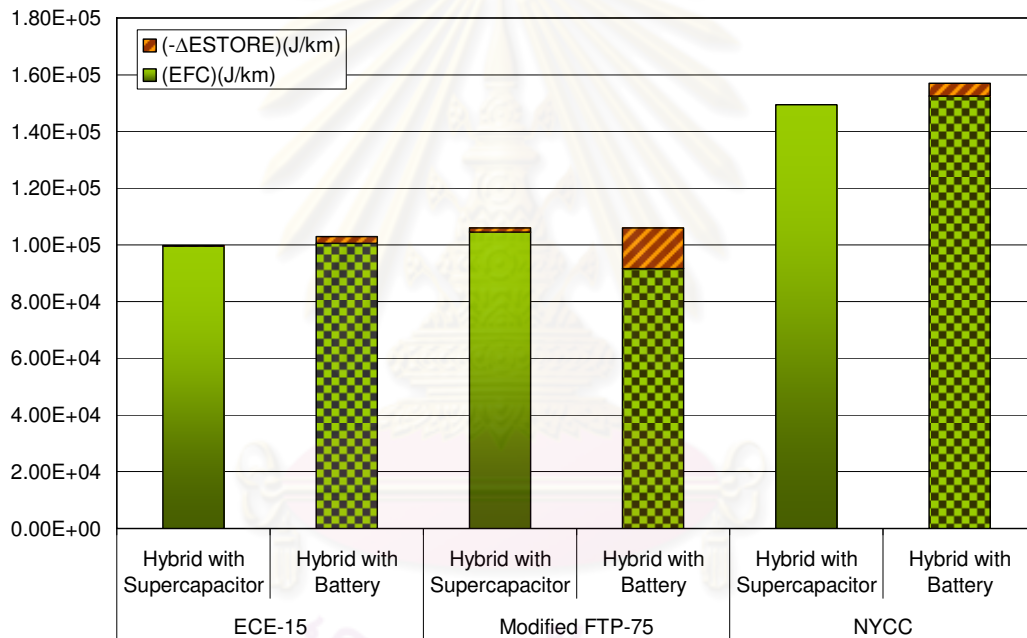
ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

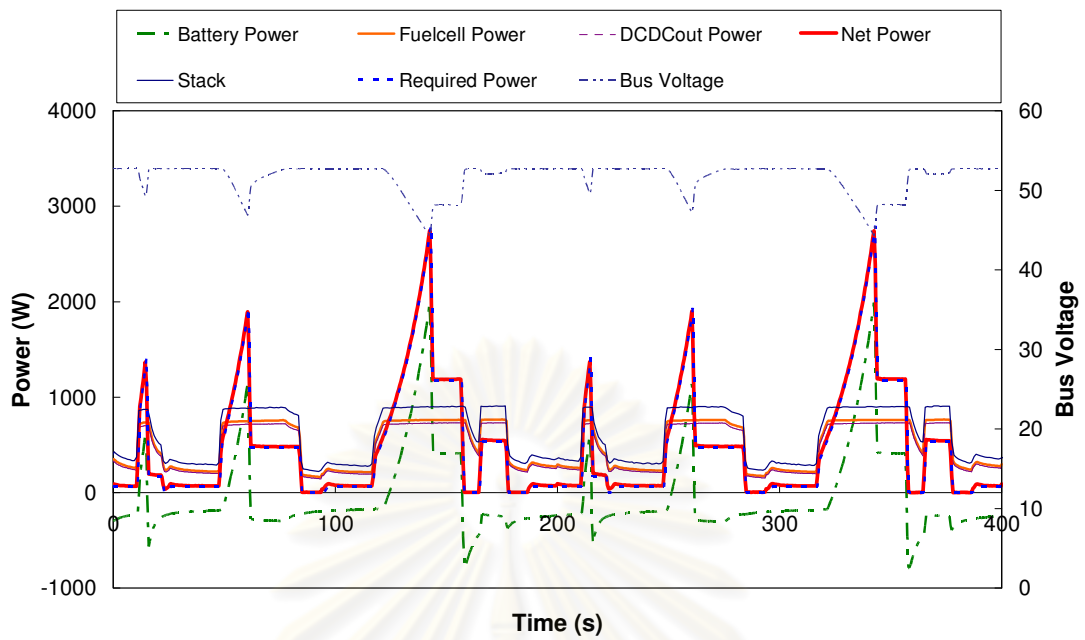
ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อน

รูปที่ ก-1 แสดงผลรวมพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงกับพลังงานสะสมในแหล่งพลังงานทุติยภูมิเพื่อใช้อธิบายผลอัตราการใช้เชื้อเพลิงในหัวข้อที่ 7.1.4 รูปที่ ก-2 ถึง รูปที่ ก-7 แสดงผลการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดในหัวข้อที่ 7.1.4 รูปที่ ก-8 และ รูปที่ ก-9 แสดงผลการจำลองระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง เพื่อใช้เปรียบเทียบเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 7.2

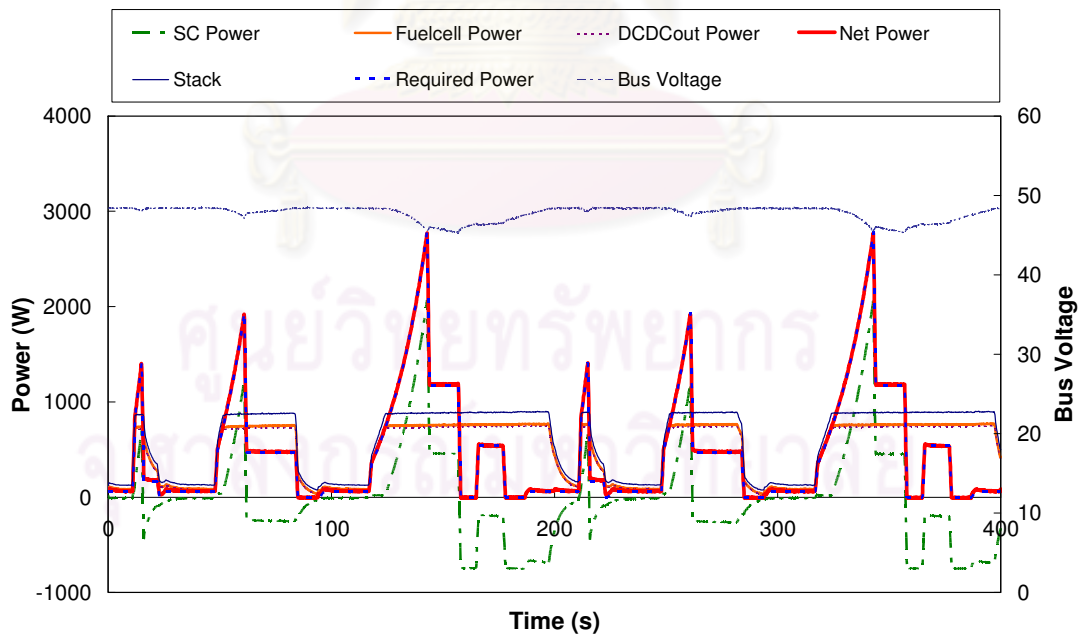


รูปที่ ก-1 ผลรวมพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงกับพลังงานสะสมในแหล่งพลังงานทุติยภูมิ

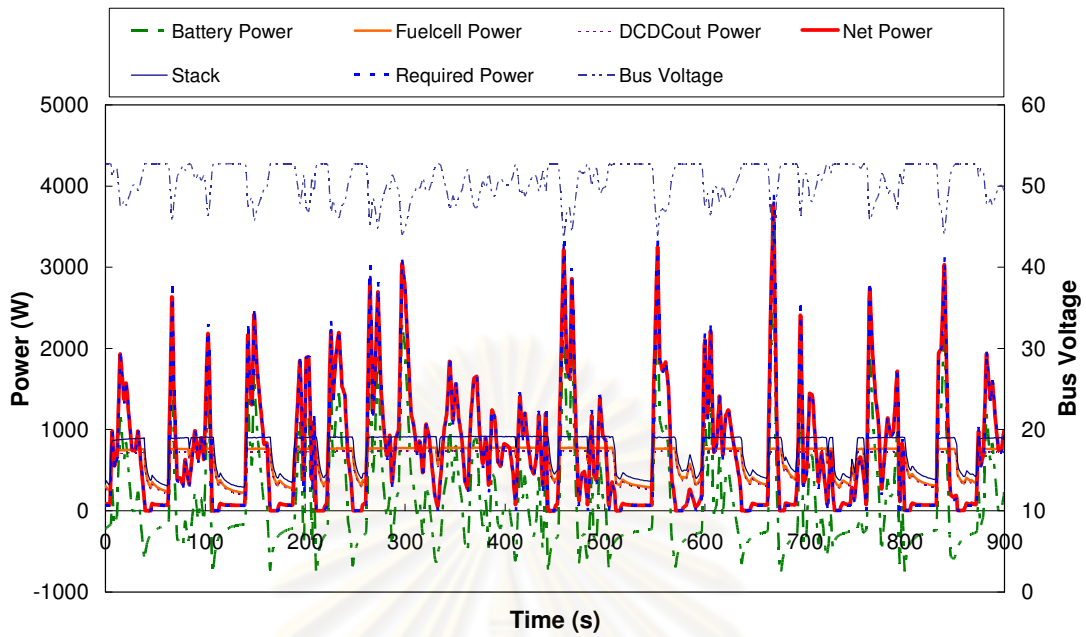
$$(E_{FC} - \Delta E_{STORE, BATT})$$



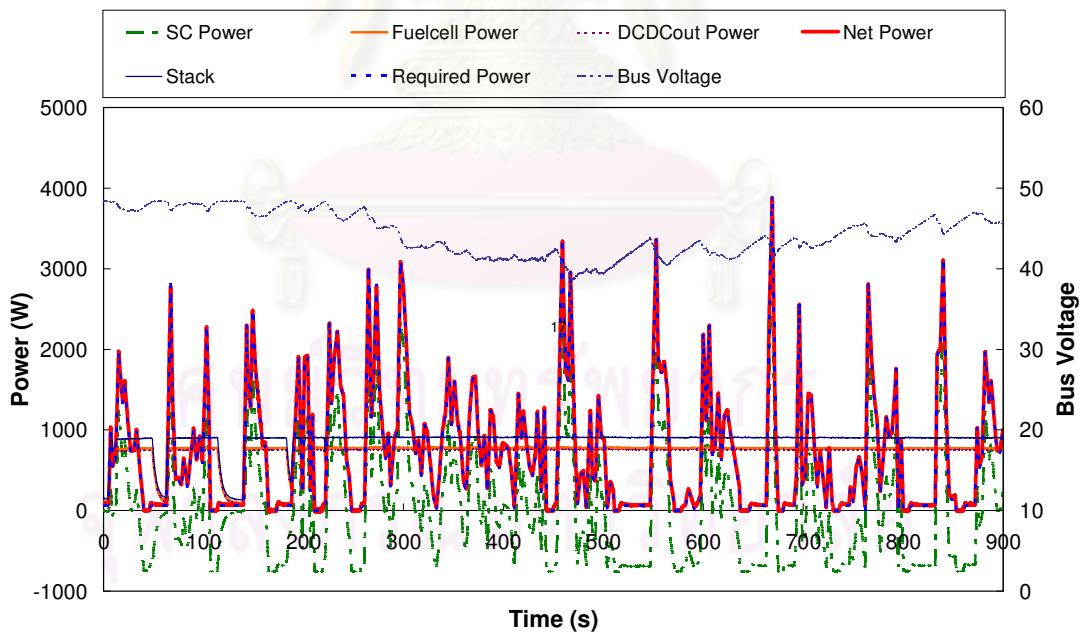
รูปที่ ก-2 ผลการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ตามวัฏจักรขั้ทดสอบ ECE-15



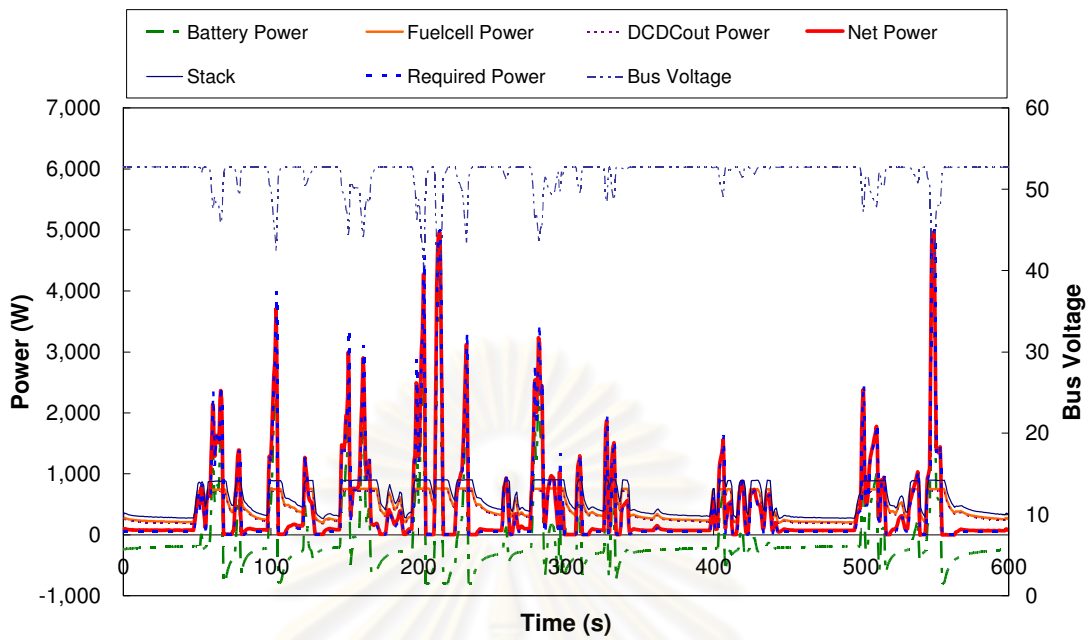
รูปที่ ก-3 ผลการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูงตามวัฏจักรขั้ทดสอบ ECE-15



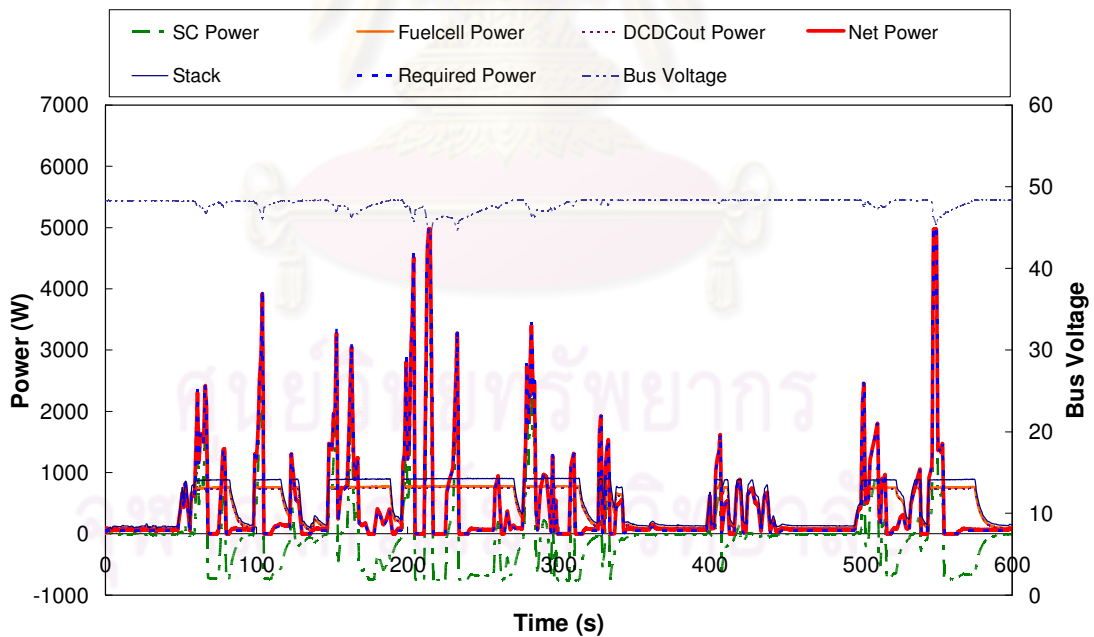
รูปที่ ก-4 ผลการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ตามวัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75



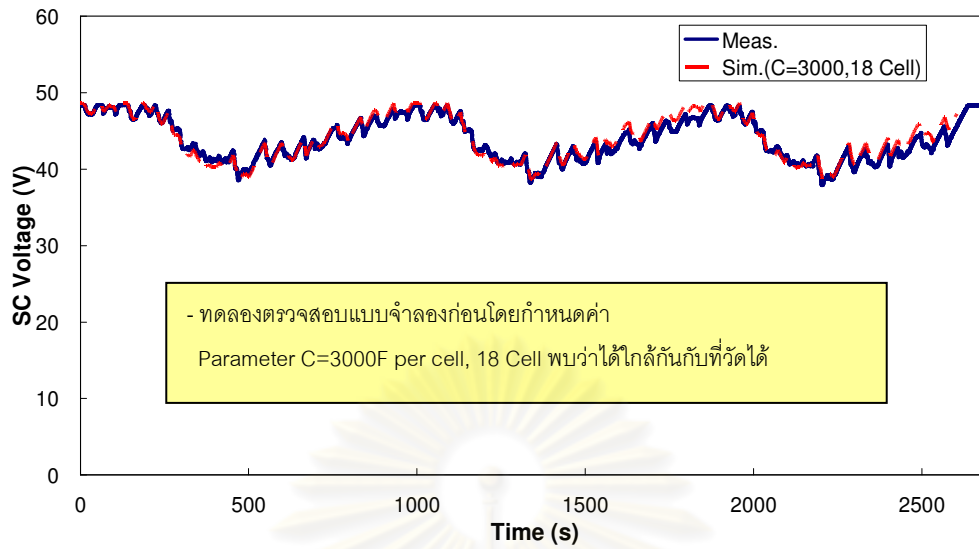
รูปที่ ก-5 ผลการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูงตามวัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75



รูปที่ ก-6 ผลการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ตามวัฏจักรขับทดสอบ NYCC

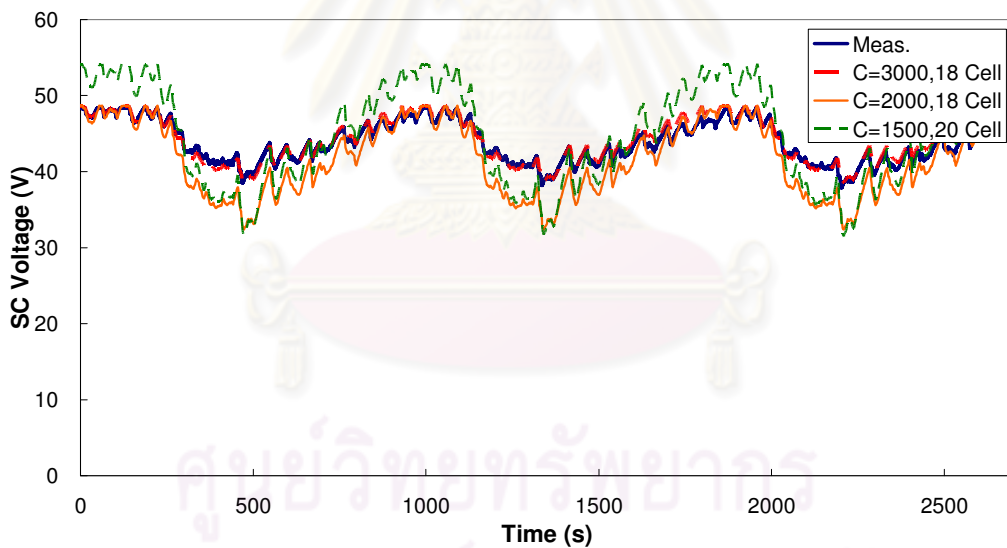


รูปที่ ก-7 ผลการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูงตามวัฏจักรขับทดสอบ NYCC



รูปที่ ก-8 การสอบทวนแบบจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงโดยวัฏจักรซ้ำ

ทดสอบ Modified FTP-75



รูปที่ ก-9 ผลค่าแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงขนาดต่างๆ จากแบบจำลองโดยวัฏจักรซ้ำ

ทดสอบ Modified FTP-75

ภาคผนวก ข

การปรับแก้ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิง

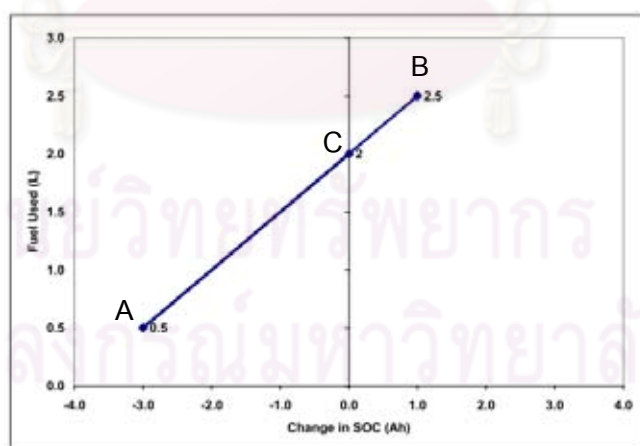
การวัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อระยะทางการขับเคลื่อนนั้นถือเป็นเป้าหมายที่สำคัญอย่างหนึ่งในการทดสอบระบบขับเคลื่อน ซึ่งหากระบบที่ใช้ทดสอบเป็นระบบที่ใช้แหล่งจ่ายพลังงานเพียงหนึ่งแหล่ง การวัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงนั้นสามารถวัดได้โดยตรง แต่สำหรับระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดนั้นเป็นระบบที่ใช้แหล่งจ่ายพลังงานมากกว่าหนึ่งแหล่ง ซึ่งในที่นี้คือแบตเตอรี่หรือชุดเก็บประจุความจุสูงทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิ ซึ่งในระหว่างที่ระบบทำงาน แหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิจะมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบสลับกับการรับพลังงานไฟฟ้าเข้ามาเก็บ ซึ่งปริมาณพลังงานที่เข้าและออกจากแหล่งจ่ายทุติยภูมิตลอดการทดสอบหนึ่งนั้นจะมีปริมาณที่ต่างกัน ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดการทดสอบหนึ่ง แหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิมักมีระดับพลังงานที่แตกต่างจากขณะเริ่มต้นทดสอบ ดังนั้นปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่วัดได้โดยตรงนั้นจึงไม่ใช่ค่าที่ถูกต้อง

ตัวอย่างเช่น การทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดหนึ่ง โดยเป็นระบบที่ทำงานร่วมกับแบตเตอรี่ ในขณะที่ก่อนการทดสอบแบตเตอรี่มีระดับการประจุอยู่ที่ 60 % และจากการวัดค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงโดยตรงได้ 100 หน่วย หากวัดระดับการประจุของแบตเตอรี่เมื่อสิ้นสุดการทดสอบได้ 60 % นั้นหมายถึงแหล่งจ่ายทุติยภูมิมีระดับพลังงานที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงสามารถบ่งชี้ได้ทันทีว่าระบบขับเคลื่อนมีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 100 หน่วย ดังที่วัดได้ แต่ถ้าหากเมื่อสิ้นสุดการทดสอบแล้ววัดระดับการประจุได้ 50 % นั้นหมายถึงแหล่งจ่ายทุติยภูมิมีการจ่ายพลังงานออกมามากกว่ารับพลังงานกลับคืน ดังนั้นค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิง 100 หน่วย ที่วัดได้จึงไม่ใช่ค่าที่ถูกต้อง ซึ่งค่าที่ถูกต้องนั้นควรมีค่ามากกว่า 100 หน่วย ที่วัดได้ แต่ในทางกลับกัน หากสิ้นสุดการทดสอบแล้ววัดระดับการประจุได้ 70 % นั้นหมายถึงปริมาณเชื้อเพลิงส่วนหนึ่งถูกใช้ไปในการชาร์จให้แก่แหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิ ดังนั้นค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิง 100 หน่วย ที่วัดได้จึงไม่ใช่ค่าที่ถูกต้องเช่นกัน ซึ่งค่าที่ถูกต้องนั้นควรมีค่าน้อยกว่า 100 หน่วย ที่วัดได้เป็นต้น

การปรับแก้ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงนั้นมีความสำคัญมากสำหรับระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ เนื่องจากเป็นการยากที่จะสามารถปรับตั้งระบบให้มีระดับการประจุของแบตเตอรี่เมื่อสิ้นสุดการทดสอบมีค่าเท่ากับระดับการประจุในขณะเริ่มต้นโดยสมบูรณ์ แต่สำหรับระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง การปรับแก้ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงนั้นจะไม่มีผลสำคัญ เนื่องจากชุดเก็บประจุความจุสูงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่กักเก็บพลังงานได้น้อย ดังนั้นจึงมีข้อบังคับสำหรับการปรับตั้งที่จะต้อง

กำหนดให้ชุดเก็บประจุความจุสูงมีระดับพลังงานไม่เปลี่ยนแปลง แม้ว่าระดับพลังงานจะมีการแกว่งตัวในระหว่างการทดสอบ แต่ในภาพกว้างแล้วจะต้องแกว่งตัวอยู่ในช่วงที่คงที่ไม่ลดลงดังแสดงในผลการทดสอบเบื้องต้นในรูปที่ 6-16 ในบทที่ 6

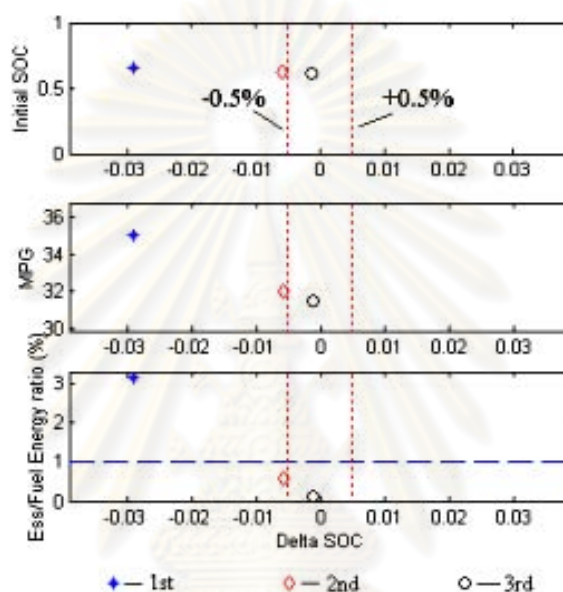
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านพบว่าการปรับแก้ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงนั้นมีวิธีการที่หลากหลาย โดยสามารถแบ่งเป็นสองวิธีหลักได้แก่ 1) ปรับโดยการหาจุดตัดกราฟ 2) ปรับโดยคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงเทียบเท่า งานวิจัยของ Senger [44] ใช้การปรับแก้ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงโดยการทดสอบระบบโดยกำหนดให้มีระดับการประจุของแบตเตอรี่ที่ต่างกันสองครั้ง โดยครั้งที่หนึ่งกำหนดให้มีระดับการประจุที่สูง และเมื่อสิ้นสุดการทดสอบครั้งที่หนึ่งจะได้ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงควบคู่กับระดับการประจุที่เปลี่ยนแปลงดังจุด A ในรูปที่ ข-1 [44] จากนั้นทดสอบระบบอีกครั้งโดยกำหนดให้มีระดับการประจุที่ต่ำซึ่งจะได้ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงควบคู่กับระดับการประจุที่เปลี่ยนแปลงอีกหนึ่งค่าดังจุด B ในรูปที่ ข-1 [44] เมื่อได้ทั้งสองจุดแล้วจึงหาจุดตัดแกนที่การเปลี่ยนแปลงระดับการประจุเท่ากับศูนย์ดังจุด C ในรูปที่ ข-1 [44] ซึ่งจะได้ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ปรับแก้แล้ว นอกจากนั้นงานวิจัยของ Lin [45] ใช้วิธีการปรับแก้ที่คล้ายกันกับงานของ Senger [44] แต่ใช้จำนวนการทดสอบมากขึ้นเป็นห้าครั้ง และแต่ละครั้งที่ทดสอบนั้นกำหนดให้ระดับการประจุขณะเริ่มต้นมีค่าต่างกัน จากนั้นใช้วิธีการ Linear regression สร้างเส้นตรงเพื่อหาจุดตัดแกน



รูปที่ ข-1 การปรับแก้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงโดยวิธีของ Senger [44]

อีกงานวิจัยหนึ่งที่ใช้การปรับแก้โดยใช้แนวคิดแบบหาจุดตัดกราฟได้แก่งานวิจัยของ Hu [46] วิธีการปรับแก้ที่ทำได้โดยกำหนดช่วงการเปลี่ยนแปลงระดับการประจุไม่เกิน ± 0.5 %

จากนั้นทดสอบโดยกำหนดให้มีระดับการประจุเริ่มต้นมีค่าๆ หนึ่ง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองแต่ละครั้งให้สังเกตค่าการเปลี่ยนแปลงระดับการประจุเมื่อสิ้นสุดว่าอยู่ในช่วงไม่เกิน $\pm 0.5\%$ หรือไม่ ดังรูปที่ ข-2 [46] ถ้าไม่อยู่ในช่วงให้ทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนค่าระดับการประจุเริ่มแล้วทดลองซ้ำ แต่หากทดลองแล้วได้ค่าการเปลี่ยนแปลงระดับการประจุเมื่อสิ้นสุดอยู่ในช่วงดังกล่าวแล้ว ผลการวัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการทดสอบครั้งนั้นสามารถบ่งชี้เป็นค่าที่ถูกต้องได้



รูปที่ ข-2 การปรับแก้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงโดยวิธีของ Hu [46]

วิธีการปรับแก้โดยการหาจุดตัดกราฟนั้นเป็นวิธีที่เข้าใจได้ง่ายและไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวนั้นพิจารณาได้ว่าเป็นวิธีการที่ทำให้กระบวนการทดสอบมีความยุ่งยากและใช้เวลามาก เช่น ต้องมีการทดสอบซ้ำหลายครั้งเป็นต้น แนวคิดการปรับแก้ก็อีกวิธีหนึ่งซึ่งพิจารณาได้ว่าสามารถช่วยให้การทดสอบเป็นไปได้โดยง่าย ได้แก่ การปรับแก้โดยคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงเทียบเท่า ซึ่งมีแนวคิดที่ว่าใช้การวัดระดับการประจุที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อสิ้นสุดการทดสอบมาคำนวณเป็นพลังงาน จากนั้นนำค่าพลังงานที่คำนวณได้นั้นมาคำนวณหาปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเทียบเท่า แล้วจึงนำมาเพิ่มหรือหักออกจากปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่วัดได้ ซึ่งงานวิจัยของ Corbo [10] ได้ใช้แนวคิดการปรับแก้ดังกล่าวนี้ โดยปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ต้องนำมาบวกเพิ่มจากที่วัดได้นั้นหาได้จากปริมาณเชื้อเพลิงจากการเดินเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงในจุดทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ติดตั้งอยู่ในระบบอยู่แล้วเพื่อชาร์จให้แก่แบตเตอรี่จนกระทั่งแบตเตอรี่มีระดับการประจุเท่ากับค่าเริ่มต้น นอกจากนั้น

งานวิจัยของ Rousseau [47] ใช้วิธีการคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงจากระดับพลังงานที่เปลี่ยนไปของแบตเตอรี่เช่นกัน โดยคำนวณค่าปริมาณเชื้อเพลิงเทียบเท่าจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Fuel heating value) ที่ใช้ นอกจากนั้น Ding [48] ได้เสนอวิธีการปรับแก้ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงโดยคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องปรับแก้จากระดับพลังงานที่เปลี่ยนไปของแบตเตอรี่เช่นกัน แต่ค่าปริมาณเชื้อเพลิงเทียบเท่าที่นำมาใช้ คำนวณมาจากการวัดสัดส่วนของปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ตลอดการทดสอบต่อพลังงานที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายออกมาตลอดการทดสอบ ซึ่งพิจารณาได้ว่าค่าปริมาณเชื้อเพลิงเทียบเท่าจากสมการของ Ding [48] นั้นเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของระบบที่นำมาทดสอบ พร้อมกับรวมผลของวัฏจักรขับทดสอบที่ใช้ทดสอบไว้ด้วย อย่างไรก็ตามงานของ Ding [48] นั้นใช้การวัดระดับการประจุจากการอินทิเกรตกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแบตเตอรี่ ซึ่งพิจารณาได้ว่าเป็นการวัดระดับการประจุที่ไม่แม่นยำนัก

วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้การปรับแก้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงโดยใช้แนวคิดบางส่วน ของ Ding [48] เนื่องจากมองว่าเป็นการปรับแก้ที่สามารถดำเนินการทดสอบได้โดยง่ายและเป็นการปรับแก้ที่รวมผลของประสิทธิภาพของระบบและผลของวัฏจักรขับทดสอบที่ใช้ทดสอบไว้ด้วย โดยตัดแปลงในส่วนของ การวัดการเปลี่ยนแปลงของระดับการประจุจากการใช้การอินทิเกรตกระแสไฟฟ้ามาเป็นการวัดแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่โดยตรง

แนวคิดการคำนวณการปรับแก้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงนั้น เริ่มจากสมมติค่าปริมาณเชื้อเพลิงเทียบเท่าจากสัดส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายออกมาตลอดการทดสอบ ต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่เซลล์เชื้อเพลิงใช้ตลอดช่วงเวลาเดียวกันดังสมการที่ ข-1 พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายออกมานั้นสามารถประเมินได้โดยการวัดกำลังไฟฟ้าตลอดการทดสอบแล้วอินทิเกรตตลอดช่วงเวลาดังกล่าวดังสมการที่ ข-2 และปริมาณเชื้อเพลิงนั้นสามารถทราบได้โดยใช้ซอฟต์แวร์จากผู้ผลิตเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งการสมมติค่าปริมาณเชื้อเพลิงเทียบเท่าโดยวิธีนี้นั้นมองได้ว่าเป็นค่าเชื้อเพลิงเทียบเท่าที่ได้รวมผลของประสิทธิภาพของระบบพร้อมกับผลของวัฏจักรขับทดสอบที่ใช้ทดสอบไว้ด้วยกัน

$$\frac{E_{FC}}{H_{FC}} = c \quad (\text{ข-1})$$

$$E_{FC} = \int_{t_0}^T P_{FC}(t) dt \quad (\text{ข-2})$$

จากนั้นประเมินค่าระดับพลังงานสะสมในแบตเตอรี่ โดยหาจากระดับการประจุของแบตเตอรี่ซึ่งได้จากการวัดโดยตรงจากแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ซึ่งจะให้ได้ค่าที่แม่นยำนั้น

จะต้องวัดแรงดันไฟฟ้าในขณะที่แบตเตอรี่ไม่ได้จ่ายกระแสไฟฟ้า และแบตเตอรี่ไม่ได้ถูกใช้งานหรือชาร์จมาไม่ต่ำกว่า 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงสามารถนำมาคำนวณระดับพลังงานสะสมได้ดังสมการที่ ข-3

$$\Delta E_{STORE,BATT} = \Delta \% SOC_{BATT} \times V_{BATT,nom} \times C_B \times 3600 \quad (ข-3)$$

จากการสมมุติค่าเชื้อเพลิงเทียบเท่าดังกล่าว และค่าระดับพลังงานสะสมในแบตเตอรี่ที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นค่าปริมาณเชื้อเพลิงที่ปรับแก้สามารถเขียนได้ดังสมการที่ ข-4 และ ข-5

$$H_{Corr} = (E_{FC} - \Delta E_{STORE,BATT}) \times \left(\frac{H_{meas}}{E_{FC}} \right) \quad (ข-4)$$

$$H_{Corr} = \left(1 + \frac{-\Delta E_{STORE,BATT}}{E_{FC}} \right) \times H_{meas} \quad (ข-5)$$

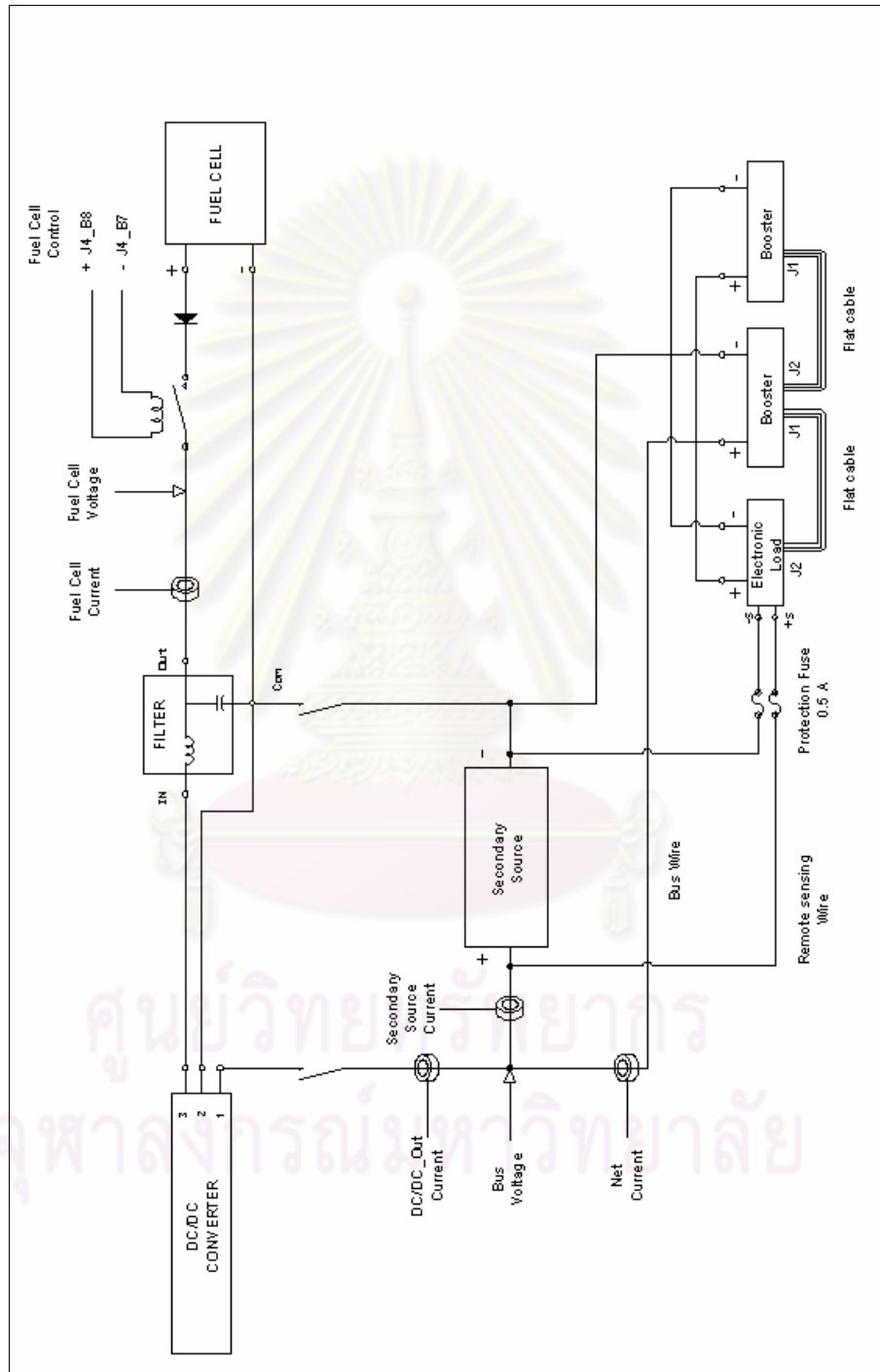
โดย

H_{Corr}	คือ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ปรับแก้แล้ว (Standard liters)
H_{meas}	คือ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่วัดได้จากการทดสอบ (Standard liters)
$\Delta E_{STORE,BATT}$	คือ ระดับพลังงานที่เปลี่ยนแปลงเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ (จูล)
E_{FC}	คือ พลังงานที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายตลอดการทดสอบ (จูล)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

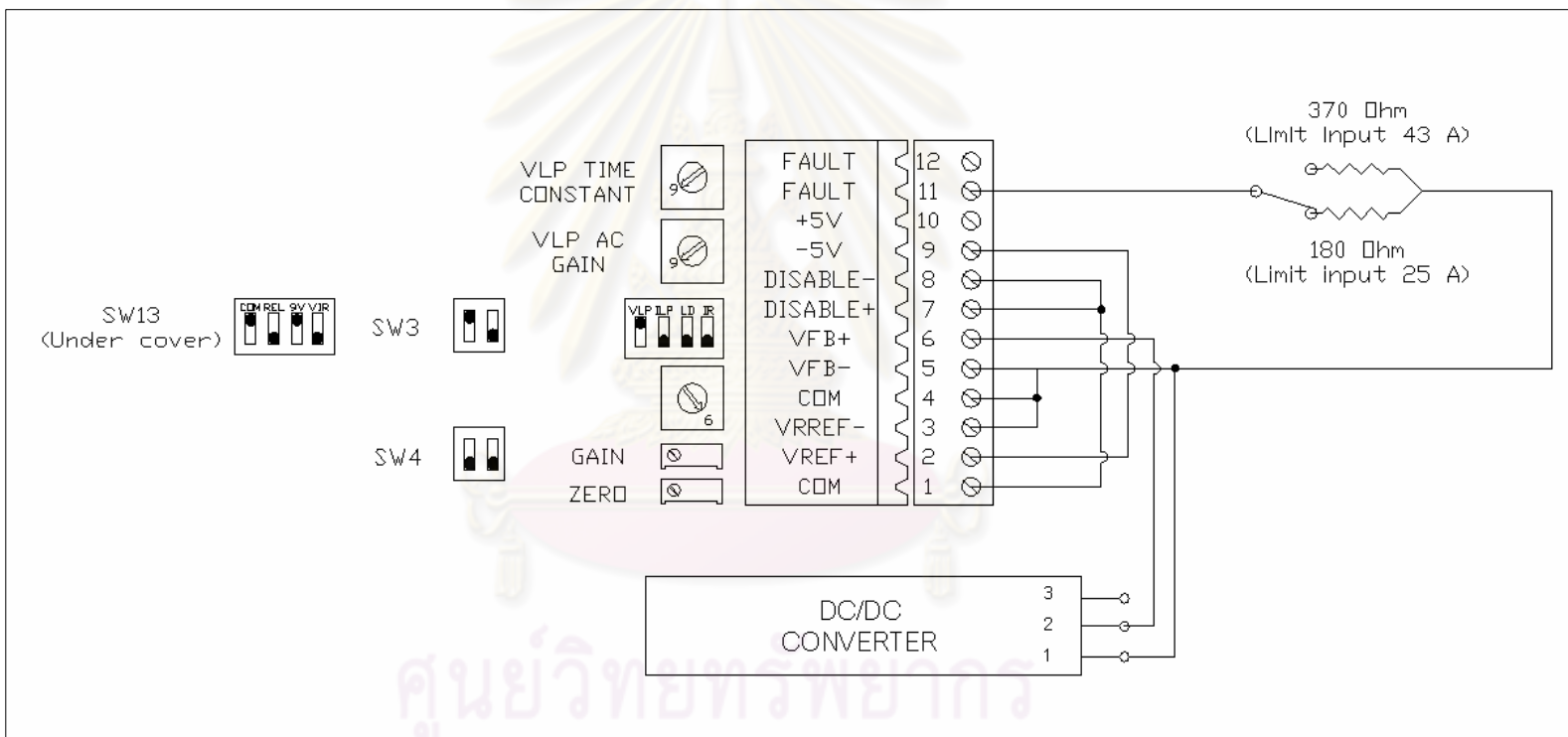
ภาคผนวก ค

วงจรไฟฟ้าของชุดทดลอง



รูปที่ ค-1 วงจรไฟฟ้าของชุดทดลองระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด

รูปที่ ๑-2 การเชื่อมต่อสายไฟเข้าและสายไฟรับตั้งสวิตช์ที่ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้าที่กระแสตรง



ภาคผนวก ง

การวัดและอุปกรณ์การวัด

การวัดและอุปกรณ์การวัดในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งได้เป็นสองส่วนดังนี้

- 1) การวัดค่าภายในชุดเซลล์เชื้อเพลิง
- 2) การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของชุดทดสอบระบบขับเคลื่อน

ง.1 การวัดค่าภายในชุดเซลล์เชื้อเพลิง

การวัดค่าภายในชุดเซลล์เชื้อเพลิงเช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์เชื้อเพลิง และปริมาณการใช้เชื้อเพลิง สามารถตรวจวัดและเก็บบันทึกค่าต่างๆ ตามเวลาเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ได้โดยการเชื่อมต่อสัญญาณจากชุดเซลล์เชื้อเพลิงผ่านทางโปรแกรม NexaMon OEM 2.0 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์จากผู้ผลิตชุดเซลล์เชื้อเพลิงดังรูปที่ ง-1 [26]

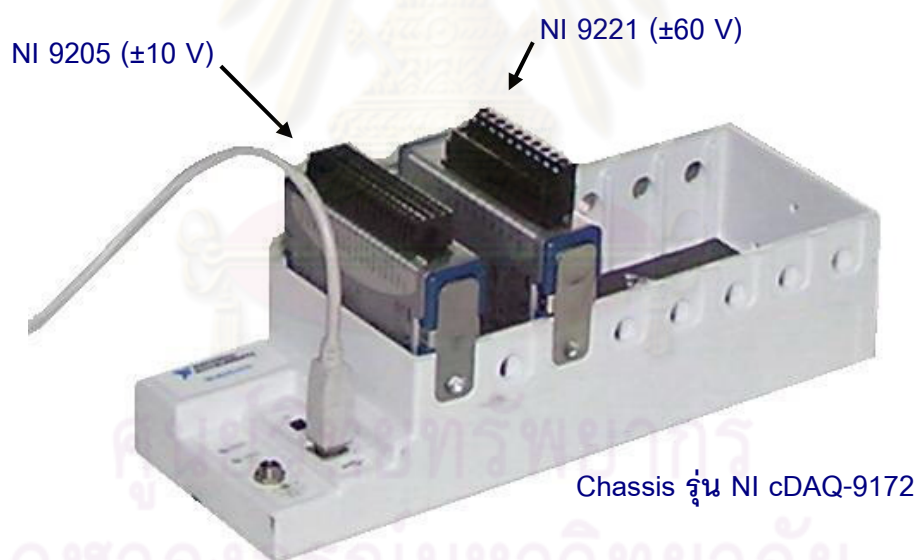


รูปที่ ง-1 หน้าต่างโปรแกรม NexaMon OEM 2.0

ความแม่นยำของการวัดค่าจากเซลล์เชื้อเพลิงนั้น ทางผู้ผลิตไม่ได้กำหนดไว้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามชุดควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงก็ได้ใช้ค่าที่วัดได้ดังกล่าวนี้ในการควบคุมการทำงานภายในชุดเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าค่าที่วัดได้จากเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการใช้อ้างอิง

ง.2 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของชุดทดสอบระบบขับเคลื่อน

แรงดันไฟฟ้าในตำแหน่งใดๆ ของชุดทดสอบระบบขับเคลื่อนสามารถตรวจวัดและเก็บบันทึกค่าโดยการเชื่อมต่อสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจวัดอัตโนมัติ (Data Acquisition, DAQ) ได้โดยตรง วิทยานิพนธ์นี้พิจารณาใช้อุปกรณ์รุ่น NI 9221 เชื่อมต่อกับแท่นรวมอุปกรณ์ (Chassis) รุ่น NI cDAQ-9172 จาก National Instruments ดังรูปที่ ง-2 ในการวัดและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่คอมพิวเตอร์ ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์แสดงในตารางที่ ง-1 [49]

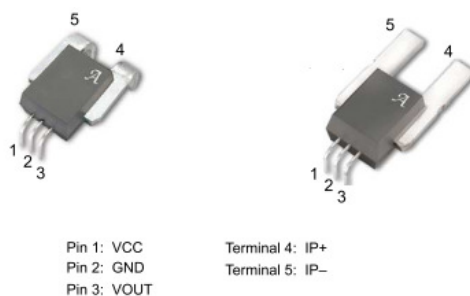


รูปที่ ง-2 อุปกรณ์ตรวจวัดอัตโนมัติ

ตารางที่ ง-1 ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า NI 9221

NI 9221	Specifications
Number of channels	8 analog input channels
ADC resolution	12 bits
Sample rate	800 kS/s
Input range	± 60 V
Overvoltage protection	± 100 V
Measurement Conditions	
Calibrated typ (25 °C, ± 5 °C)	Gain Error $\pm 0.04\%$,Offset Error $\pm 0.07\%$
Calibrated max (-40 to 70 °C)	Gain Error $\pm 0.25\%$,Offset Error $\pm 0.25\%$
Uncalibrated typ (25 °C, ± 5 °C)	Gain Error $\pm 0.26\%$,Offset Error $\pm 0.43\%$
Uncalibrated max (-40 to 70 °C)	Gain Error $\pm 0.67\%$,Offset Error $\pm 1.06\%$
Stability	
Gain drift	± 34 ppm/°C
Offset drift	± 580 μ V/°C
Input bandwidth (-3 dB)	950 kHz min
Input impedance	
Resistance	1 M Ω
Capacitance	5 pF
Settling time	1.25 μ s

ในส่วนของการวัดค่ากระแสไฟฟ้านั้นได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า (Current sensor) ดังรูปที่ ง-3 [50,51] เพื่อแปลงค่ากระแสไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสำหรับการเก็บบันทึกค่าต่อไป อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 1) อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าวรุ่น ACS754xCB-050 จาก Allegro Microsystem, Inc 2) อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าวรุ่น ACS754SCB-200 จาก Allegro Microsystem, Inc และ 3) NI 9205 จาก National Instruments



รูปที่ ง-3 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ารุ่น ACS754xCB-050 และ ACS754SCB-200 จาก Allegro Microsystem

อุปกรณ์ตรวจวัดรุ่น ACS754xCB-050 ใช้วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง เพราะมีช่วงการวัดที่ +/- 50 แอมแปร์ ซึ่งเพียงพอในตำแหน่งดังกล่าว และอุปกรณ์ตรวจวัดรุ่น ACS754SCB-200 ใช้วัดค่ากระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทุติยภูมิและกระแสไฟฟ้าสุทธิของระบบ เพราะมีช่วงการวัดที่ +/- 200 แอมแปร์ ซึ่งเพียงพอสำหรับตำแหน่งดังกล่าวเช่นกัน ตารางที่ ง-2 [50,51] แสดงลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ารุ่น ACS754xCB-050 และ ACS754SCB-200 ซึ่งพิจารณาว่ามีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการนำมาใช้งานในการตรวจวัดการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อน นอกจากนี้ อุปกรณ์ตรวจวัดอัตโนมัติรุ่น NI 9205 ได้ถูกนำมาเชื่อมต่อกับแท่นรวมอุปกรณ์ (Chassis) รุ่น NI cDAQ-9172 เช่นเดียวกับการวัดแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ ง-2 เพื่อรับสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าทั้งสองมาเก็บบันทึกเข้าสู่คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ตรวจวัดอัตโนมัติรุ่น NI 9205 มีลักษณะเฉพาะดังตารางที่ ง-3 [52] ซึ่งพิจารณาว่ามีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการนำมาใช้งานในการตรวจวัดการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนเช่นกัน

ตารางที่ ง-2 ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ารุ่น ACS754xCB-050 และ ACS754SCB-200

ACS754xCB-050 / ACS754SCB-200					
Characteristic	Test Conditions	Min	Typ	Max	Units
Primary Sensed Current	-	-50 / -200	-	50 / 200	A
Supply Voltage	-	4.5	5	5.5	V
Supply Current	$V_{CC} = 5.0$ V, output open	6.5	8	10	mA
Output Resistance	$I_{OUT} = 1.2$ mA	-	1	2	Ω
Output Capacitance Load	VOUT to GND	-	-	10	nF
Output Resistive Load	VOUT to GND	4.7	-	-	k Ω

ตารางที่ ง-2 ต่อ ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ารุ่น ACS754xCB-050 และ ACS754SCB-200

ACS754xCB-050 / ACS754SCB-200					
Characteristic	Test Conditions	Min	Typ	Max	Units
Primary Conductor Resistance	IP = ±100/±50A; TA = 25°C	-	100	-	μΩ
PERFORMANCE CHARACTERISTICS, -20°C to +85°C, VCC = 5 V					
Propagation time	IP = ±50 / ±100 A, TA = 25°C	-	4	-	μs
Response time	IP = ±50 / ±100 A, TA = 25°C	-	12 / 11	-	μs
Rise time	IP = ±50 / ±100 A, TA = 25°C	-	11 / 10	-	μs
Frequency Bandwidth	-3 dB, T = 25°C	-	35	-	kHz
Sensitivity	Over full range of IP, TA = 25°C	37.8 / 9.5	40.0 / 10.0	42.0 / 10.5	mV/A
Noise	Peak-to-peak, TA = 25°C, no external filter	-	65 / 35	-	mV
Nonlinearity	Over full range of IP	-	-	1.5 / 0.8	%
Symmetry	Over full range of IP	98	100	102	%
Zero Current Output Voltage	I = 0 A, TA = 25°C	-	VCC / 2	-	V
Electrical Offset Voltage	I = 0 A, TA = 25°C	-10	-	10	mV
Magnetic Offset Error	I = 0 A, after excursion of 100 A	-	±0.1 / ±0.15	±0.3 / ±0.5	A
Total Output Error	Over full range of IP, TA = 25°C	-	±1.0	±5.0	%

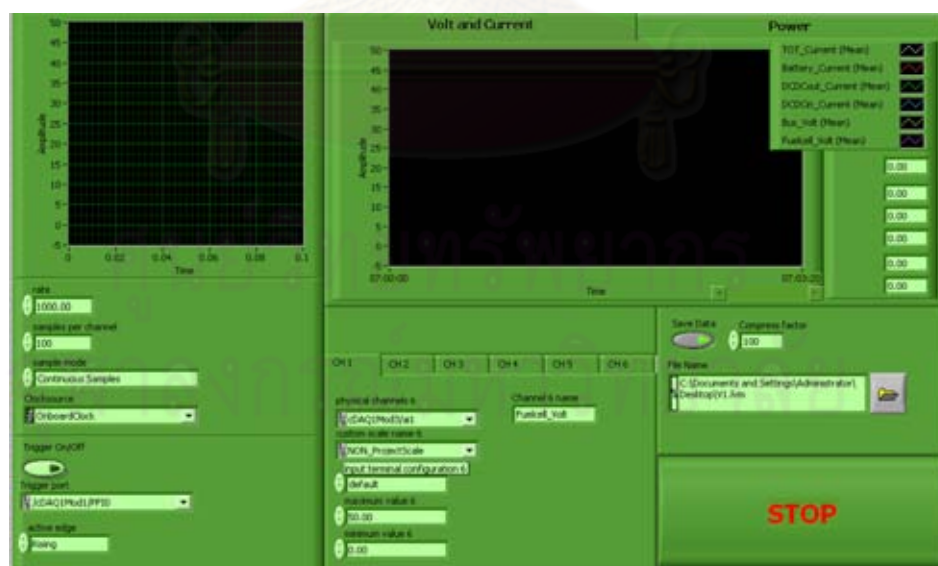
ตารางที่ ง-3 ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า NI 9205

NI 9221	Specifications
Number of channels	32 single-ended or 16 differential analog input channels, 1 digital input channel, 1 digital output channel
ADC resolution	16 bits
Sample rate	250 kS/s
Input range	±10 V, ±5 V, ±1 V, ±0.2 V
Overvoltage protection	±30 V
Input bias current	±100 pA
Absolute Accuracy at Full Scale (± 10)	6,230 μV
Random Noise (± 10)	240 μVrms
Sensitivity (± 10)	96.0 μV

ตารางที่ ง-3 ต่อ ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า NI 9205

NI 9221	Specifications
Analog bandwidth	370 kHz min
Input impedance	
Powered on	>10 G Ω in parallel with 100 pF
Powered off/overload	4.7 k Ω min
Settling time	
± 120 ppm of full-scale step(± 8 LSB)	4 μ s
± 30 ppm of full-scale step (± 2 LSB)	8 μ s

รหัสโปรแกรม LabVIEW ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อการเชื่อมต่อและบันทึกสัญญาณจากระบบตรวจวัดอัตโนมัติที่ได้ติดตั้งขึ้น รูปที่ ง-4 แสดงหน้าต่างโปรแกรม LabVIEW ที่ถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งสามารถแสดงและเก็บบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าตามเวลาในตำแหน่งใดๆ ในชุดทดสอบระบบขับเคลื่อน



รูปที่ ง-4 หน้าต่างโปรแกรม LabVIEW ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อการเชื่อมต่อและบันทึกสัญญาณระบบตรวจวัดอัตโนมัติ

ภาคผนวก จ

แบบจำลองระบบขับเคลื่อน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนและส่วนประกอบย่อยในวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาขึ้นโดยซอฟต์แวร์ MATLAB/SIMULINK ซึ่งเพิ่มโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นได้แนบมาในซีดีรอมในโฟลเดอร์ชื่อว่า “MODEL” ซึ่งประกอบด้วยเพิ่มโปรแกรมหาดังนี้

- 1 เพิ่มค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลอง
 - scooter.m
 ใช้เก็บค่าพารามิเตอร์ของตัวรถจักรยานยนต์
 - batt_para.m
 ใช้เก็บค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่
 - supercap_para.m
 ใช้เก็บค่าพารามิเตอร์ของชุดเก็บประจุความจุสูง
- 2 เพิ่มวัฏจักรขับทดสอบ
 - ECE.m
 วัฏจักรขับทดสอบ ECE-15
 - MOftp.m
 วัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75
 - ftp75.m
 วัฏจักรขับทดสอบ FTP-75
 - NYCC.m
 วัฏจักรขับทดสอบ NYCC
- 3 เพิ่มแบบจำลอง
 - fuelcell.mdl
 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง
 - battery.mdl
 แบบจำลองแบตเตอรี่
 - supercap.mdl
 แบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง
 - hybrid_system_batt.mdl

แบบจำลองระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่

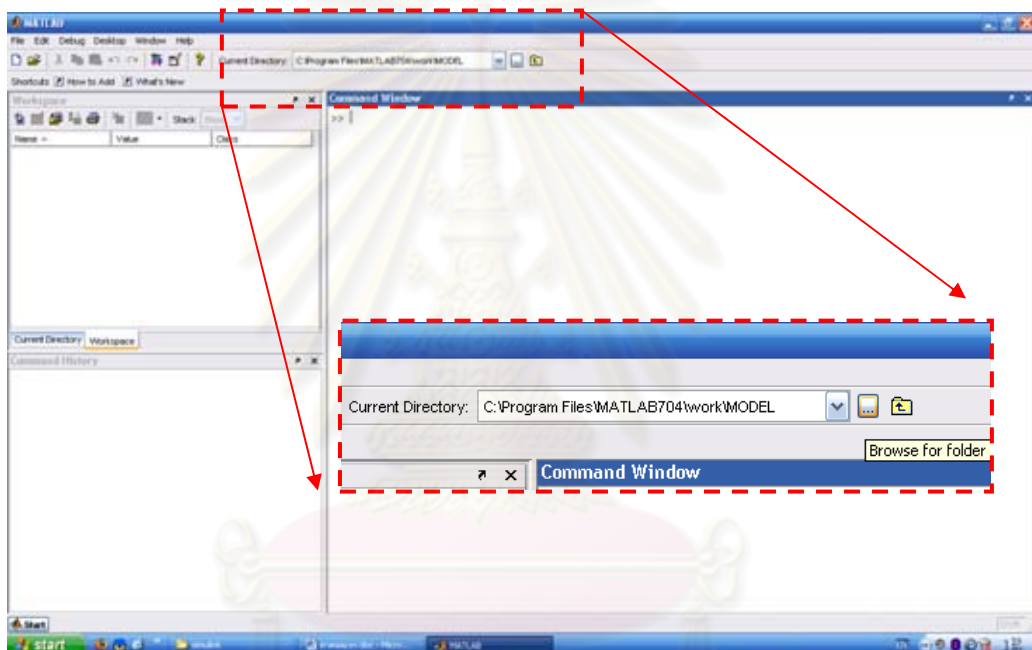
- hybrid_system_supercap.mdl
แบบจำลองระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง
- Power_sim.mdl
แบบจำลองกำลังไฟฟ้า
- Speed_sim.mdl
แบบจำลองสมรรถนะในการเร่งความเร็ว

4. เพิ่มสำหรับการเรียกใช้งานโปรแกรม

- open_battery.m
ใช้สำหรับเรียกค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ลงในหน่วยความจำ และเปิดใช้แบบจำลองแบตเตอรี่
- open_supcap.m
ใช้สำหรับเรียกค่าพารามิเตอร์ของชุดเก็บประจุความจุสูงลงในหน่วยความจำ และเปิดใช้แบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง
- open_power_sim.m
ใช้สำหรับเรียกค่าพารามิเตอร์ของรถจักรยานยนต์ลงในหน่วยความจำ และเปิดใช้แบบจำลองกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อน
- open_speed_sim.m
ใช้สำหรับเรียกค่าพารามิเตอร์ของรถจักรยานยนต์ลงในหน่วยความจำ และเปิดใช้แบบจำลองสมรรถนะในการเร่งความเร็ว
- hybrid.m
ใช้สำหรับเรียกค่าพารามิเตอร์ของส่วนประกอบทั้งหมดลงในหน่วยความจำ และเปิดใช้แบบจำลองระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดทั้งสองชนิด

๑.1 การใช้งานแบบจำลอง

เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ต้องได้รับการติดตั้งซอฟต์แวร์ MATLAB/SIMULINK ลงในเครื่องเป็นที่เรียบร้อยแล้ว และก่อนการใช้งานแบบจำลองทั้งหมดนั้นต้องคัดลอกโฟลเดอร์ “MODEL” ทั้งโฟลเดอร์ในซีดีรอม มาไว้ในโฟลเดอร์ C:\Program Files\MATLAB704\work ของเครื่องคอมพิวเตอร์ จากนั้นที่หน้าต่างหลักของโปรแกรม MATLAB ให้กำหนด Current Directory ใหม่ที่โฟลเดอร์ C:\Program Files\MATLAB704\work\MODEL ดังรูปที่ ๑-1

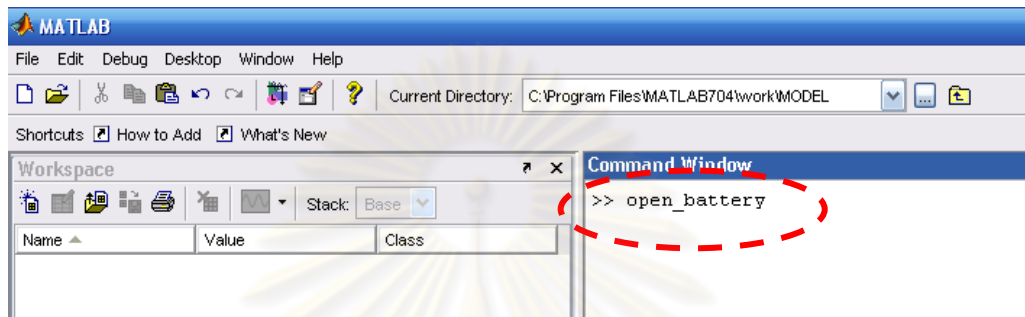


รูปที่ ๑-1 การกำหนด Current Directory

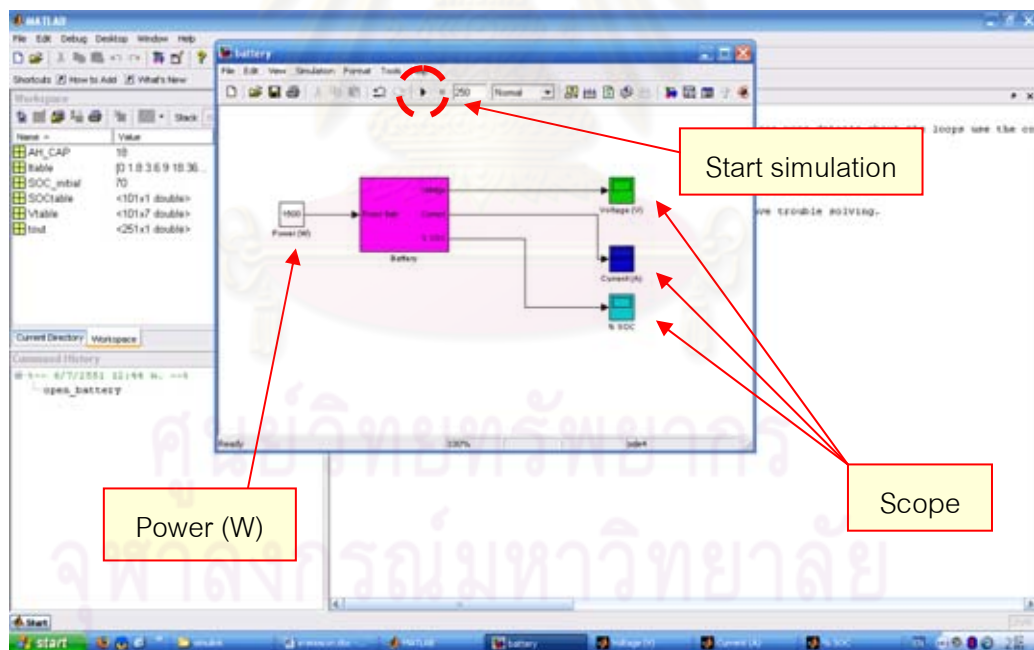
๑.1.1 การใช้งานแบบจำลองแบตเตอรี่

ในการใช้งานแบบจำลองแบตเตอรี่ ให้พิมพ์คำสั่ง open_battery ลงใน Command Window แล้วกด Enter ดังรูปที่ ๑-2 พารามิเตอร์ของแบบจำลองแบตเตอรี่จะถูกบันทึกลงในหน่วยความจำของ MATLAB พร้อมกับเปิดหน้าต่างโปรแกรมแบบจำลองแบตเตอรี่ขึ้นมาโดยอัตโนมัติดังรูปที่ ๑-3 ผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับการจำลองได้ตามต้องการซึ่งสามารถกำหนดได้ทั้งแบบคงที่และแบบเป็นวัฏจักร โดยในตัวอย่างนี้เป็นกรจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบคงที่ 1500 วัตต์ จากนั้นกดปุ่ม Start simulation เพื่อเริ่มต้นการจำลอง และเมื่อ

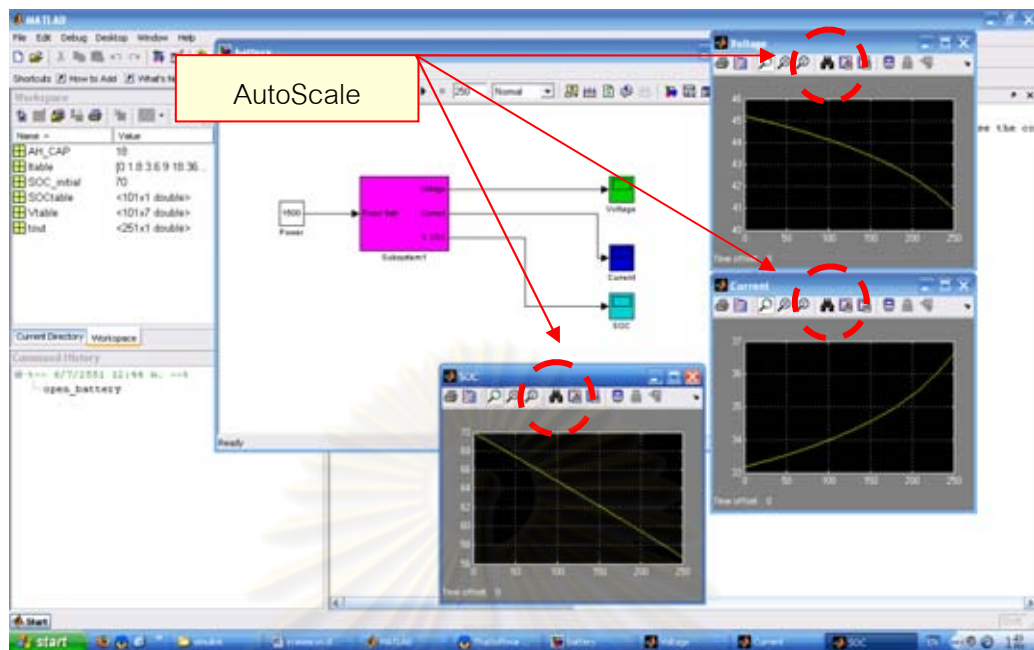
โปรแกรมได้ประมวลผลเสร็จเรียบร้อยแล้วสามารถดูผลการจำลองต่างๆ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และระดับการประจุได้โดยดับเบิลคลิกที่ Scope ดังรูปที่ ๑-3 ซึ่งจะแสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ ๑-4 (หากหน้าต่าง Scope แสดงไม่ผลการจำลองหรือแสดงผลการจำลองไม่ครอบคลุมช่วงเวลาทั้งกำหนดให้กดที่ปุ่ม Autoscale)



รูปที่ ๑-2 การพิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานแบบจำลองแบตเตอรี่



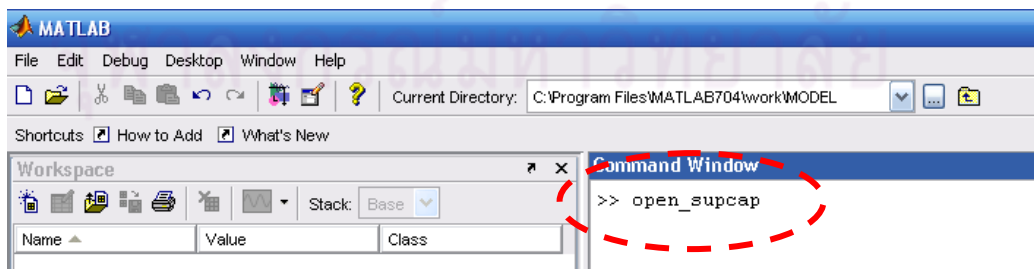
รูปที่ ๑-3 หน้าต่างแบบจำลองแบตเตอรี่



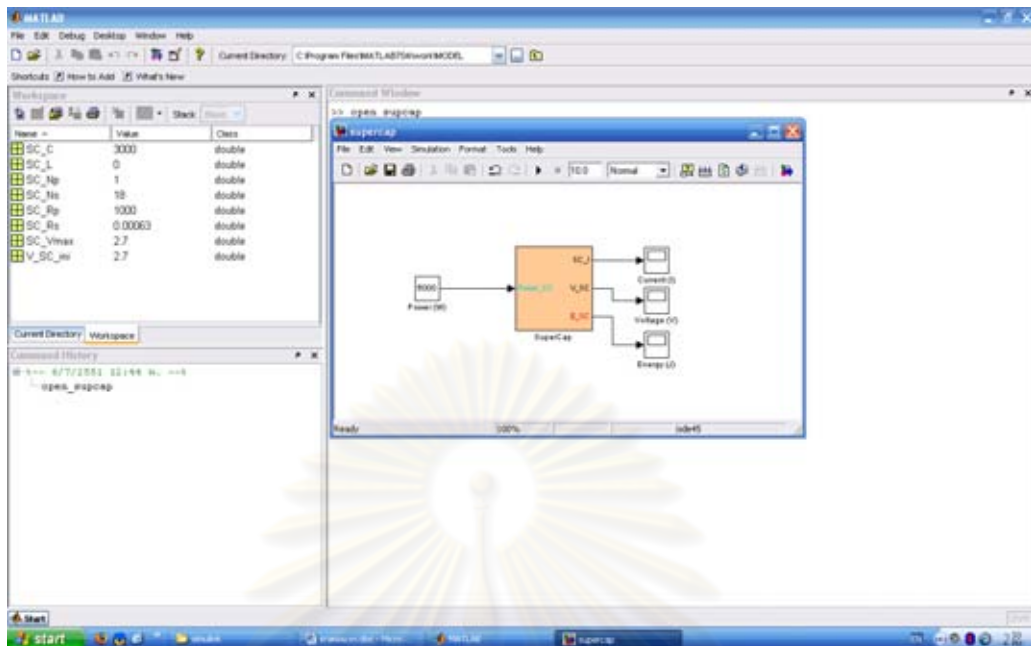
รูปที่ ๑-4 หน้าต่างแสดงผลการจำลอง

๑.1.2 การใช้งานแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง

ในการใช้งานแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง ให้พิมพ์คำสั่ง `open_supcap` ลงใน Command Window แล้วกด Enter ดังรูปที่ ๑-5 พารามิเตอร์ของแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูงจะถูกบันทึกลงในหน่วยความจำของ MATLAB พร้อมกับเปิดหน้าต่างโปรแกรมแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูงขึ้นมาโดยอัตโนมัติดังรูปที่ ๑-6 ผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับการจำลองและดูผลการจำลองได้ในลักษณะเดียวกับที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ ๑.1.1



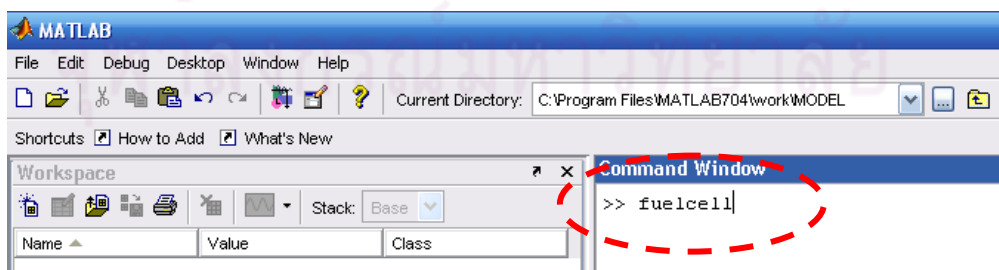
รูปที่ ๑-5 การพิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง



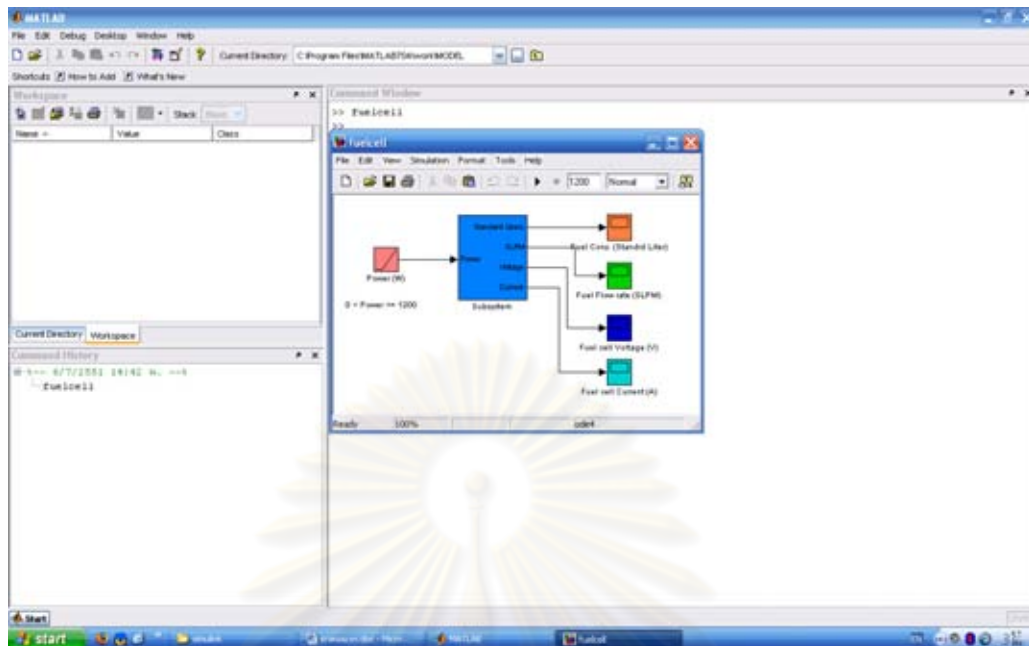
รูปที่ ๑-6 หน้าต่างแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง

๑.1.3 การใช้งานแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง

ในการใช้งานแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงให้พิมพ์คำสั่ง fuelcell ลงใน Command Window แล้วกด Enter ดังรูปที่ ๑-7 หน้าต่างโปรแกรมแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกเปิดขึ้นมาดังรูปที่ ๑-8 ผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับการจำลองและดูผลการจำลองได้ในลักษณะเดียวกับที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ ๑.1.1



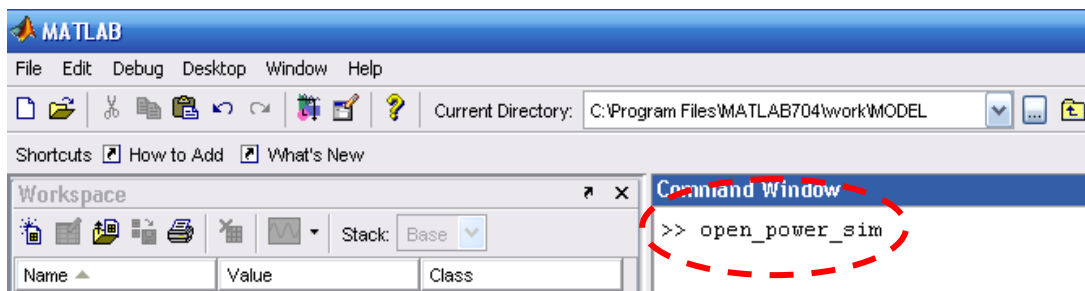
รูปที่ ๑-7 การพิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง



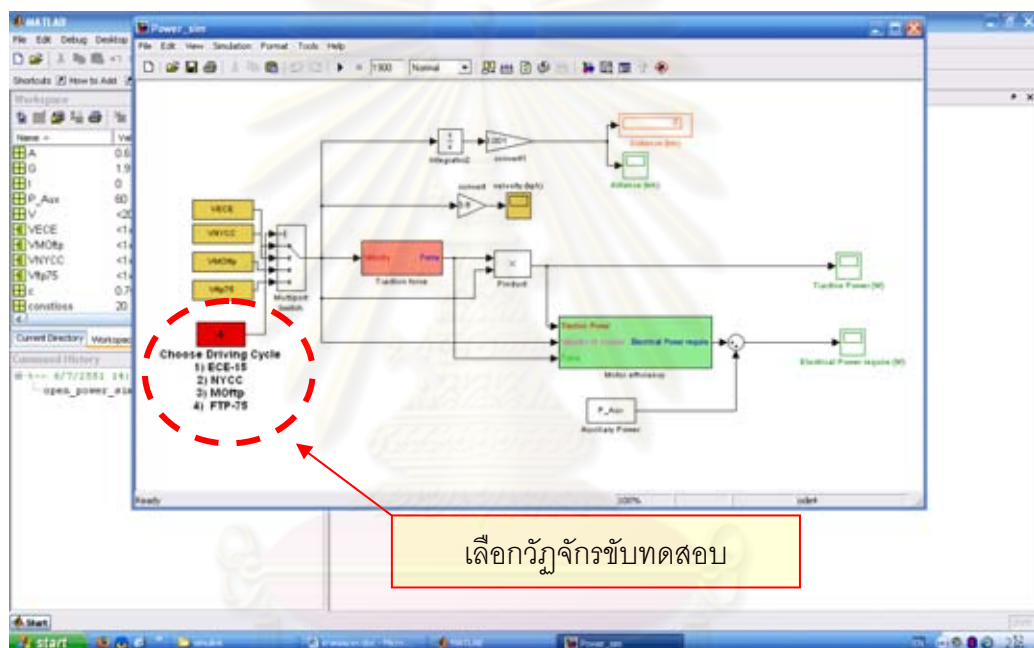
รูปที่ ๑-8 หน้าต่างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง

๑.1.4 การใช้งานแบบจำลองกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อน

การใช้งานแบบจำลองกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนให้พิมพ์คำสั่ง `open_power_sim` ลงใน Command Window แล้วกด Enter ดังรูปที่ ๑-9 พารามิเตอร์ของรถจักรยานยนต์และวัฏจักรขับทดสอบทั้งหมดจะถูกบันทึกลงในหน่วยความจำของ MATLAB พร้อมกับเปิดหน้าต่างโปรแกรมแบบจำลองกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนขึ้นมาโดยอัตโนมัติดังรูปที่ ๑-10 ผู้ใช้งานสามารถเลือกวัฏจักรขับทดสอบที่ต้องการประเมินกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อน โดยกำหนดค่าตัวเลขในกล่อง Choose Driving Cycle ตั้งแต่ 1 ถึง 4 ดังรูปที่ ๑-10 โดย 1. คือ การใช้วัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 2. คือ การใช้วัฏจักรขับทดสอบ NYCC 3. คือ การใช้วัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75 และ 4. คือ การใช้วัฏจักรขับทดสอบ FTP-75 ซึ่งสามารถดูผลการจำลองดังรูปที่ ๑-11 ได้ในลักษณะเดียวกับหัวข้อที่ ๑.1.1

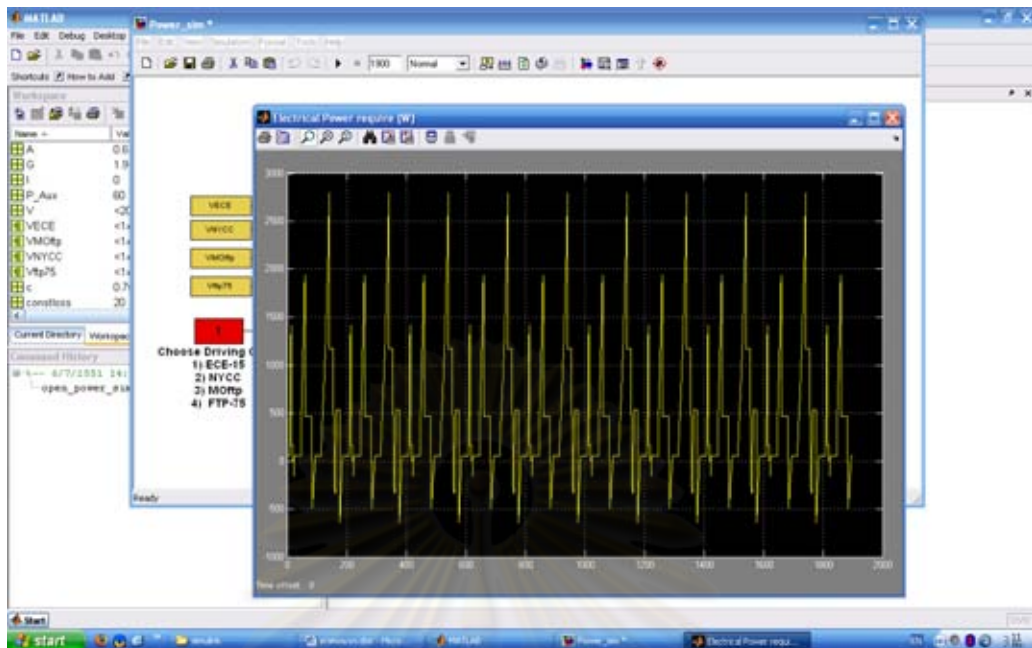


รูปที่ ๑-๙ การพิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานแบบจำลองกำลังไฟฟ้า



รูปที่ ๑-10 หน้าต่างแบบจำลองกำลังไฟฟ้า

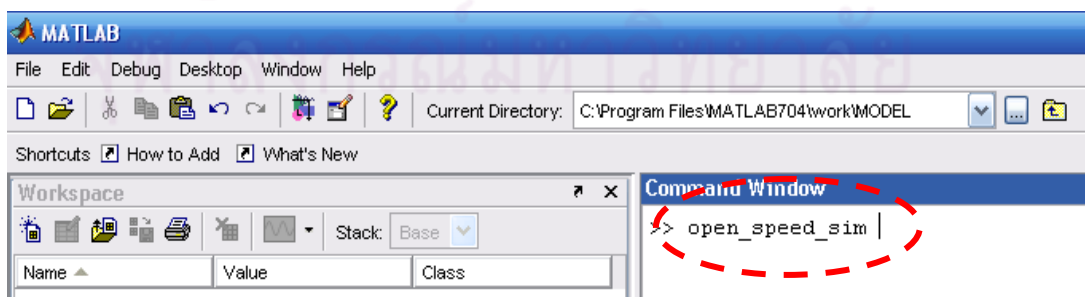
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



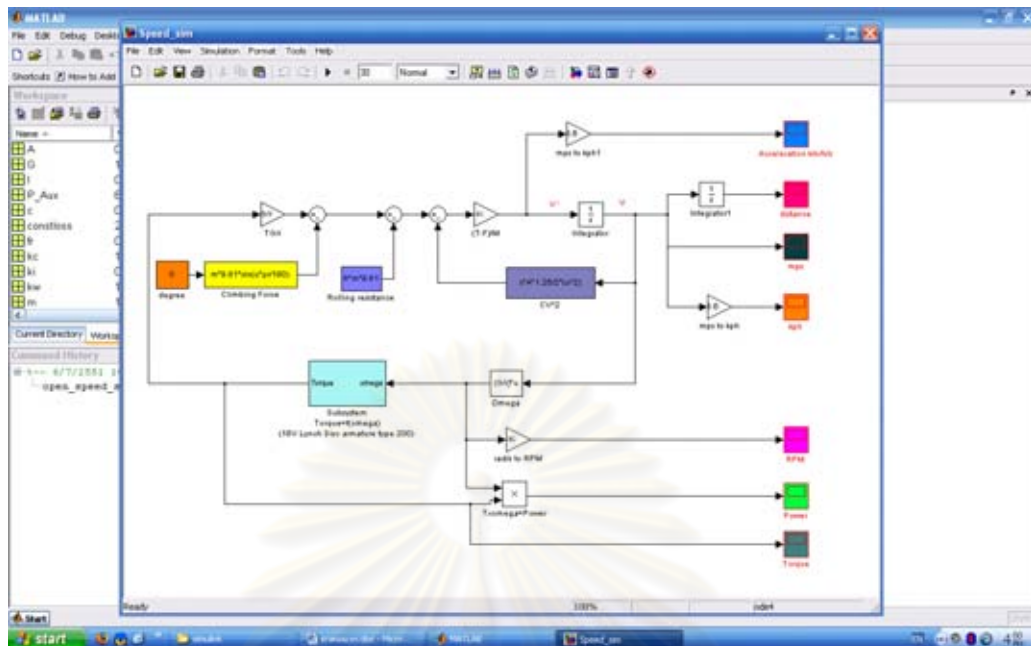
รูปที่ ๑-11 หน้าต่างแสดงผลการจำลองกำลังไฟฟ้า

๑.1.5 การใช้งานแบบจำลองสมรรถนะในการเร่งความเร็ว

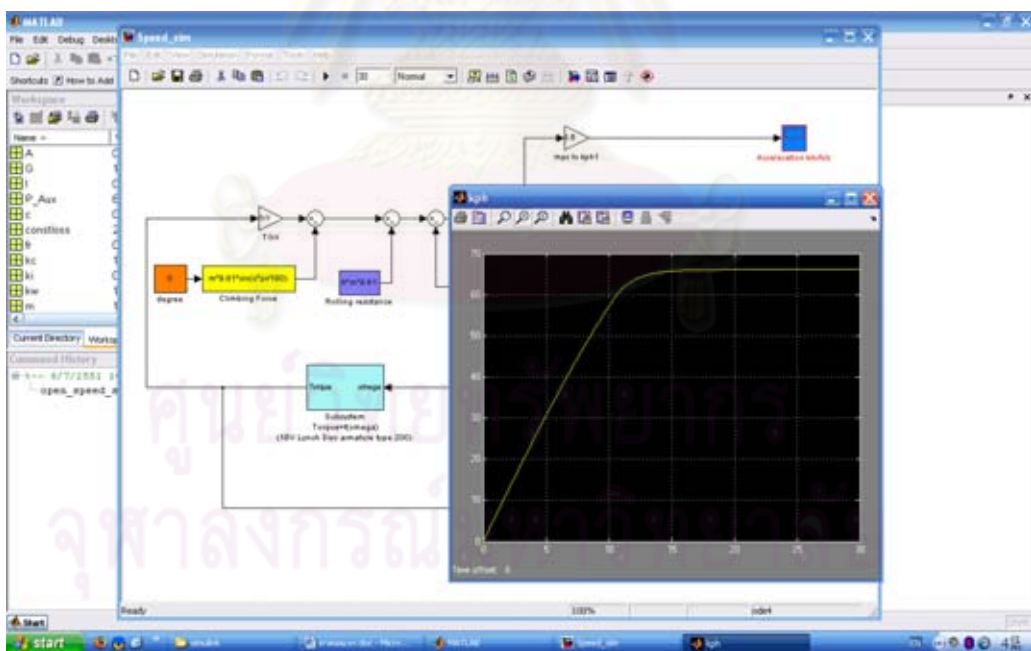
การใช้งานแบบจำลองสมรรถนะในการเร่งความเร็วให้พิมพ์คำสั่ง `open_speed_sim` ลงใน Command Window แล้วกด Enter ดังรูปที่ ๑-12 พารามิเตอร์ของรถจักรยานยนต์ทั้งหมดจะถูกบันทึกลงในหน่วยความจำของ MATLAB พร้อมกับเปิดหน้าต่างโปรแกรมแบบจำลองสมรรถนะในการเร่งความเร็วขึ้นมาโดยอัตโนมัติดังรูปที่ ๑-13 ซึ่งสามารถดูผลการจำลองดังรูปที่ ๑-14 ได้ในลักษณะเดียวกับหัวข้อที่ ๑.1.1



รูปที่ ๑-12 การพิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานแบบจำลองสมรรถนะในการเร่งความเร็ว



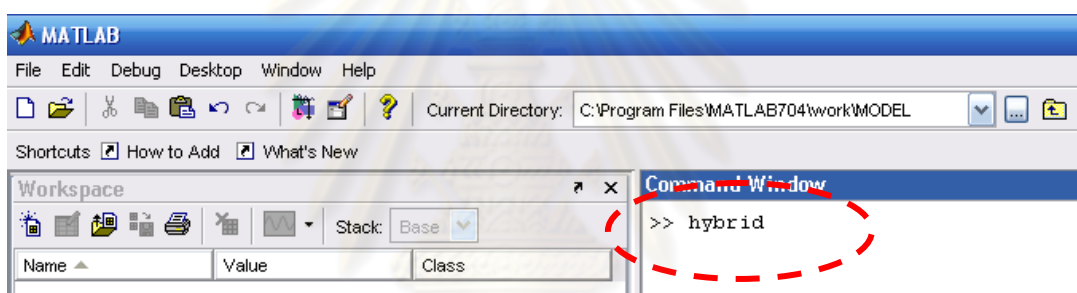
รูปที่ ๑-13 หน้าต่างแบบจำลองสมรรถนะในการเร่งความเร็ว



รูปที่ ๑-14 หน้าต่างแสดงผลการจำลองสมรรถนะในการเร่งความเร็ว

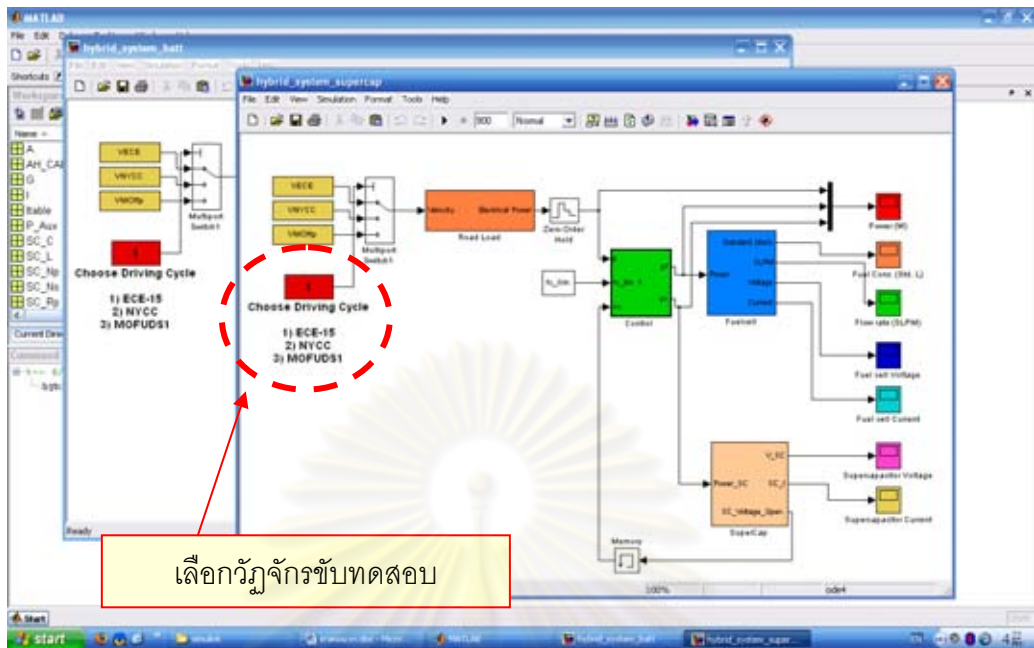
จ.1.6 การใช้งานแบบจำลองระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด

การใช้งานแบบจำลองระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดให้พิมพ์คำสั่ง hybrid ลงใน Command Window แล้วกด Enter ดังรูปที่ จ-15 พารามิเตอร์ของรถจักรยานยนต์ ส่วนประกอบย่อย และวัฏจักรขับทดสอบทั้งหมดจะถูกบันทึกลงในหน่วยความจำของ MATLAB พร้อมกับเปิดหน้าต่างโปรแกรมแบบจำลองระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดทั้งสองชนิดขึ้นมาโดยอัตโนมัติดังรูปที่ จ-16 ผู้ใช้งานสามารถเลือกวัฏจักรขับทดสอบที่ต้องการจำลอง โดยกำหนดค่าตัวเลขในกลุ่ม Choose Driving Cycle ตั้งแต่ 1 ถึง 3 ดังรูปที่ จ-10 โดย 1. คือ การใช้วัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 2. คือ การใช้วัฏจักรขับทดสอบ NYCC และ 3. คือ การใช้วัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75 ซึ่งสามารถดูผลการจำลองดังรูปที่ จ-11 ได้ในลักษณะเดียวกับที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ จ.1.1

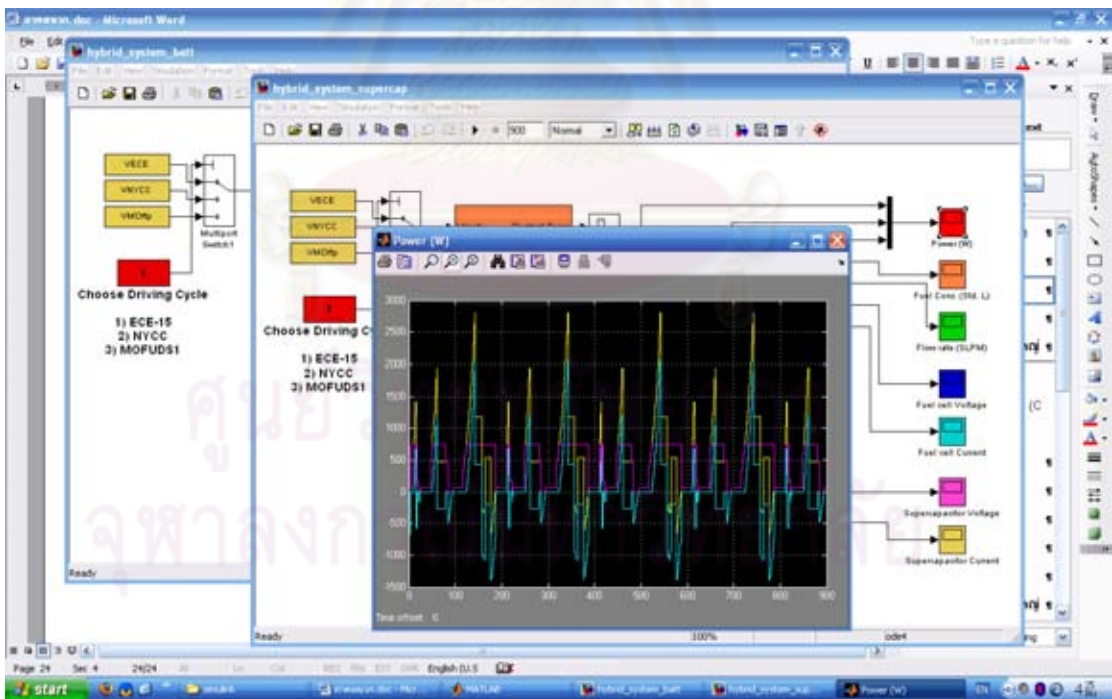


รูปที่ จ-15 การพิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานแบบจำลองระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๑-16 หน้าต่างแบบจำลองระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด



รูปที่ ๑-17 หน้าต่างแสดงผลการจำลองระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย นาถณรงค์ ลิ้มวุฒิกโรจรัฐ เกิดเมื่อวันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2526 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับสอง สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปีการศึกษา พ.ศ. 2548 และ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา พ.ศ. 2549 โดยได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมีผลงานทางวิชาการที่ได้เผยแพร่ดังนี้

1. นาถณรงค์ ลิ้มวุฒิกโรจรัฐ นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ และ ไพบุลย์ ศรีภคการ, การวิเคราะห์และออกแบบระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ขนาดเล็ก, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, พัทยา, ชลบุรี, 17-19 ตุลาคม 2550
2. นาถณรงค์ ลิ้มวุฒิกโรจรัฐ นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ และ อังคีร์ ศรีภคการ, การทดสอบประเมินระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดแบบเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูงสำหรับรถจักรยานยนต์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, 15-17 ตุลาคม 2551
3. นาถณรงค์ ลิ้มวุฒิกโรจรัฐ และ อังคีร์ ศรีภคการ, แบบจำลองเชิงประจักษ์สำหรับแหล่งจ่ายพลังงานในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์, วารสารวิจัยพลังงาน, ปีที่ 6 2552, สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย