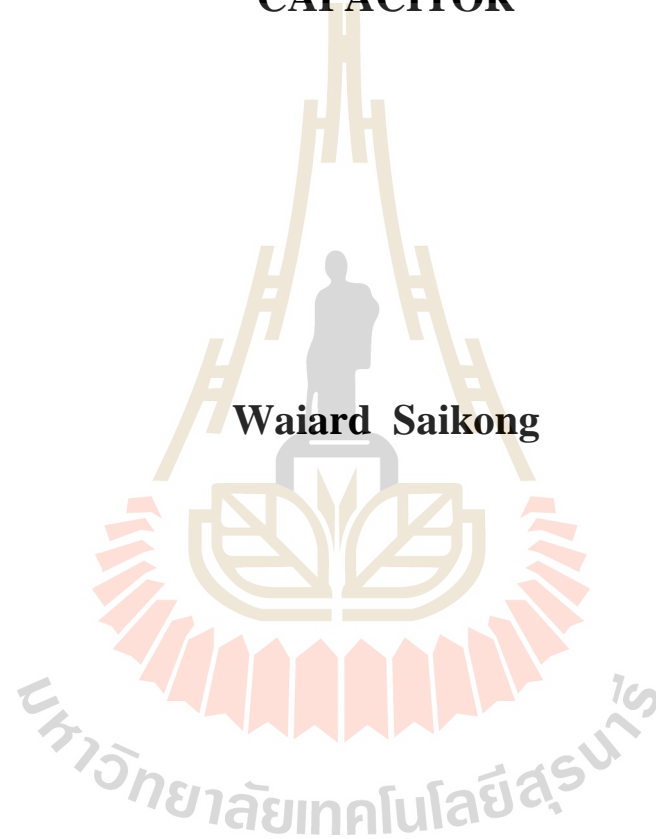


ระบบการจัดการพลังงานแบบบูรณาการสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่
และตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**INTEGRATED ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR
ELECTRIC VEHICLE WITH COMBINATION OF
BATTERY AND ELECTRIC DOUBLE LAYER
CAPACITOR**

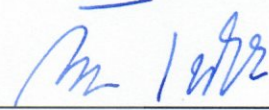


**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor Philosophy in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2018**

ระบบการจัดการพลังงานแบบบูรณาการสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่
และตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปรัชญา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.กัมปนาท เทียนน้อย)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.รณัดชัย กุลรวานิชพงษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



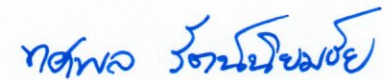
(รศ. ดร.กীরติ ชยะกุลศิริ)

กรรมการ



(อ. ดร.เอกรังค์ สุขจิต)

กรรมการ



(อ. ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วิจัย อาจ สายคง : ระบบการจัดการพลังงานแบบบูรณาการสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น (INTEGRATED ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLE WITH COMBINATION OF BATTERY AND ELECTRIC DOUBLE LAYER CAPACITOR) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัช กุลวรรณิษพงษ์, 173 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการใช้พลังงาน และกำลังในการขับเคลื่อนอย่างประหยัดโดยระบบการจัดการพลังงานแบบบูรณาการ รวมถึงการยืดระยะเวลาในการขับขี่ซึ่งถือเป็นจุดด้อยของยานยนต์ไฟฟ้าที่มีระยะการขับขี่ที่จำกัดเมื่อเทียบกับยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า และทำการปรับรูปแบบความเร็วของยานยนต์ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับเส้นทาง ภายใต้เงื่อนไขการถึงเป้าหมายช้ากว่ากำหนด ตามความต้องการของผู้ขับขี่ ซึ่งกำหนดให้เป็นล่าช้ากว่ากำหนด 30 และ 60 วินาที โดยใช้รูปแบบของความเร็วเดิมเป็นขอบเขตของความเร็วอ้างอิง โดยที่ยังต้องมีรูปแบบความเร็วที่คล้ายรูปแบบความเร็วเดิมเพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้กับสภาพการจราจรแบบเปิด (Open environment) และสภาพการจราจรแบบปิดได้ (Close environment) จากผลการทดลองการดำเนินการปรับรูปแบบความเร็วที่เหมาะสมเมื่อถึงที่หมายล่าช้าสามารถลดพลังงาน และกำลังไฟฟ้าสูงสุดในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าได้ โดยขั้นตอนวิธีการปรับรูปแบบความเร็วที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้สามารถ ลดการใช้พลังงาน กำลังไฟฟ้าสูงสุด และถึงที่หมายใกล้เคียงกับเวลาที่กำหนด ได้ดีกว่าการใช้รูปแบบความเร็วคงที่ (Cruise control) ซึ่งเป็นรูปแบบความเร็วที่นิยมใช้ในยานยนต์ปัจจุบัน ผลกระทบจากการปรับรูปแบบความเร็วส่งผลให้การคืนพลังงานกลับจากการเบรกมีค่าลดลง เป็นผลมาจากการใช้ความเร็วก่อนการเบรกที่ลดลง ส่งผลให้ระยะในการขับขี่สั้นลง จึงได้ทำการพิจารณาจำลองการติดตั้งระบบส่งกำลังแบบไร้สาย (Wireless power transfer) ที่เหมาะสมกับเส้นทางและรูปแบบความเร็วเข้าสู่ระบบ ผลจากการติดตั้งระบบส่งกำลังแบบไร้สาย ทำให้ระบบสะสมพลังงานมีสถานะประจุ (State of charge) ที่สูงขึ้นเมื่อสิ้นสุดการจำลอง แล้วดำเนินการหาขนาดของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมกับเส้นทางที่ใช้ในการขับขี่ โดยทำการเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างการหาขนาดของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมเพียงอย่างเดียว กับการหาขนาดของระบบพลังงานที่เหมาะสมโดยรวมผลของการคืนพลังงานกลับจากการเบรก การประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย และการปรับรูปแบบความเร็วที่เหมาะสม ผลจากการเปรียบเทียบพบว่า น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานที่ใช้การจัดการแบบบูรณาการจะมีน้ำหนักมากกว่าระบบที่ทำการหาขนาดของระบบสะสมพลังงานอย่างเหมาะสมในบางกรณี แต่ไม่ส่งผลให้การใช้พลังงานและกำลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ผลการจำลองโดยใช้ค่าวัดจริงจากการทดสอบ พบว่าระบบการจัดการพลังงานแบบบูรณาการ ใช้พลังงาน

ในการขับเคลื่อนลดลง 21.487 % และจ่ายพลังงานสุทธิ (Net energy) เพียง 37.435 % เมื่อเทียบกับกรณีฐาน (Base case)



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา จิรณ ราชดา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [Signature]

WAIARD SAIKONG : INTEGRATED ENERGY MANAGEMENT
SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLE WITH COMBINATION OF
BATTERY AND ELECTRIC DOUBLE LAYER CAPACITOR. THESIS
ADVISOR : ASSOC. PROF. THANATCHAI KULWORAWANICHPONG,
Ph.D., 173 PP.

INTEGRATED ENERGY MANAGEMENT SYSTEM/OPTIMAL ADJUSTMENT
OF VELOCITY TRAJECTORY/OPTIMAL ENERGY STORAGE SYSTEM

This thesis presented energy consumption and economical driving power by integrated energy management system. The study included the extension of driving range which was the weak point of electric vehicles, having limited driving range compared to vehicles with internal combustion engine. This study performed the simulation of electric vehicle driving and adjustment for optimal velocity trajectory suitable for the route under the condition of late arrival to the destination according to driver's demand to have the arrival 30 and 60 seconds late. The simulation used the original velocity trajectory as the range of reference velocity. The velocity had to have its velocity trajectory similar to the original one so that it was applicable to open environment and closed environment. The results of the simulation to adjust for optimal velocity trajectory when arriving at the destination late revealed reduction of energy and maximum electric power in driving the electric vehicle. The algorithm to adjust velocity trajectory proposed in this study was able to reduce consumption of energy and maximum electric power and the vehicle arrived at the destination close to the determined time, better than Cruise Control which was the popular velocity trajectory in vehicles nowadays. The effect of the adjustment of velocity trajectory

was reduction of energy regeneration gained from brake, resulted from reduction of velocity before brake. This had an effect that the driving range was shortened. The researcher then simulated installation of wireless power transfer system that was appropriate with the route and velocity trajectory to the system. The results of the installation of wireless power transfer system were that the energy storage system had higher stage of charge at the end of the simulation. The researcher then investigated for the optimal size of the energy storage system that was appropriate for the driving route by comparing the results of the simulation between the investigation for only optimal size of energy storage system and the investigation of optimal energy system by including the result of energy regeneration gained from brake, wireless charging and the optimal adjustment of velocity trajectory. The results of the comparison revealed that the weight of the energy storage system used on the integrated management was heavier than the system to investigate the size of the optimal energy storage system in some cases. It, however, did not result in significant increase of energy and power consumption. The results of the simulation using authentic value from the field test found that the integrated energy management system reduced the driving energy at 21.487% and distributed net energy only at 37.435% when compared to base case.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature Teon Fiam

Advisor's Signature [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัช กุลรวรานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย ให้โอกาสให้เข้าร่วมทำโครงการวิจัยหลายโครงการที่เป็นต่อตัวผู้วิจัยเอง รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนทุน OROG สำหรับการศึกษาในระดับปริญญาเอก

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่เป็นกัลยาณมิตร ร่วมทุกข์ ร่วมสุข ในการทำงานวิจัยอย่างทุ่มเท และเสียสละ เป็นทีมวิจัยที่แข็งแกร่ง ซึ่งผู้วิจัยเชื่อมั่นเป็นอย่างยิ่งว่าความมุ่งมั่นของทุกท่านจะส่งผลดีกับมวลมนุษยชาติ และตัวท่านเอง

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งนางสาวพิมพ์พิกา พุ่มชุมพล ภรรยา และ เด็กหญิงปราณ สายคง เด็กผู้เกิดมาเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อและท้อแท้ใจ ช่วยให้มีพลัง เข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรคอย่างไม่ย่อท้อ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

วัยอาจ สายคง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	7
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	7
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	7
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	8
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ.....	10
2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.2.1 ยานยนต์ไฟฟ้าและระบบสะสมพลังงาน	10
2.2.2 ระบบประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า.....	16
2.2.3 รูปแบบความเร็วของยานยนต์ไฟฟ้า.....	28
2.3 สรุป	31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
3.1	บทนำ.....	32
3.2	หลักการของการขับเคลื่อนและการเบรก.....	32
3.2.1	พลศาสตร์ของยานยนต์.....	32
3.2.2	กำลังลากจูงและความเร็วของยานยนต์.....	35
3.2.3	สมรรถนะและแรงขับเคลื่อน.....	37
3.3	ยานยนต์ไฟฟ้าและส่วนประกอบ.....	39
3.3.1	ส่วนประกอบของยานยนต์ไฟฟ้า.....	40
3.3.2	การใช้พลังงาน.....	43
3.3.3	การหาพิกัดของมอเตอร์ขับเคลื่อน.....	44
3.4	กำลังและพลังงานของระบบสะสมพลังงาน.....	48
3.4.1	แบตเตอรี่.....	48
3.4.2	เทคโนโลยีแบตเตอรี่.....	52
3.4.3	ตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	55
3.4.4	การควบคุมการทำงานของระบบสะสมพลังงาน.....	59
3.5	พลังงานคืนกลับจากการเบรก.....	61
3.6	สรุป.....	63
4	การจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้าและการจัดการพลังงาน	
4.1	บทนำ.....	64
4.2	การจำลองการเคลื่อนที่และการยืนยันผล.....	64
4.2.1	การจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า.....	64
4.2.2	การยืนยันผลการจำลอง.....	66
4.3	การจัดการพลังงานและการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม.....	72
4.3.1	ระเบียบวิธีแบบกลุ่มอนุภาค.....	72
4.3.2	วิธีการทดสอบและเส้นทางที่ใช้ในการทดสอบ.....	75
4.3.3	การปรับปรุงรูปแบบความเร็วเพื่อการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม.....	76

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.4	เงื่อนไขและการจำลองระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริด	82
4.3.5	การส่งกำลังแบบไร้สาย.....	84
4.4	สรุป	85
5	ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้าและการจัดการพลังงาน	
5.1	บทนำ.....	86
5.2	ผลการจำลองของการปรับปรุงรูปแบบการใช้ความเร็ว	90
5.3	ผลการจำลองการใช้พลังงานบนเส้นทางอ้างอิงที่ 1	91
5.4	ผลการจำลองการใช้พลังงานบนเส้นทางอ้างอิงที่ 2	99
5.5	ผลการจำลองการใช้พลังงานบนเส้นทางอ้างอิงที่ 3	107
5.6	สรุป	116
6	สรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1	สรุปผลการดำเนินงาน	117
6.2	ข้อเสนอแนะ	118
	รายการอ้างอิง	119
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. การทดสอบการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า และเครื่องยนต์ สันดาปภายใน.....	125
	ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	140
	ประวัติผู้เขียน	173

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	สมบัติของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด 3
2.1	ขนาดของแบตเตอรี่และชนิดของการประจุไฟฟ้า..... 18
2.2	ตัวอย่างองค์การที่กำลังวิจัยเกี่ยวกับการส่งกำลังแบบไร้สาย 27
3.1	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจากการหมุน 33
3.2	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายทางอากาศ 35
3.3	อุณหภูมิขดลวดไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60085 45
3.4	ค่าพลังงานจำเพาะของแหล่งพลังงานหลายชนิด 52
3.5	ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของแบตเตอรี่ 54
3.6	ข้อมูลทางเทคนิคของตัวเก็บประจุยิ่งยวดของบริษัท Maxwell Technologies..... 57
4.1	ค่าพารามิเตอร์ของยานยนต์ที่ใช้ในการจำลองเพื่อยืนยันผลการจำลอง 67
4.2	ข้อมูลของเส้นทางที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลการจำลอง..... 67
4.3	เปรียบเทียบค่าพลังงานของการขับเคลื่อน 69
4.4	ตารางเปรียบเทียบว่าวัดการใช้พลังงานและผลการคำนวณ 71
5.1	ข้อมูลของเส้นทางที่ใช้ทดสอบระบบการจัดการพลังงาน 87
5.2	ค่าพารามิเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลอง 88
5.3	ผลการจำลองเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีการรูปแบบความเร็วที่เหมาะสม 91
5.4	ค่าความเร่งของวัฏจักรย่อยของเส้นทางอ้างอิงที่ 1..... 92
5.5	ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 92
5.6	ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 เมื่อถึงที่หมายล่าช้า 30 วินาที..... 93
5.7	ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 เมื่อถึงที่หมายล่าช้า 60 วินาที..... 93
5.8	ค่าความเร่งของวัฏจักรย่อยของเส้นทางอ้างอิงที่ 2..... 99
5.9	ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 2..... 100
5.10	ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 เมื่อถึงที่หมายล่าช้า 30 วินาที..... 100
5.11	ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 เมื่อถึงที่หมายล่าช้า 60 วินาที..... 100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.12 ค่าความเร่งของวัฏจักรย่อยของเส้นทางอ้างอิงที่ 3.....	108
5.13 ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 3.....	110
5.14 ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 3 เมื่อถึงที่หมายล่าช้า 30 วินาที.....	110
5.15 ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 3 เมื่อถึงที่หมายล่าช้า 60 วินาที.....	111
ก.1 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไฟฟ้าในรูปแบบการเดินรถในเขตเมือง.....	128
ก.2 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษในรูปแบบการเดินรถในเขตนอกเมือง.....	133
ก.3 ผลการทดสอบการใช้น้ำมันของรถปีบทอง วันที่ 5 มิถุนายน 2560.....	136
ก.4 ผลการเปรียบเทียบอัตราสิ้นเปลือง.....	149



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แหล่งพลังงานที่สามารถนำมาใช้กับยานยนต์.....2
1.2	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา ความเร็ว การใช้กำลังไฟฟ้า และการใช้พลังงาน ของยานยนต์ไฟฟ้า.....2
1.3	เปรียบเทียบแบตเตอรี่กับอุปกรณ์สะสมพลังงานอื่น4
1.4	ภาพรวมของการทำการวิจัย.....6
2.1	รถสามล้อที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าครั้งแรกของโลก.....11
2.2	รถโดยสารไฟฟ้าไร้มลพิษ (PEA Ze-bus).....14
2.3	ระดับการการประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า.....18
2.4	แผนภาพเปรียบเทียบการประจุนระดับที่ 2 ไฟฟ้ากระแสสลับและระบบประจุแบบรวดเร็ว19
2.5	เปรียบเทียบระบบประจุไฟฟ้าที่ติดตั้งบนยานพาหนะและระบบประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย20
2.6	การแบ่งประเภทการประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย.....21
2.7	แผนภาพการทำงานของระบบเรโซแนนซ์เหนี่ยวนำ.....25
2.8	การประจุไฟฟ้าแบบไร้สายในขณะที่ยานยนต์เคลื่อนที่.....26
3.1	แผนภาพวัตถุดิบของแบบจำลอง.....34
3.2	ระบบกำลังขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้า.....35
3.3	แรงลากจูงของมอเตอร์ขับเคลื่อน ความเร็ว และแรงต้านการเคลื่อนที่.....38
3.4	ส่วนประกอบของยานยนต์ไฟฟ้า.....41
3.5	ส่วนประกอบ โดยทั่วไปของยานยนต์ไฟฟ้า.....42
3.6	ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดที่ใช้เลือกพิกัดของมอเตอร์.....48
3.7	หลักการงานเบื้องต้นตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....56
3.8	หลักการงานของ HESS.....61
3.9	จุดทำงาน และเงื่อนไขการจ่ายพลังงานกลับจากการเบรก.....62
3.10	กำลังงานจากการเบรกสูงสุดแบ่งตามย่านความเร็วสำหรับเส้นทาง UNECE Reg. 10163
4.1	แผนภาพขั้นตอนการจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า.....65
4.2	รูปแบบความเร็วและเวลาของเส้นทาง LA92.....68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	รูปแบบความเร็วและเวลาของเส้นทาง US0668
4.4	รูปแบบความเร็วและเวลาของเส้นทาง ECE15.....69
4.5	เปรียบเทียบข้อมูลการใช้พลังงานและผลการจำลองของเส้นทาง SUT091116.....70
4.6	เปรียบเทียบข้อมูลการใช้พลังงานและผลการจำลองของเส้นทาง SUT111116.....70
4.7	เปรียบเทียบข้อมูลการใช้พลังงานและผลการจำลองของเส้นทาง SUT181116r1.....71
4.8	การปรับปรุงทิศทางของอนุภาค73
4.9	แผนภาพการทดสอบ76
4.10	แผนภาพแรงที่กระทำต่อยานยนต์ไฟฟ้าบนพื้นเอียง77
4.11	รูปแบบความเร็วของเส้นทาง UNECE R.101.....79
4.12	วัฏจักรรูปแบบความเร็วของยานยนต์.....80
4.13	ขั้นตอนวิธีการการสร้างรูปแบบความเร็วใหม่.....82
5.1	การแบ่งวัฏจักรย่อยของเส้นทาง UNECE R.10189
5.2	การแบ่งวัฏจักรย่อยของเส้นทาง NYCC89
5.3	การแบ่งวัฏจักรย่อยของเส้นทาง SUT091116.....90
5.4	เปรียบเทียบรูปแบบความเร็วของขั้นตอนวิธีที่ผู้วิจัยนำเสนอกับรูปแบบความเร็วคงที่90
5.5	รูปแบบการใช้ความเร็วของเส้นทางอ้างอิงที่ 194
5.6	การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 194
5.7	การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 เมื่อถึงที่หมายช้า 30 วินาที94
5.8	การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 เมื่อถึงที่หมายช้า 60 วินาที95
5.9	น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 1.....96
5.10	น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 เมื่อถึงที่หมายช้า 30 วินาที.....96
5.11	น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 เมื่อถึงที่หมายช้า 60 วินาที.....96
5.12	เปรียบเทียบการใช้พลังงาน และพลังงานสุทธิของเส้นทางอ้างอิงที่ 1.....97
5.13	การเปลี่ยนแปลงสถานะประจุของเส้นทางอ้างอิงที่ 1.....97
5.14	การใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเส้นทางอ้างอิงที่ 198
5.15	รูปแบบการใช้ความเร็วของเส้นทางอ้างอิงที่ 2.....101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.16 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 2	102
5.17 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 เมื่อถึงที่หมายช้า 30 วินาที	102
5.18 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 เมื่อถึงที่หมายช้า 60 วินาที	103
5.19 น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 2.....	104
5.20 น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 เมื่อถึงที่หมายช้า 30 วินาที.....	104
5.21 น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 เมื่อถึงที่หมายช้า 60 วินาที.....	105
5.22 เปรียบเทียบการใช้พลังงาน และพลังงานสุทธิของเส้นทางอ้างอิงที่ 2.....	105
5.23 การเปลี่ยนแปลงสถานะประจุของเส้นทางอ้างอิงที่ 2.....	106
5.24 การใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเส้นทางอ้างอิงที่ 2.....	107
5.25 เส้นทาง SUT091116 รอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	108
5.26 รูปแบบการใช้ความเร็วของเส้นทางอ้างอิงที่ 3	111
5.27 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 3	112
5.28 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 3 เมื่อถึงที่หมายช้า 30 วินาที	112
5.29 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 3 เมื่อถึงที่หมายช้า 60 วินาที	112
5.30 น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 3.....	113
5.31 น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 3 เมื่อถึงที่หมายช้า 30 วินาที.....	114
5.32 น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 3 เมื่อถึงที่หมายช้า 60 วินาที.....	114
5.33 เปรียบเทียบการใช้พลังงาน และพลังงานสุทธิของเส้นทางอ้างอิงที่ 3.....	115
5.34 การเปลี่ยนแปลงสถานะประจุของเส้นทางอ้างอิงที่ 3.....	115
5.35 การใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเส้นทางอ้างอิงที่ 3	116
ก.1 เส้นทางวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	126
ก.2 บรรยากาศการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	127
ก.3 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วันที่ 9-11/11/2559	128
ก.4 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วันที่ 14-15/11/2559	129

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.5 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วันที่ 15-16/11/2559	129
ก.6 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วันที่ 16-17/11/2559	130
ก.7 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วันที่ 18/11/2559.....	130
ก.8 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วันที่ 18-21/11/2559	131
ก.9 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วันที่ 6/12/2559.....	131
ก.10 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วันที่ 7-8/12/2559	132
ก.11 เส้นทางวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษในรูปแบบการเดินรถในเขตนอกเมือง.....	133
ก.12 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษในรูปแบบการเดินรถในเขตนอกเมือง แบบไม่มีผู้โดยสารวันที่ 03/02/2560	134
ก.13 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษในรูปแบบการเดินรถในเขตนอกเมือง แบบมีผู้โดยสารวันที่ 03/02/2560	134
ก.14 รถปีบทองของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	135
ก.15 ผลการเก็บข้อมูลความเร็วและความสูงของการเดินรถเชื้อเพลิงเส้นทางนอกเมือง แบบมีผู้โดยสาร	136
ก.16 ผลการเก็บข้อมูลความเร็วและความสูงของการเดินรถเชื้อเพลิงเส้นทางนอกเมือง แบบมีผู้โดยสาร (จากลับ).....	137
ก.17 ผลการเก็บข้อมูลความเร็วและความสูงของการเดินรถเชื้อเพลิงเส้นทางนอกเมือง แบบไม่มีผู้โดยสาร (ขาไป).....	137
ก.18 ผลการเก็บข้อมูลความเร็วและความสูงของการเดินรถเชื้อเพลิงเส้นทางนอกเมือง แบบไม่มีผู้โดยสาร (จากลับ).....	138

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.19 ผลการเก็บข้อมูลความเร็วและความสูงของการเดินรถเชื้อเพลิงเส้นทางในเมือง แบบมีผู้โดยสาร	138
ก.20 ผลการเก็บข้อมูลความเร็วและความสูงของการเดินรถเชื้อเพลิงเส้นทางในเมือง แบบไม่มีผู้โดยสาร	139



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

USEPA	=	The United States Environmental Protection Agency
IEMSAA	=	Integrated Energy Management System using Adaptive Algorithm
Eload	=	การใช้พลังงาน
Enet	=	พลังงานสุทธิ
Ppeak	=	กำลังงานสูงสุด
DC Bus	=	Direct Current Bus
SUV	=	Sport Utility Vehicles
PEA	=	Provincial Electricity Authority
HESS	=	Hybrid Energy Storage Systems
AC	=	Alternating Current
PHEV	=	Plug-in Hybrid Electric Vehicles
WPT	=	Wireless Power Transfer
IPT	=	Inductive Power Transfer
CMR	=	Coupled Magnetic Resonance
PMC	=	Permanent Magnet Coupled Transfer
SWC	=	Static Wireless Charging
DWC	=	Dynamic Wireless Charging
QWC	=	Quasi Dynamic Wireless Charging
SOC	=	State of Charge
GPS	=	Global Positioning System
M_v	=	มวลของยานยนต์
v	=	ความเร็วเชิงเส้นในการเคลื่อนที่ของยานยนต์
α	=	มุมไต่ทางชัน
F_{te}	=	แรงขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้า
F_{rr}	=	แรงต้านการเคลื่อนที่จากการหมุนของล้อ
F_{ad}	=	แรงต้านจากอากาศ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

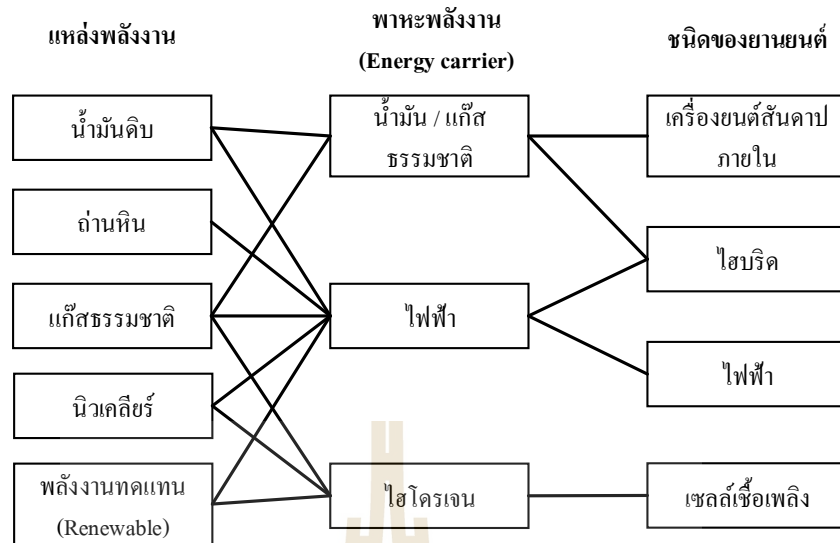
F_{rg}	=	แรงต้านจากการไต่ทางชัน
F_{acc}	=	แรงต้านจากความเฉื่อย
η_{motor}	=	ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์
η_{conv}	=	ค่าประสิทธิภาพอุปกรณ์แปลงผันพลังงานไฟฟ้า
η_{mech}	=	ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทางกล
EVPT	=	Electric Vehicle Power Train
CAN	=	Controller Area Network
BMS	=	Battery Management System
NYCC	=	The New York City Cycle
UESS	=	Ultracapacitor Energy Storage System
DOD	=	Depth of Discharge
SPE	=	Thin Solid Polymer Electrolyte
UNECE Reg. 101	=	Regulation No. 101 of the Economic Commission for Europe of the United Nations
P_e	=	กำลังทางไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อน
EVSED	=	Electric Vehicle Simulation for Energy Management and Design

บทที่ 1

บทนำ

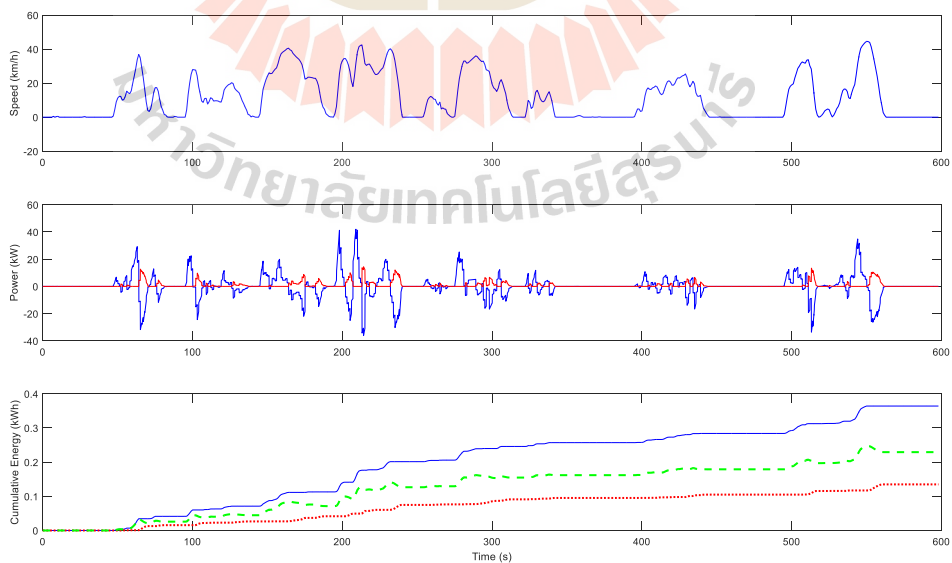
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิลยังคงเป็นเชื้อเพลิงหลักในระบบขนส่ง ในการเคลื่อนย้ายสินค้าและผู้โดยสารอย่างอิสระเพื่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม โดยภาพรวมทั่วโลกบริโภคน้ำมันประมาณ 85 ล้านบาร์เรลต่อวัน และ 60 เพอร์เซ็นต์ ใช้ในการขนส่ง ทั่วโลกมีรถยนต์ส่วนบุคคลประมาณ 800 ล้านคัน (Mi Chris, et.al, 2011) และกำลังเพิ่มขึ้น ในปี พ.ศ. 2552 ประเทศจีนเป็นผู้ผลิตและเป็นตลาดรถยนต์ที่ใหญ่ที่สุดในโลก แซงหน้าประเทศสหรัฐอเมริกา โดยสามารถผลิตรถยนต์ได้ 13.79 ล้านคันในปีดังกล่าว และยังมีแนวโน้มของการผลิตและความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในทุกปี จากข้อมูลดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่าภาคขนส่งจะมีความต้องการบริโภคน้ำมันซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดเพิ่มขึ้น ไปด้วย และจะมีการปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้น้ำมัน ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ และมลพิษทางอากาศในเขตเมืองการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide: CO₂) ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก ของภาคขนส่งซึ่งให้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก คิดเป็น 36 % ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลทั้งหมดในสหรัฐอเมริกา ในปี พ.ศ. 2559 เมื่อแยกตามประเภทของยานยนต์ พบว่าประเภทที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดเรียงลำดับนี้ รถยนต์ส่วนบุคคล 40 % รถบรรทุกขนาดหนัก และขนาดกลาง 23.4 % รถบรรทุกขนาดเบา (Light-duty trucks, which include sport utility vehicles, pickup trucks and mini-vans) 17.3% และอื่น ๆ (U.S. Environmental protection agency (USEPA), 2016). จะเห็นได้ว่าการใช้พลังงานจากฟอสซิลในภาคขนส่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงควรเลือกใช้พลังงานจากแหล่งอื่น หรือพลังงานที่มาจากหลายแหล่งเพื่อการใช้พลังงานอย่างยั่งยืน และจะต้องมีการปล่อยมลพิษที่น้อยที่สุดสำหรับภาคขนส่ง โดยรูปที่ 1.1 แสดงทางเลือกของแหล่งพลังงานที่สามารถนำมาใช้กับยานยนต์ในปัจจุบัน จากรูปที่ 1.1 พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้ามีความยืดหยุ่นที่สุดเพราะสามารถใช้แหล่งพลังงานได้จากหลายแหล่ง และไม่มีมลพิษทางอากาศ แต่เนื่องจากขนาดและน้ำหนักของแบตเตอรี่ที่ใช้เก็บสะสมพลังงานสำหรับยานยนต์ไฟฟ้านั้นมีขนาดใหญ่และหนัก รวมถึงพิດในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ลากจูงมีค่าที่จำกัด การที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ได้สูงเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนจึงมีความจำเป็น โดยเฉพาะในช่วงที่เริ่มออกตัวเพื่อเอาชนะแรงเฉื่อย หรือขณะที่ต้องการเร่งความเร็ว หรือขึ้นทางชัน



รูปที่ 1.1 แหล่งพลังงานที่สามารถนำมาใช้กับยานยนต์

รูปที่ 1.2 โหลดของการขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้ามีการใช้กำลังไฟฟ้าที่สูงเป็นบางช่วงเวลา (Intermittent load) ดังนั้นการจ่ายโหลดดังกล่าว ยานยนต์ไฟฟ้าต้องถูกออกแบบให้แบตเตอรี่มีขนาดใหญ่ หรือมีความจุไฟฟ้ามาก เพื่อรองรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สูงในช่วงเวลาดังกล่าว



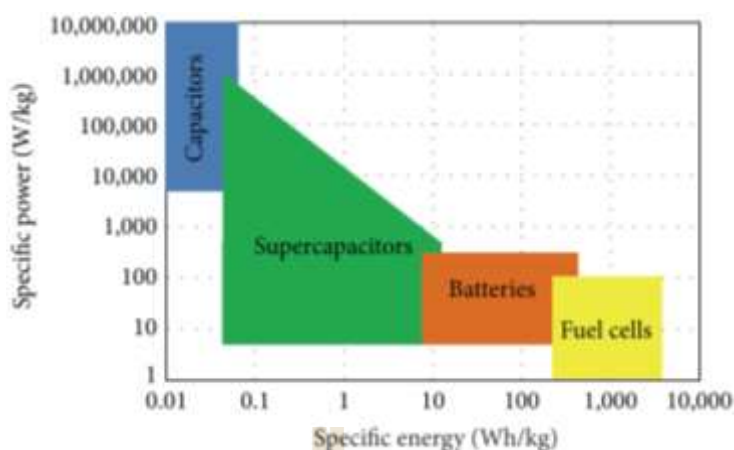
รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา ความเร็ว การใช้กำลังไฟฟ้า และการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า

เป็นที่ทราบกันดีว่าแหล่งจ่ายพลังงานคือหัวใจสำคัญของยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งแบตเตอรี่ก็ยังคงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลักของยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์สะสมพลังงานอื่น ดังแสดงในรูปที่ 1. 3 (Saleem Muhammad , et.al., 2010) และการเปรียบเทียบสมบัติของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุสองชั้นในตารางที่ 1.1 โดยทั่วไป แบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน จะมีค่าพลังงานจำเพาะ (Specific energy) 85 Wh/kg และค่ากำลังงานจำเพาะ

(Specific power) 1350 W/kg สำหรับการออกแบบ โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ในกรณีต้องการกำลังไฟฟ้าสูง และมีค่า 150 Wh/kg และ 420 W/kg เมื่อต้องการแบตเตอรี่ที่ต้องการใช้พลังงานเป็นเวลานาน แต่ต้องการกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก (Ehsani, M., Gao, Y., & Emadi, A. , 2010) สำหรับแบตเตอรี่ของรถไฟฟ้า Tesla โมเดล เอส (Tesla Model S) มีค่าพลังงานจำเพาะ 140 Wh/kg แต่ก็ถือว่ามีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพลังงานจำเพาะทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีค่า 12,800 Wh/kg เห็นได้ชัดเจนว่าการใช้พลังงานในยานยนต์ไฟฟ้ามีข้อจำกัด เมื่อเทียบกับยานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายใน (S. Rohkämper, M. Hellwig and W. Ritschel ,2017) ถึงแม้ว่าแบตเตอรี่จะมีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีมากขึ้น แต่ก็มีมีความหนาแน่นของกำลังงานที่ไม่เพียงพอที่จะจ่ายให้กับการกรรม หรือ โหลดที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงแบบฉับพลันได้ และไม่สามารถประจุไฟฟ้าหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงฉับพลันได้เหมือนกับตัวเก็บประจุสองชั้น (Ultracapacitor หรือ Supercapacitor) นอกจากนี้ยังมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าโดยเฉพาะเมื่อใช้งานที่มีการประจุและจ่ายการกรรมที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูง โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า หรือกำลังไฟฟ้าที่สูงเกินกว่าความสามารถของแบตเตอรี่ จะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาด้านความปลอดภัยตามมา ดังนั้นแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน จึงต้องมีขนาดใหญ่เกินความจำเป็นเนื่องจากจะต้องจ่ายการกรรมที่มีกำลังไฟฟ้าสูง

ตารางที่ 1.1 สมบัติของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุสองชั้น

สมบัติ	ตัวเก็บประจุสองชั้น	แบตเตอรี่
เวลาประจุ และคายประจุ	มิลลิวินาที ถึงระดับหลายวินาที	1 ถึง 10 ชั่วโมง
ความหนาแน่นของพลังงาน	5-10 Wh/kg	600 Wh/kg
กระแสในการจ่ายการกรรม	ประมาณ 100-600 A	ประมาณ 5-25 A
อายุการใช้งาน	10 ปี	3 ปี

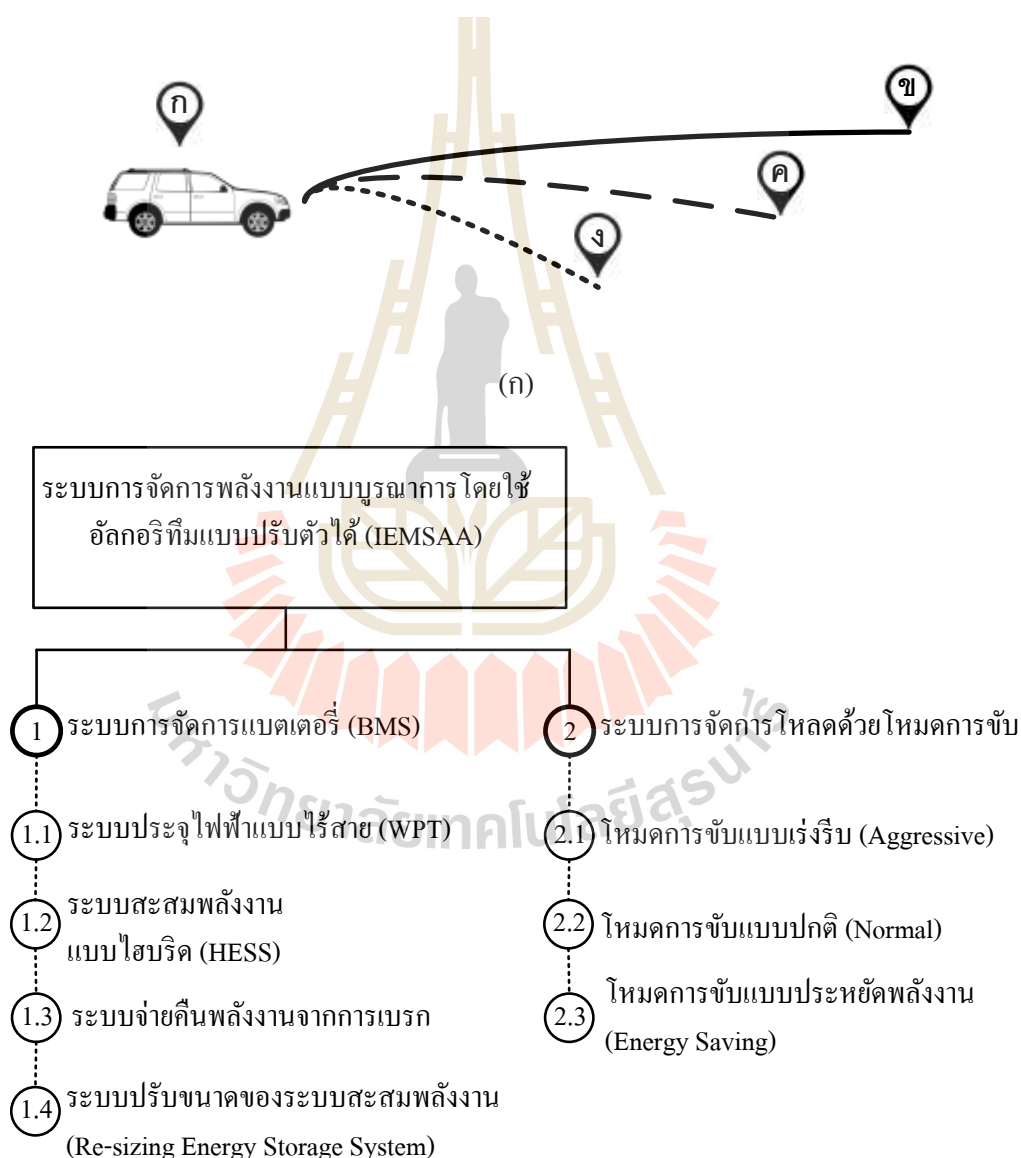


รูปที่ 1.3 เปรียบเทียบแบตเตอรี่กับอุปกรณ์สะสมพลังงานอื่น

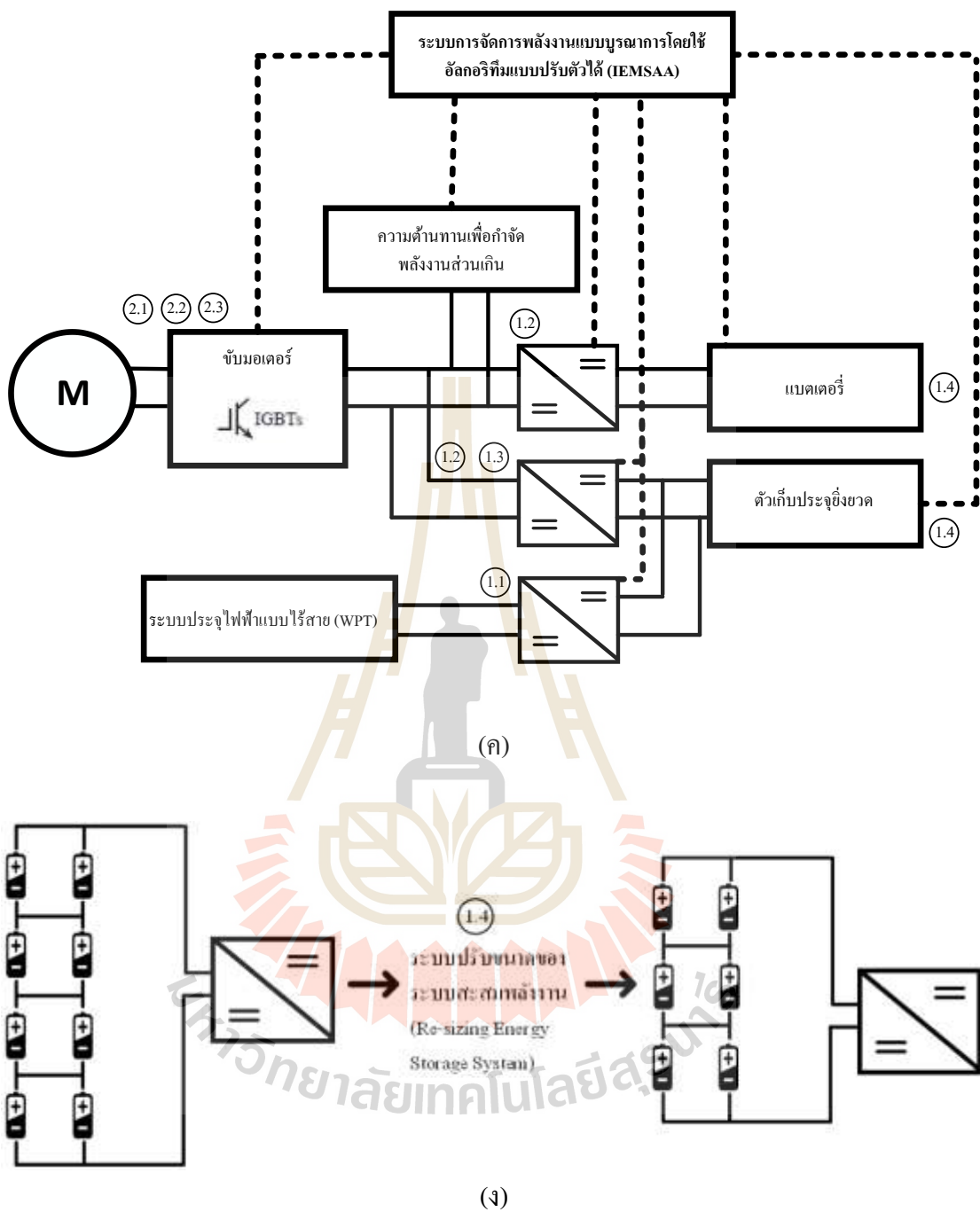
ตัวเก็บประจุสองชั้นมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง ทำให้สามารถจ่ายภาระกรรมที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงในช่วงเวลาสั้นๆ (ประมาณ 100-600 A) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเหมาะกับการจ่ายโหลดช่วงเร่งความเร็วของยานยนต์ไฟฟ้า และการประจุไฟฟ้าของการจ่ายพลังงานกลับคืนจากการเบรก แต่อย่างไรก็ตามตัวเก็บประจุสองชั้นไม่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มากเหมือนแบตเตอรี่ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีแนวคิดที่จะมีการนำแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุสองชั้นมาทำงานร่วมกันเพื่อให้สามารถจ่ายกระแสได้สูง และจ่ายโหลดได้เพียงพอต่อการเดินทางโดยที่มีขนาดของแบตเตอรี่ที่ไม่ใหญ่เกินขนาด (Saikong, W and Kulworawanichpong, T,2017)

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในยานยนต์ไฟฟ้า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอ วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานด้วยการพัฒนาระบบการจัดการพลังงานแบบบูรณาการโดยใช้อัลกอริทึม แบบปรับตัวได้ (Integrated energy management system using adaptive algorithm) หรือเรียกชื่อว่า IEMSAA เพื่อจัดการพลังงาน และปรับจำนวนระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมกับเส้นทางดังรูปที่ 1.4 (ก) ถึงแม้ว่ายานยนต์ไฟฟ้าจะออกแบบมาให้วิ่งในเส้นทางที่ไกลที่สุด คือเส้นทาง ก ถึง ข แต่เมื่อรถต้องวิ่งในเส้นทางอื่นระบบจัดการพลังงานต้องสามารถปรับตัว และเสนอทางเลือกในการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานที่สุด ดังในรูปที่ 1.4 (ข) ระบบ IEMSAA ประกอบไปด้วย โหมดการขับขี่แบบที่แตกต่างกัน โดยโหมดการขับขี่แบบประหยัดพลังงานจะทำการจำกัดการจ่ายโหลดกำลังสูงในเวลาสั้นๆ ทำให้รถไม่สามารถใช้ความเร่งได้เต็มที่ แต่จะสามารถประหยัดพลังงานได้ ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงระยะเวลาการขับขี่ที่ผู้ขับขี่ยอมรับได้ด้วย รวมทั้งรองรับการจ่ายคืนพลังงานไฟฟ้าจากการเบรก (Regenerative braking) การประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย เพื่อเพิ่มระยะทางการขับขี่ และยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริดที่ตัวเก็บประจุสองชั้นจะทำหน้าที่ช่วยแบตเตอรี่ในการจ่ายโหลดที่มีกระแสสูงในช่วง

กำลังโหลดสูงสุด (Peak power demand) โดยไม่ต้องมีการเพิ่มความจุของแบตเตอรี่ โดยเฉพาะในช่วงที่มีจ่ายพลังงานกลับคืนจากการเบรก ช่วงการเร่ง และการประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว (Fast charging) และระบบปรับขนาดของระบบสะสมพลังงานให้เหมาะสมกับเส้นทาง ดังแสดงในรูปที่ 1.4 (ง) สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ยังคงเป็นปัญหาที่ยาก ในปัจจุบันยังไม่มีผลเฉลยของระบบควบคุมที่ดีที่สุดสำหรับในทุกกรณี ดังนั้นกลยุทธ์การควบคุมจึงจะต้องปรับตัวได้ ปรับตามข้อมูลของเส้นทางการขับขี่ เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 4 (ค) ที่แสดงภาพรวมของการพัฒนาระบบการจัดการพลังงาน



(ข)



- (ก) การปรับตัวของรถยนต์ไฟฟ้าตามเส้นทางการขับ
- (ข) ระบบ IEMSAA
- (ค) ภาพรวมของการพัฒนาระบบการจัดการพลังงาน
- (ง) ระบบปรับขนาดของระบบสะสมพลังงาน

รูปที่ 1.4 ภาพรวมของการทำการวิจัย

การทำงานของระบบปรับขนาดของระบบสะสมพลังงาน ดังรูปที่ 1.4 (ง) ซึ่งปรับขนาดตามผลการคำนวณค่าน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งในแต่ละโมดูลของระบบสะสมพลังงานจะมีสวิตช์ หรือรีเลย์เพื่อเลือกเส้นทางการเชื่อมต่อที่เหมาะสม (Re-topology) และทำงานร่วมกับคอนเวอร์เตอร์กระแสตรงเพื่อยกระดับแรงดันให้ยังคงที่ และมีค่าเท่ากับแรงดันที่บัส (DC Bus)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการใช้พลังงานอย่างประหยัด และมีประสิทธิภาพในยานยนต์ไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาแบบจำลองของยานยนต์ไฟฟ้าที่มีการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการจัดการพลังงานที่ได้รับจากการเบรกของระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริด
- 1.2.4 เพื่อพัฒนาระบบการจัดการพลังงานให้ใช้พลังงานอย่างเหมาะสมและยืดหยุ่นสำหรับแต่ละเส้นทาง

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

การเลือกโหมดการทำงานของรถขับเคลื่อน และการปรับชนิดและขนาดของระบบสะสมพลังงานให้เหมาะสมกับเส้นทาง มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในยานยนต์ไฟฟ้า

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.4.1 ไม่พิจารณาผลในสถานะชั่วคราวจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- 1.4.2 ค่าพารามิเตอร์ในการจำลองระบบยานยนต์ไฟฟ้าบางส่วนอ้างอิงจาก หนังสือ หรือเอกสารการวิจัยที่มีความน่าเชื่อถือ
- 1.4.3 แบบจำลองของยานยนต์ไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น สามารถใช้ได้กับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล และรถบัสได้

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยรวมผลของการจ่ายคืนพลังงานจากการเบรก การประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย และระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริดระหว่างแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุสองชั้น

1.5.2 พัฒนาระบบการจัดการพลังงานให้ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมที่สุด และยืดหยุ่นสำหรับแต่ละเส้นทาง

1.5.3 วิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แหล่งพลังงานจากแหล่งเดียว และเครื่องยนต์สันดาปภายใน ภายใต้อัตราการใช้พลังงาน ระบบทดสอบและเงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน โดยใช้ค่าพลังงาน เป็นดัชนีชี้วัด

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้แบบจำลองของระบบการจัดการพลังงานให้ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมที่สุด และยืดหยุ่นสำหรับแต่ละเส้นทาง

1.6.2 สามารถขยายผลหลักการ แนวคิดของแบบจำลองที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ไปใช้ในการแก้ปัญหาการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพของยานยนต์ไฟฟ้าที่มีพิสัยใหญ่ขึ้นได้ หรือใช้กับยานยนต์ไฟฟ้ารูปแบบอื่น

1.6.3 ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยในที่ประชุมทางวิชาการหรือในวารสารวิชาการ

1.6.4 พัฒนานวัตกรรมทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าคุณวุฒิวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตที่มีคุณภาพ

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท 2 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนบทอื่นประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ผลและข้อสรุปของงานวิจัย ที่ได้มีผู้ดำเนินการศึกษาและวิจัยมาก่อนตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน โดยจะแบ่งเป็น 3 หัวข้อหลัก ได้แก่ ยานยนต์ไฟฟ้าและระบบสะสมพลังงานไฟฟ้า ระบบประจุไฟฟ้า และรูปแบบความเร็วของยานยนต์ไฟฟ้า

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎี ที่เกี่ยวข้องกับงานวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วย 4 หัวข้อหลัก ได้แก่ หลักการของการขับเคลื่อนและการเบรก ยานยนต์ไฟฟ้าและส่วนประกอบ กำลังและพลังงานของระบบสะสมพลังงาน พลังงานคืนกลับจากการเบรก

บทที่ 4 กล่าวถึงแบบจำลองระบบการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า การยืนยันผลการจำลอง การพัฒนาโปรแกรมการจำลองผลสำหรับระบบการจัดการพลังงาน เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลอง

และทดสอบแบบจำลอง ในเส้นทางที่แตกต่างกัน รวมถึงการใช้พลังงานเหมาะสมที่สุดสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนรูปแบบความเร็ว (Velocity trajectory) และเวลาที่ถึงที่หมาย โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ระเบียบวิธีแบบกลุ่มอนุภาคในการหาค่าพลังงานที่เหมาะสมที่สุด และกล่าวถึงวิธีการและลำดับขั้นตอนที่ใช้ในการทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดสอบ พร้อมทั้งกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขในการหาค่าที่เหมาะสมของระบบบูรณาการในการจัดการพลังงาน

บทที่ 5 นำเสนอผลการจำลอง ประกอบไปด้วยผลการเปรียบเทียบผลกระทบของการใช้พลังงานระหว่างขั้นตอนวิธีหรืออัลกอริทึมของการปรับปรุงรูปแบบการใช้ความเร็วที่ผู้วิจัยนำเสนอ กับรูปแบบการควบคุมความเร็วอัตโนมัติแบบคงที่ (Cruise control) ที่ใช้ในยานยนต์ปัจจุบัน และทำการศึกษาผลการจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า 3 เส้นทาง เส้นทางละ 6 กรณีศึกษา โดยทำการเปรียบเทียบผลการจำลอง คือ การใช้พลังงาน (E_{load}) พลังงานสุทธิ (E_{net}) และกำลังงานสูงสุด (P_{peak})

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวก ก. วิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แหล่งพลังงานจากแหล่งเดียว และเครื่องยนต์สันดาปภายใน

ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

กิจกรรมในภาคขนส่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการพัฒนาด้านเศรษฐกิจ และยกระดับคุณภาพชีวิตของประชากรในสังคมในปัจจุบัน ในทางกลับกันก็ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ และเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ และปรากฏการณ์โลกร้อน (Climate change and global warming) ยานยนต์ไฟฟ้าเป็นตัวเลือกที่จะเข้ามาแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลภายใน เพื่อบรรเทาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในบทนี้นำเสนอการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ผลการผลการทดสอบ และวิจัย ข้อผิดพลาด และแนวทางการพัฒนาที่มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในอนาคต วิธีการและผลการวิจัยจากวรรณกรรมทางวิชาการดังกล่าวจะใช้ในการอ้างอิง และเป็นเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนางานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะทำการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยการสรุป ประวัติย่อ ปัญหา การดำเนินการวิจัย และผลการทดสอบและวิจัย ของงานวิจัยที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่ ซึ่งประกอบได้ด้วยหัวข้อหลักคือ ยานยนต์ไฟฟ้าและระบบสะสมพลังงาน ระบบประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า และรูปแบบความเร็วของยานยนต์ไฟฟ้า

2.2.1 ยานยนต์ไฟฟ้าและระบบสะสมพลังงาน

ประวัติย่อของยานยนต์ไฟฟ้าได้สร้างขึ้นครั้งแรกโดย Frenchman Gustave Trouvé ในปี ค.ศ. 1881 ซึ่งเป็นรถ 3 ล้อ ดังรูปที่ 2.1 ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง ขนาด 0.1 แรงม้าและจ่ายไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ตะกั่วกรด น้ำหนักรวมผู้ขับขี่ประมาณ 160 kg ต่อมาในปี ค.ศ. 1883 ยานยนต์ไฟฟ้ารูปแบบคล้ายกันถูกสร้างขึ้นโดยศาสตราจารย์ชาวอังกฤษ 2 ท่าน ในช่วงแรกยานยนต์ไฟฟ้ายังไม่ได้รับความนิยมจากสาธารณะชนมากนัก เนื่องจากเทคโนโลยียังคงอยู่ในช่วงการพัฒนา โดยทำความเร็วได้ 15 km/h และวิ่งได้ระยะทาง 16 km ซึ่งไม่เพียงพอต่อการแข่งขันกับรถม้าที่ใช้กันแพร่หลายในขณะนั้น ยานยนต์ไฟฟ้าได้ได้รับความสนใจจากสาธารณะชนในการทดสอบจาก ปารีส ถึง รูอ็อง (Rouen) ระยะทาง 1,135 km ใช้เวลา 48 ชั่วโมง 53 นาที ที่ความเร็วเฉลี่ย 23.3 km/h ซึ่งเป็นความเร็วที่รถม้าไม่สามารถทำได้ (Ehsani M., et al., 2010)



Fig. 13 : Tricycle électrique de Trouvé
(Alexis Clerc, Physique et chimie populaires, vol. 2, 1881-1883).

รูปที่ 2.1 รถมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าครั้งแรกของโลก

ที่มาภาพ : https://en.wikipedia.org/wiki/Gustave_Trouv%C3%A9 [เข้าถึงเมื่อ 24 ธ.ค. 2561]

ระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าในยุคเริ่มต้นนั้นจะเป็นระบบที่ช่วยเสริมการทำงานของรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน หรือเป็นระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด สำหรับรถยนต์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดที่อาจจะนับได้ว่าเป็นคันแรกของโลก เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1898 โดย Ferdinand Porsche ที่ประเทศเยอรมนี ต่อมาในปี ค.ศ. 1905 วิศวกรชาวสหรัฐอเมริกา H. Piper ได้จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับยานยนต์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด ซึ่งแนวคิดของเขาคือใช้มอเตอร์ไฟฟ้าทำงานช่วยเครื่องยนต์สันดาปภายในขนาดเล็ก ซึ่งทำให้ยานยนต์ ดังกล่าวทำความเร็วได้ 25 mph ซึ่งการออกแบบดังกล่าวคล้ายกับยานยนต์ระบบขับเคลื่อนไฮบริดในปัจจุบัน ในสหรัฐอเมริกา ในช่วงปี ค.ศ. 1920 มีบริษัทที่ผลิตรถยนต์ไฟฟ้า และยานยนต์ระบบขับเคลื่อนไฮบริดที่มีบทบาทในตลาดอยู่ 2 บริษัท แต่รถยนต์ที่ผลิตนั้นก็มีความแพงกว่ารถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์มาก ในปี ค.ศ. 1930 ทั้งยานยนต์ไฟฟ้า และยานยนต์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดประสบความล้มเหลว และหายออกจากตลาดยานยนต์ประเทศสหรัฐอเมริกา (Mi Chris, et.al, 2011)

ยานยนต์ไฟฟ้ากลับสู่ตลาดอีกครั้งใน ปี ค.ศ. 1997 เมื่อรถไฟฟ้าไฮบริดออกจำหน่ายในประเทศญี่ปุ่น จากนั้นบริษัทอื่น ๆ ก็ผลิตรถยนต์ไฟฟ้า และรถไฟฟ้าไฮบริดออกจำหน่าย โดยในปัจจุบันมีบริษัทที่ผลิตรถไฟฟ้า และรถไฟฟ้าไฮบริดมากกว่า 10 บริษัท และมี

แบบรถไฟฟ้า และรถไฟฟ้าไฮบริดมากกว่า 40 แบบ ส่วนสาเหตุของความล้มเหลวของรถไฟฟ้า และรถไฟฟ้าไฮบริดในช่วงทศวรรษปี ค.ศ. 1990 มีสาเหตุสำคัญดังต่อไปนี้

- ข้อจำกัดของรถไฟฟ้า: ระยะการขับของรถไฟฟ้าสามารถขับได้ 60-100 ไมล์ต่อการประจุไฟฟ้าในแต่ละครั้ง ในขณะที่ รถยนต์ที่ใช้น้ำมันขับได้ระยะทาง 300 ไมล์หรือมากกว่า และการประจุไฟฟ้าก็ใช้เวลานาน ประมาณ 8 ถึง 10 ชั่วโมง รถไฟฟ้ายังมีพื้นที่เก็บสัมภาระน้อยกว่าแต่มีราคาที่แพงกว่ามาก
- น้ำมันมีราคาถูกลง: ในระหว่างนั้นราคาน้ำมันมีราคาถูกลง ในขณะที่ราคารถไฟฟ้ามียาแพง การลงทุนเป็นเจ้าของรถไฟฟ้าจึงเป็นการลงทุนที่ไม่คุ้มค่า
- ทักษะของผู้บริโภค: ผู้ใช้รถยนต์ที่มีขนาดใหญ่ มีเครื่องยนต์ขนาดใหญ่ เช่น รถกระบะ รถยนต์อเนกประสงค์ หรือ SUV (Sport Utility Vehicles) เนื่องจากมีความสะดวกสบายมากกว่า ถึงแม้ว่าการใช้รถยนต์ขนาดเล็กจะมีความคุ้มค่าในการใช้พลังงานมากกว่าก็ตาม
- บริษัทผลิตรถยนต์: บริษัทผลิตรถยนต์ทุ่มเงินจำนวนมากเพื่อสนับสนุนการวิจัยเกี่ยวกับรถยนต์ไฟฟ้า แต่ไม่ได้รับผลตอบแทนที่ดีจากตลาดรถยนต์ จำทำให้บริษัทต้องหยุดการผลิต การบริการหลังขายทำให้การขาดความเชื่อมั่นในรถยนต์ไฟฟ้าตามมา
- บริษัทน้ำมัน: มีความพยายามของบริษัทน้ำมันที่จะกดดันให้ภาครัฐลดการสนับสนุนรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้รถยนต์ไฟฟ้าหายจากตลาดในรัฐแคลิฟอร์เนีย ในช่วงทศวรรษของปี ค.ศ. 1990
- ภาครัฐ: นโยบายของรัฐไม่มีความแน่นอนและต่อเนื่อง
- เทคโนโลยีของแบตเตอรี่: แบตเตอรี่ตะกั่ว กรด เป็นแบตเตอรี่ที่ได้นำมาใช้งานมากที่สุดในการรถไฟฟ้า ในช่วงทศวรรษของปี ค.ศ. 1990 ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่และหนัก และต้องการเวลาในการประจุไฟฟ้าที่นาน
- โครงสร้างพื้นฐาน: ในเวลาดังกล่าวโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังยังไม่ทั่วถึงเพียงพอ ทำให้การติดตั้งสถานีการประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่

สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นการนำเข้าจากต่างประเทศ แต่ก็มีหน่วยงานภาครัฐร่วมกับเอกชน รัฐวิสาหกิจ รวมถึงสถาบันการศึกษาร่วมทำการวิจัยยานยนต์ไฟฟ้า ทั้งรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า รถยนต์ไฟฟ้า และรถบัสไฟฟ้า

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ได้ดำเนินการวิจัยและพัฒนาทางด้านยานยนต์รถไฟฟ้า ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549 ได้พัฒนาชิ้นส่วนแชสซี โครงสร้างตัวถัง

การประจุไฟฟ้า และระบบขับเคลื่อนสำหรับรถโดยสาร ไฟฟ้า และได้พัฒนาชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์สำหรับทดลองตัดแปลงรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในให้เป็นรถไฟฟ้า ร่วมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) ในปี 2553 และได้พัฒนามอเตอร์ และระบบควบคุมสำหรับประกอบรถมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้า ร่วมกับ กฟผ. ในปี 2555 ทั้งนี้ในปัจจุบัน สวทช. มีความพยายามจะผลักดันการสร้างมาตรฐานของระบบการประจุไฟฟ้าสำหรับ รถไฟฟ้าให้เกิดขึ้นในประเทศ

เมื่อวันที่ 11 กันยายน 2557 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) และบริษัทอู่เชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด เปิดตัวรถบัสไฟฟ้าคันแรกของประเทศที่พัฒนาขึ้นโดยฝีมือคนไทย พร้อมสถานีประจุแบตเตอรี่ โดยมีรองศาสตราจารย์ ดร. ธนัชชัย กุลวรรวานิชพงษ์ เป็นหัวหน้าโครงการวิจัย ได้เปิดตัวรถโดยสารไฟฟ้าไร้มลพิษ (PEA Ze-bus) ดังรูปที่ 2.2 ณ สำนักงานใหญ่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กรุงเทพมหานคร การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือ พีอีเอ (PEA) โดย PEA ที่มีแผนในการใช้พลังงานไฟฟ้าในภาคคมนาคมขนส่ง เพื่อเสริมสร้างบทบาทในการเป็นผู้ให้บริการพลังงานไฟฟ้าในภาคคมนาคมขนส่งประเทศ ดังนั้น กองทุนวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จึงได้ให้ทุนสนับสนุนแก่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการดำเนินการศึกษาวิจัยโครงการสาธิตรถโดยสารไร้มลพิษสำหรับ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือ PEA รถโดยสารไร้มลพิษ เป็นรถโดยสารขนาด 43 ที่นั่ง สามารถทำความเร็วสูงสุด 90 km/h วิ่งได้ 100 km โดยประมาณ ที่ความเร็วเฉลี่ยประมาณ 60 km/h ต่อการประจุแบตเตอรี่หนึ่งครั้ง ระบบขับเคลื่อนใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction) ขนาด 120 kW (2×60 kW) ใช้แบตเตอรี่ชนิด

ลิเทียม-ไอออน (Lithium-ion) ขนาดความจุ 196 kWh ระบบประจุแบตเตอรี่ใช้ไฟขนาด 80 kVA แรงดัน 430-630 VDC จ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 120 A และ ใช้เวลาในการประจุแบตเตอรี่ประมาณ 3 ชั่วโมง และรถโดยสารไฟฟ้างดักตัวออกแบบมาเพื่อรองรับการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้า (Battery electric bus) คือรถบัสโดยสารที่ใช้ไฟฟ้าในการขับเคลื่อน ผ่านทางแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ที่ติดตั้งภายในรถซึ่งจะให้บริการในเขตเมืองและชานเมือง รถบัสไฟฟ้านั้นยังมีการใช้งานในเชิงพาณิชย์ไม่มากนักเนื่องจากราคาของแบตเตอรี่ที่แพงทำให้ต้นทุนของรถบัสไฟฟ้าสูงมากเมื่อเทียบกับรถบัสที่ใช้พลังงานจากน้ำมันดีเซลหรือก๊าซธรรมชาติ สำหรับข้อดีของรถบัสไฟฟ้าคือมีประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ที่เหนือกว่าการใช้พลังงานรูปแบบอื่น และไม่มีมลพิษหรือของเสียที่จะก่อให้เกิดมลพิษ



รูปที่ 2.2 รถโดยสารไฟฟ้าไร้มลพิษ (PEA Ze-bus)

R. Sadoun และคณะ (Sadoun, R, et al., 2011) ได้ทำการเสนอบทความเกี่ยวกับผลกระทบของวงจรการขับเคลื่อนของระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริดระหว่างแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า ในบทความนี้ใช้ 2 วงจรการขับเคลื่อนคือ ARTEMIS และNEDC (The New European Drive Cycle) และ 2 กลยุทธ์ในการใช้พลังงานจากระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริด กลยุทธ์แบบที่ 1 คือขนาดของแบตเตอรี่จะต้องมีขนาดเพียงพอที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละวงจรการขับเคลื่อนได้ และกลยุทธ์ที่ 2 คือ ใช้แบตเตอรี่ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยขนาดของแบตเตอรี่จะต้องจ่ายพลังงานได้ตลอดระยะทางการขับเคลื่อน คือประมาณ 120 km และใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายกำลังไฟฟ้าในช่วงที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงในช่วงสั้นๆ และศึกษาผลกระทบต่อวงจรการขับเคลื่อนที่มีขนาดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่ากลยุทธ์การใช้พลังงานแบบที่ 2 จะสามารถช่วยให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าไม่สูงมาก ซึ่งเป็นการลดความเครียดของแบตเตอรี่ได้ ซึ่งจะเป็นการยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ แต่สำหรับแบตเตอรี่บางชนิดที่สามารถจ่ายกระแสได้ สูง หรือสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงในช่วงเวลาสั้นๆ ได้ จะพบว่าน้ำหนักของระบบสะสมพลังงาน ที่ใช้ทั้ง 2 กลยุทธ์มีความใกล้เคียงกันมากไม่ว่าจะใช้วงจรการขับเคลื่อนใดก็ตาม

Huang Xiaoliang และคณะ (Huang Xiaoliang, et al., 2013) ได้ทำการเสนอบทความเกี่ยวกับกลยุทธ์การจัดการพลังงานด้วยการประสานกำลังที่เหมาะสมที่สุด สำหรับระบบสะสมพลังงานไฟฟ้าแบบไฮบริดระหว่างแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดของยานยนต์ไฟฟ้า (HESS) โดยในบทความใช้กลยุทธ์การจัดการพลังงาน 3 ชั้น สำหรับ HESS เพื่อจัดการให้การจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกันระหว่างแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีประสิทธิภาพที่สุดสำหรับรถไฟฟ้า ซึ่งการจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกันดังกล่าวจะควบคุมผ่านคอนเวอร์เตอร์ ผลการทดสอบจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ และการสร้างชุดจำลองระบบ พบว่าระบบสะสมพลังงานไฟฟ้าแบบไฮบริดระหว่างแบตเตอรี่ และตัว

เก็บประจุยิ่งยวดสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และลดการจ่ายกระแสที่สูงของแบตเตอรี่ได้ แต่การทดสอบดังกล่าวเป็นระบบจำลอง โดยใช้แรงดันที่ 72 V และโหลดสูงสุดของมอเตอร์ที่ 2 kW

Toshiyuki Hiramatsu และคณะ (Hiramatsu Toshiyuki, et al., 2014) ได้นำเสนอแนวทางการออกแบบความจุของระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริดที่มีการประจุไฟฟ้าเข้าโดยการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เพื่อแก้ไขปัญหาการจ่ายโหลดของระบบสะสมพลังงานของรถไฟฟ้าที่มีใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวมาเป็นการใช้ระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริด และมีการประจุไฟฟ้าเข้าจากการส่งผ่านกำลังแบบไร้สาย ซึ่งจะช่วยให้น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานโดยรวมลดลง และได้เพิ่มคอนเวอร์เตอร์แบบ DC-DC เพื่อใช้ในการควบคุมการประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย ซึ่งจะทำให้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยรวม โดยในงานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้มีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบระบบสะสมพลังงาน เพียงแต่นำเสนอสมการเงื่อนไขในการออกแบบ และหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของระบบสะสมพลังงาน กับสัดส่วนการประจุไฟฟ้าให้แบตเตอรี่ สัดส่วนของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด จำนวนครั้งการประจุเข้า และเวลาในการประจุไฟฟ้า โดยผลการจำลองสรุปได้ว่า การใช้ระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริด ร่วมกับการประจุไฟฟ้าเข้าโดยการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายสามารถลดน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานได้ ระดับการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และสัดส่วนของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด มีผลต่อการหาค่าน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมที่สุด รวมถึงจำนวนของการประจุไฟฟ้าเข้า ซึ่งถ้ามีจำนวนของการประจุไฟฟ้าเข้ามากขึ้น จะทำให้สัดส่วนของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดมากขึ้นไปด้วยนั้นหมายถึงน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานโดยรวมจะน้อยลงไปอีก แต่จะต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการประจุไฟฟ้าด้วย

Chen Zhao และคณะ (Chen Zhao, et al., 2014) ได้นำเสนอบทความเกี่ยวกับการวิเคราะห์ การควบคุม และการประจุไฟฟ้าแบบไร้สายของระบบสะสมพลังงานโดยใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของความสูญเสียทางไฟฟ้า และประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยทางผู้เขียนบทความฉบับนี้ได้ทำการจำลองทางคณิตศาสตร์ และสร้างแบบจำลองจากชุดทดลอง ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีความเหมาะสมที่จะใช้กับโหลดของรถไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างรวดเร็ว และการควบคุมการทำงานของระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริดที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดร่วมด้วย และการประจุไฟฟ้าแบบไร้สายที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีการควบคุมที่ละเอียดเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการทำการประจุ

Tingyou Ming และคณะ (Ming Tingyou, et al., 2014) ได้นำเสนอบทความเกี่ยวกับลำดับชั้นของกลยุทธ์การจัดการพลังงานสำหรับระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริดระหว่าง

แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดของยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อทำการควบคุมการทำงานของระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริดอย่างมีประสิทธิภาพ ในบทความนี้จึงได้เสนอกลยุทธ์การควบคุมแบบ 2 ระดับ คือระดับพลังงานไฟฟ้า และระดับกำลังไฟฟ้า ในระดับพลังงานไฟฟ้าจะหาค่าที่เหมาะสม สถานการณ์ประจุ (State of charge) หรือเรียกย่อว่า SOC ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด และในระดับกำลังไฟฟ้าจะทำการหาค่าสัดส่วนที่เหมาะสมของการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด จากผลการจำลองโดยใช้หลากหลายวงจรการขับ (Driving cycles) พบว่ากลยุทธ์ที่ใช้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว และยังพบว่าระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริดสามารถลดค่ากระแสโหลดสูงสุด และเพื่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยเฉพาะการจ่ายคืนพลังงานไฟฟ้าจากการเบรก

Ahmed Azad และคณะ (Azad Ahmed, et al., 2015) ได้ทำการเสนอบทความเกี่ยวกับการออกแบบระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริดสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้การประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย โดยข้อดีการระบบการประจุไฟฟ้าแบบไร้สายคือ ประจุไฟฟ้าได้แม้ว่ารถยังเคลื่อนที่อยู่ ช่วยยืดระยะเวลาการขับ รถมิน้ำหนักเบา และราคาถูกกว่าการใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวในรถไฟฟ้า เมื่อพลังงานไฟฟ้าจำนวนมากในระยะเวลานั้นๆ ส่งผ่านระบบไร้สายเพื่อประจุไฟฟ้า ระบบสะสมพลังงานไฟฟ้าไฮบริดที่เหมาะสมควรประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังต้องมีระบบการจัดการพลังงานเพื่อหากกลยุทธ์ และคำนวณขนาดของระบบสะสมพลังงานให้เหมาะกับเส้นทาง และการวางตำแหน่งของระบบประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย ผลการจำลองยืนยันว่า อัลกอริทึมของระบบจัดการพลังงานที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริดสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Sarang R. Soni และคณะ (Sarang R. Soni, et al., 2015) ได้ทำการเสนอบทความเกี่ยวกับการวิเคราะห์ระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริดระหว่างแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า การควบคุม และจัดการการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ให้มีประสิทธิภาพเป็นปัจจัยที่สำคัญที่จะช่วยยืดอายุของแบตเตอรี่ให้ยาวนานขึ้น ในบทความดังกล่าวได้มีการต่อวงจรของระบบสะสมพลังงานในหลายรูปแบบสำหรับใช้ในทดสอบการจัดการกำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้า ผลการวิจัยสรุปว่าระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริดระหว่างแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าได้

2.2.2 ระบบประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

การประจุไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้าประกอบไปด้วย การประจุไฟฟ้าแบบใช้สายและแบบไร้สายตัวนำ ข้อดีของระบบประจุไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อเปรียบเทียบกับประจุโดยใช้สายตัวนำคือ มีความสะดวกในการประจุไฟฟ้า และมีการแยกระบบทางไฟฟ้า (Galvanic isolation) ของ

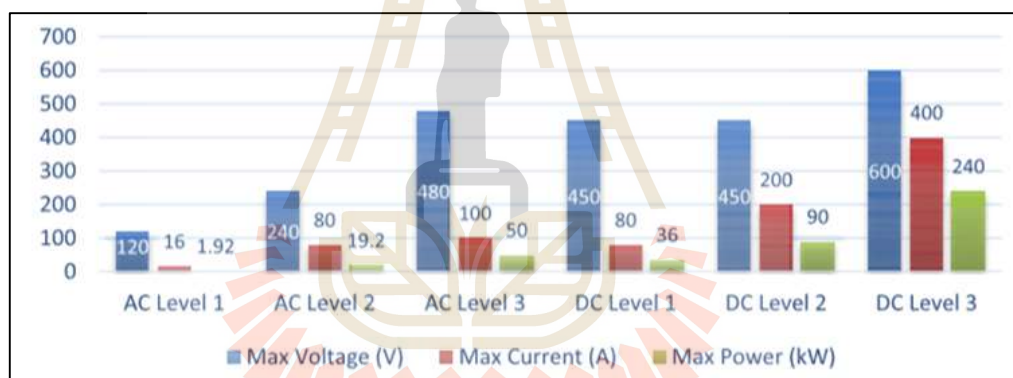
อุปกรณ์ประจุและระบบของยานยนต์ไฟฟ้าออกจากกัน เมื่อไม่จำเป็นต้องใช้สายในการประจุ ทำให้ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถประจุไฟฟ้าได้ง่าย หลายครั้ง ในทุก ๆ ที่ที่มีการติดตั้งจุดประจุแบบไร้สาย เช่นที่บ้าน ที่ทำงาน ที่ร้านค้า และที่จุดติดตั้งสัญญาณไฟจราจร เป็นต้น สำหรับการประจุไฟฟ้าแบบไร้แบบเคลื่อนที่ (Dynamic wireless charging, DWC) ซึ่งจะติดตั้งสำหรับถนนในเส้นทางระหว่างเมืองในช่องทางเฉพาะ ทำให้สามารถประจุไฟฟ้าในขณะที่ ยานยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ จะทำให้ลดการติดตั้งระบบประจุแบบรวดเร็ว (Fast charging) ได้ แต่ระบบประจุแบบไร้สายก็มีข้อจำกัดคือ มีประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบการประจุไฟฟ้าโดยใช้สายตัวนำ นอกจากนี้ยังมีราคา ขนาด และกระบวนการผลิตที่มีความซับซ้อนมากกว่า ซึ่งปัจจัยที่เป็นข้อด้อยที่ได้กล่าวมา จะต้องได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นเพื่อให้สามารถใช้ทดแทนระบบการประจุแบบใช้สายตัวนำได้มากขึ้นในอนาคต เนื่องจากปัจจุบันมีการวิจัยเกี่ยวกับการประจุไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้าอย่างแพร่หลาย จึงมีบทความทางวิชาการเกี่ยวกับการทบทวนวรรณกรรมของการประจุไฟฟ้าและจำแนกประเภทของระบบประจุไฟฟ้าและรวบรวมผลงานวิจัยเกี่ยวกับการประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย (A. Ahmad, et al., 2018)

ในการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าระบบประจุไฟฟ้ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน ยานยนต์ไฟฟ้าต้องการเวลาในการเติมพลังงานกลับมากกว่า มีพิสัยการเดินทางที่สั้นกว่า และมีจำนวนสถานีประจุไฟฟ้าน้อยกว่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีสถานีประจุไฟฟ้ากำลังสูง และมีประสิทธิภาพสูง เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว เครื่องประจุไฟฟ้าแบบรวดเร็ว (Fast charger) สามารถประจุไฟฟ้าได้รวดเร็ว โดยประจุแบตเตอรี่ถึงความจุ 50 % ในเวลา 3 นาที และ 80 % ในเวลา 15 นาที แต่อย่างไรก็ตาม การประจุไฟฟ้าด้วยเทคนิคการประจุไฟฟ้าแบบรวดเร็ว จะส่งผลให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็วยิ่งขึ้น อัลกอริทึม ระบบประมวลผล ระบบควบคุม ของระบบประจุไฟฟ้าแบบรวดเร็วจะมีความซับซ้อนและขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ต้องมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้ราคาของระบบมีราคาที่สูงกว่าระบบประจุไฟฟ้าแบบปกติ (Normal charge) การใช้ประจุแบตเตอรี่ โดยใช้กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมจะช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ แต่การจะแก้ปัญหาดังกล่าวก็ควรจะทำให้การประจุไฟฟ้ารวดเร็วขึ้น ระบบการประจุไฟฟ้าโดยใช้สายตัวนำได้รับการพัฒนาจนสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (S. Lukic and Z. Pantic, 2013) และมีการกำหนดมาตรฐานสำหรับการประจุไฟฟ้าแบบใช้สายตัวนำแล้ว แต่การประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Inductive charging) ยังคงอยู่ในช่วงของการพัฒนา

2.2.2.1 การประจุไฟฟ้าโดยใช้สายตัวนำสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

การประจุไฟฟ้าโดยใช้สายตัวนำจะทำให้เกิดการเชื่อมต่อทางกายภาพระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานและยานยนต์ไฟฟ้า การประจุไฟฟ้าโดยใช้สายตัวนำแบ่งออกเป็น การประจุไฟฟ้าที่ติดตั้งบนยานพาหนะ (On-board charger) และติดตั้งนอกยานพาหนะ (Off-board charger) สำหรับระบบประจุไฟฟ้าที่ติดตั้งบนยานพาหนะอุปกรณ์สำหรับประจุไฟฟ้า เช่น เรกติไฟเออร์ (Rectifier)

และเรกกูเรเตอร์สำหรับปรับกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (Battery current regulators) จะถูกปรับขนาดให้สามารถติดตั้งในยานยนต์ไฟฟ้าได้ ในขณะที่ระบบประจุไฟฟ้าที่ติดตั้งนอกตัวรถ อุปกรณ์ดังกล่าวจะติดตั้งภายนอกตัวรถ นอกจากนี้การประจุไฟฟ้าโดยใช้สายตัวนำมีการแบ่งระดับแรงดันของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าออกเป็น ระดับที่ 1 ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC level 1) โดยใช้กำลังประจุไฟฟ้าไม่เกิน 2 kW ระดับที่ 2 ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC level 2) ใช้กำลังในการประจุไฟฟ้าอยู่ในช่วง 4-20 kW ระดับที่ 3 ไฟฟ้ากระแสตรง ใช้กำลังในการประจุไฟฟ้าอยู่ในช่วง 20-120 kW หรือมากกว่า (F. Ahmad, et al., 2017) การเปรียบเทียบระดับของการประจุไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2.3 และตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบการประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าและยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบมีสายตัวนำสำหรับประจุไฟฟ้า (Plug-in hybrid electric vehicles, PHEVs) รุ่นต่าง ๆ ที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบระบบประจุไฟฟ้า ระดับที่ 2 ประจุด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ และระบบประจุแบบรวดเร็ว ประจุด้วยไฟฟ้ากระแสตรง



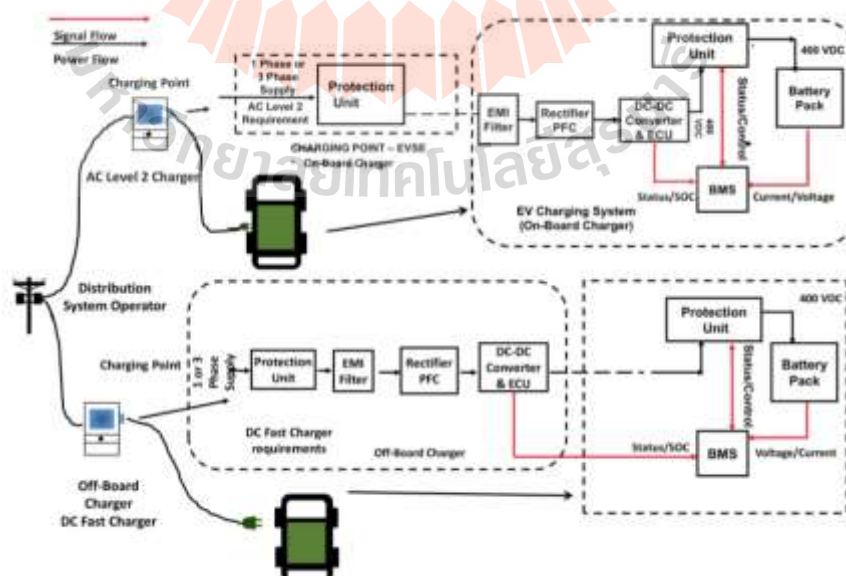
รูปที่ 2.3 ระดับการการประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 ขนาดของแบตเตอรี่และชนิดของการประจุไฟฟ้า

รุ่น	ชนิดของยานยนต์	ขนาดของแบตเตอรี่ (kWh)	ชนิดของการประจุ	อัตราการประจุสูงสุด (kW)
Porsche Panamera SE-Hybrid	PHEV	9	Level 1/Level 2	3
Porsche Cayenne SE-Hybrid	PHEV	11	Level 2	3.6/7.2

ตารางที่ 2.1 ขนาดของแบตเตอรี่และชนิดของการประจุไฟฟ้า (ต่อ)

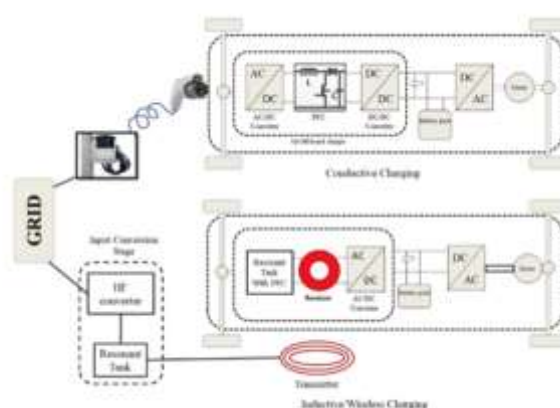
รุ่น	ชนิดของยานยนต์	ขนาดของแบตเตอรี่ (kWh)	ชนิดของการประจุ	อัตราการประจุสูงสุด (kW)
Mitsubishi i-MiEV	100% Electric	16	Level 2 (16A, 10A, 8A) /Level3	3.6/2.4/1.92
Nissan LEAF	100% Electric	24	Level 1/Level 2/Level 3	3.3/7.2
Volkswagen e-Golf	100% Electric	36.6	Level 1/Level 2/DC fast charging	3.6/7.2
Ford Focus Electric	100% Electric	23	Level 1/Level 2	6.6
BMW i3	100% Electric	24	Level 1/Level 2/DC fast charging	7.4
Mercedes B-Class Electric	100% Electric	28	Level 2	10
Tesla Model S	100% Electric	85	Level1/Level 2/Supercharge	11.5/17.2/120



รูปที่ 2.4 แผนภาพเปรียบเทียบการประจุระดับที่ 2 ไฟฟ้ากระแสสลับและระบบประจุแบบรวดเร็ว

2.2.2.2 การประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ หรือการประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย (Inductive charging or wireless charging)

รูปที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างระบบประจุไฟฟ้าที่ติดตั้งบนยานพาหนะ และระบบประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย ระบบประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำหรือระบบประจุไฟฟ้าแบบไร้สายจะไม่มี การเชื่อมต่อทางกายภาพระหว่างแหล่งจ่ายและยานยนต์ไฟฟ้า ในปี ค.ศ. 1999 Sakamoto และคณะ (H. Sakamoto, et al., 1999) ได้เสนอการเหนี่ยวนำคู่ควบแบบใหม่ในขณะนั้น (The new inductive coupler) ซึ่งมีประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า 97% ที่กำลังด้านออก (Output power) เท่ากับ 8.3 kW ระยะระหว่างตัวส่งและรับหรือช่องว่างอากาศ (Air gap) 3 mm ที่ความถี่ 100 kHz และสามารถตรวจจับระยะระหว่างตัวรับและตัวส่งเพื่อทำการประจุไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ ปัจจุบันการประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำถูกเรียกว่า การประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย และสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่ระยะระหว่างตัวส่งและตัวรับมีความกว้างมากขึ้น งานวิจัยในปัจจุบันมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาให้ส่งกำลังผ่านระยะระหว่างตัวรับและตัวส่งที่กว้างมากขึ้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เล็กลงและส่งกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น การส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless power transfer, WPT) สามารถจำแนกได้ตามวิธีการของการส่งกำลัง เช่น การส่งกำลังแบบเหนี่ยวนำ (Inductive power transfer, IPT) การส่งกำลังแบบเรโซแนนซ์แม่เหล็กคู่ควบ (Coupled magnetic resonance, CMR) การส่งกำลังแบบแม่เหล็กถาวรคู่ควบ (Permanent magnet coupled transfer, PMC) การส่งกำลังด้วยเลเซอร์และไมโครเวฟ หรือสามารถจำแนกประเภทโดยแบ่งตามลักษณะการใช้งาน เช่น การประจุไฟฟ้าไร้สายแบบยานยนต์สถิต (Static wireless charging : SWC) (Vatsala, et al., 2017) , (W. Chen, et al., 2016) การประจุไฟฟ้าในขณะยานยนต์เคลื่อนที่แบบไร้ (Dynamic wireless charging, DWC) (S. Li, et al., 2016) และการประจุไฟฟ้าไร้สายแบบยานยนต์กึ่งเคลื่อนที่ (Quasi dynamic wireless charging, QWC) (Y. J. Jang, et al., 2016) ระบบ

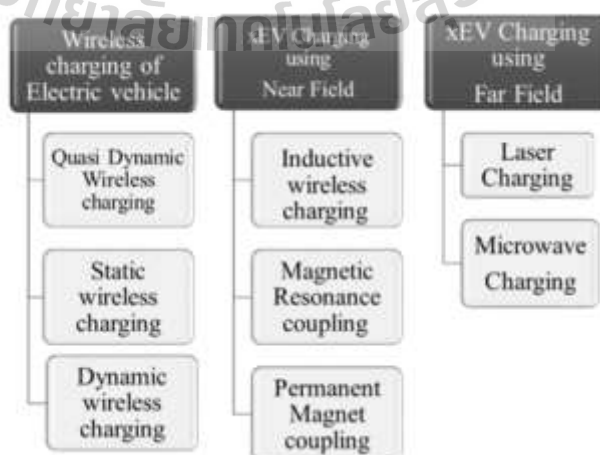


รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบระบบประจุไฟฟ้าที่ติดตั้งบนยานพาหนะและระบบประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย

ในปัจจุบันยังไม่สามารถระบุได้ว่าวิธีการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายวิธีการใดที่ดีที่สุดสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า CMR เป็นวิธีการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการส่งกำลังในระดับต่ำถึงปานกลาง การส่งกำลังด้วยเทคนิค IPT จะมีประสิทธิภาพที่ดีในการส่งในระบบที่ใช้แรงดันและกำลังที่สูง โดยที่ไม่ต้องใช้วงจรเรโซแนนซ์ ซึ่งประสิทธิภาพของการส่งกำลังจะอยู่ระหว่าง 85% - 96% แต่ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้น (M. Budhia, et al., 2013) สำหรับการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายกำลังสูง ซึ่งต้องการระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับที่เหมาะสม เพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดขึ้น สำหรับเทคนิค CMR ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ของการเรโซแนนซ์ที่สูงพอจะสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงมากกว่า 20 kW ในการประจุไฟฟ้าไร้สายแบบสถิต (Y.-H. Chao and J.-J. Shieh, 2012) สำหรับการประจุไฟฟ้าในขณะยานยนต์เคลื่อนที่แบบไร้สาย (DWC) ในปี ค.ศ. 2009 สถาบันชั้นสูงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเกาหลี (Korea Advanced Institute of Science & Technology, KAIST) ได้เริ่มโครงการยานยนต์ไฟฟ้าออนไลน์ (On-Line EV, OLEV) เป็นการพัฒนาระบบประจุไฟฟ้าไร้สายกำลังสูงเพื่อใช้งานในทางพาณิชย์ โครงการ OLEV สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้สูงที่ความถี่ 20 kHz ด้วยประสิทธิภาพการส่งผ่าน 83% สำหรับการส่งกำลังไฟฟ้า 60 kW โดยใช้ช่องว่างอากาศ 20 cm (J. Huh, et al., 2011)

2.2.2.3 วิธีการประจุไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

รูปที่ 2.6 แสดงการจำแนกประเภทการประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างโดยอุปกรณ์ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย (Tx) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน 1) ส่วนที่ไม่มีการแพร่กระจายคลื่น (Nonradiative Region) หรือส่วนสนามระยะใกล้ (Near Field Region) 2) ส่วนที่มีการแพร่กระจายของคลื่น (Radiative Region) หรือส่วนสนามระยะไกล (Far-Field Region) ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเพียงวิธีการประจุไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 การแบ่งประเภทการประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย

ก). การประจุไฟฟ้าแบบไร้สายโดยใช้เทคโนโลยีไร้สายสนามระยะใกล้

ส่วนสนามระยะใกล้หมายถึงพลังงานที่ส่งออกมาจะอยู่ใกล้กับอุปกรณ์ที่ส่ง ซึ่งตัวส่งจะไม่ปลดปล่อยพลังงานออกมาถ้าหากไม่มีตัวรับเข้ามาอยู่ในระยะที่จะสามารถรับพลังงานได้ ระยะการส่งพลังงานของเทคโนโลยีนี้ค่อนข้างใกล้และขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดตัวรับและตัวส่ง ในส่วนสนามระยะใกล้ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะแยกออกจากกัน ด้วยเหตุนี้ พลังงานในรูปแบบสนามไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านไปที่ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) และสนามแม่เหล็กจะถูกส่งผ่านด้วยขดลวด (T. Sun, X. Xie, and Z. Wang, 2013) โดยสนามไฟฟ้าจะมีระยะการส่งผ่านที่ใกล้กว่าสนามแม่เหล็ก เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีความสามารถในการทะลุผ่าน (Penetrate) ได้ดีกว่า

1) การประจุไฟฟ้าแบบไร้สายบนพื้นฐานของการส่งกำลังแบบเหนี่ยวนำ (Inductive power transfer, IPT) การประจุไฟฟ้าแบบไร้สายแบบ IPT ใช้หลักการของการแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำในการส่งพลังงานโดยไม่ใช้ตัวนำ โดยอาศัยกฎของเลนส์ และฟาราเดย์ (Lenz's law and Faraday's law) เมื่อกระแสในตัวนำเกิดการเปลี่ยนแปลงก็จะสร้างสนามแม่เหล็กรอบตัวนำ เมื่อขดลวดทุติยภูมิ (Secondary loop) หรือตัวรับ จะได้รับแรงดันไฟฟ้าบนขดลวดเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux) (H. K. Dashora, et al., 2015) ซึ่งตัวรับก็จะเชื่อมต่อกับโหลด การส่งกำลังไร้สายแบบเหนี่ยวนำ หรือ IPT นิยมใช้ในระบบสื่อสาร เช่น ระบบ RFID ซึ่งมีการส่งผ่านพลังงานน้อย แต่อย่างไรก็ตามสำหรับระบบรถไฟฟ้าต้องการการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในระดับสูง ระบบส่งกำลังไร้สายแบบเหนี่ยวนำจึงได้รับการปรับปรุงด้วยการเพิ่มวงจรเรโซแนนซ์ ซึ่งเรียกว่า การส่งกำลังแบบเรโซแนนซ์แม่เหล็กคู่ควบ หรือ CMR

2) การประจุไฟฟ้าแบบไร้สายบนพื้นฐานของการส่งกำลังแบบเรโซแนนซ์แม่เหล็กคู่ควบ (Coupled Magnetic Resonance, CMR) การส่งกำลังแบบเรโซแนนซ์แม่เหล็กคู่ควบหรือ CMR พัฒนาโดยสถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology, MIT) (A. Kurs, et al., 2007) ซึ่งประกอบไปด้วยขดลวดตัวรับ ตัวส่ง และตัวเก็บประจุ เพื่อใช้ในการชดเชยและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor correction) เพื่อให้เกิดเรโซแนนซ์สำหรับส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power transfer, MPT) ในประเทศเกาหลีใต้ ได้มีการทดสอบเดินรถโดยสารไฟฟ้าออนไลน์ (OLEV) โดยใช้หลักการเรโซแนนซ์คู่ควบสำหรับการประจุไฟฟ้าไร้สายขณะเคลื่อนที่ (DWC) OLEV ได้รับคัดเลือกให้เป็นสุดยอดสิ่งประดิษฐ์ในปี ค.ศ. 2010 (N. P. Suh and D. H. Cho, 2017) และกำลังพัฒนาไปสู่การใช้งานในเชิงพาณิชย์ บริษัทผลิตยานยนต์ชั้นนำทั่วโลก เช่น เทสลา โตโยต้า และนิสสัน เป็นต้น ก็เลือกใช้เทคโนโลยี เรโซแนนซ์แม่เหล็กคู่ควบ สำหรับการประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย ในเวลาต่อมาได้มีการพัฒนาระบบประจุไฟฟ้าไร้สายสำหรับยานยนต์ขณะเคลื่อนที่ ที่มีประสิทธิภาพ 90% โดยใช้ช่องว่างอากาศกว้าง 1 m และใช้ความถี่ในย่านเมกะเฮิรตซ์ (C. Qiu, K. T. Chau, et al., 2013)

3) การประจุไฟฟ้าแบบไร้สายบนพื้นฐานของการคู่ควบของแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Coupling) บริติชโคลัมเบีย (The University of British Columbia) ได้พัฒนาการส่งกำลังคู่ควบผ่านแม่เหล็กถาวรให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น (The Magnetic Gear Effect) โดยโรเตอร์แม่เหล็กถาวรด้านปฐมภูมิจะหมุนและเหนี่ยวนำให้โรเตอร์ด้านทุติยภูมิหมุนตามด้วยความเร็วเดียวกันหรือเรียกว่าความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) ต้นแบบของการส่งกำลังแบบไร้สายโดยใช้แม่เหล็กถาวรพัฒนาขึ้นโดย Covic และคณะ (G. A. Covic, et al., 2010) ซึ่งสามารถส่งผ่านกำลังที่มีค่าประสิทธิภาพ 80 % ที่ความถี่ 150 Hz ใช้ช่องว่างอากาศ 150 mm แต่ระบบนี้มีข้อด้อยอยู่หลายข้อ อันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนจากส่วนประกอบทางกล การซ่อมบำรุง และการส่งผ่านกำลังที่สูงระบบจะมีขนาดใหญ่ ดังนั้นระบบนี้จึงยังไม่เหมาะสมกับการประจุไฟฟ้าในระบบของยานยนต์ไฟฟ้า

ข). การประจุไฟฟ้าแบบไร้สายโดยใช้เทคโนโลยีไร้สายสนามระยะไกล

เทคโนโลยีไร้สายสนามระยะไกลประกอบด้วย 3 กระบวนการหลักดังต่อไปนี้ 1) การแปรผันพลังงานไฟฟ้าไปสู่ความถี่วิทยุ คลื่นไมโครเวฟ หรือ เลเซอร์ 2) การส่งผ่านพลังงาน 3) การสะสมกำลังที่จุดหมาย (จุดรับ) และแปรผันสู่พลังงานไฟฟ้า โดยการส่งกำลังแบบไร้สายโดยใช้เทคโนโลยีสนามระยะไกลประกอบด้วย 2 ชนิดหลักๆ คือ 1) การส่งกำลังด้วยคลื่นไมโครเวฟ หรือ คลื่นวิทยุ 2) การส่งกำลังด้วยเลเซอร์

1) การส่งกำลังด้วยคลื่นไมโครเวฟ หรือ คลื่นวิทยุ การส่งกำลังโดยใช้เทคโนโลยีสนามระยะไกล เป็นการส่งกำลังที่เก่าแก่ที่สุด และได้รับการพัฒนาเพื่อใช้ในการสื่อสารแบบไร้สาย ในปี ค.ศ. 1904 นิกอลา เทสลา (Nikola Tesla) ได้ทำการส่งกำลังแบบไร้สายเป็นครั้งแรกโดยใช้คลื่นวิทยุ ที่ความถี่ 150 kHz ระหว่าง ปี ค.ศ. 2003 ถึง 2008 Shinohara (N. Shinohara, 2013) และบริษัทนิสสันมอเตอร์ ในการพัฒนาระบบส่งกำลังไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยใช้คลื่นไมโครเวฟในการประจุแบตเตอรี่ ด้วยประสิทธิภาพ 76 % หลังปี ค.ศ. 2006 ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการประจุไฟฟ้าผ่านคลื่นไมโครเวฟในประเทศญี่ปุ่นอย่างกว้างขวาง ด้วยพฤติกรรมของคลื่นไมโครเวฟที่สามารถส่งกำลังสูงได้เป็นระยะไกล ในพื้นที่ที่เฉพาะเจาะจง และยังใช้การส่งกำลังแบบดังกล่าวในการส่งพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งจากดาวเทียมมายังพื้นโลก

2) การประจุไฟฟ้าไร้สายโดยใช้เลเซอร์ เทคโนโลยีเลเซอร์สามารถส่งผ่านกำลังได้ในระยะไกลแต่ก็มีข้อจำกัดทางด้านประสิทธิภาพ การประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าด้วยเลเซอร์เป็นกระบวนการที่เป็นไปได้ยากและซับซ้อน เนื่องจากกระบวนการแปรผันพลังงานไฟฟ้าไปส่งลำแสงเลเซอร์ และการแปรผันลำแสงเลเซอร์กลับเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะต้องใช้เซลล์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic cell) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงหรือโฟตอนเป็นพลังงานไฟฟ้า

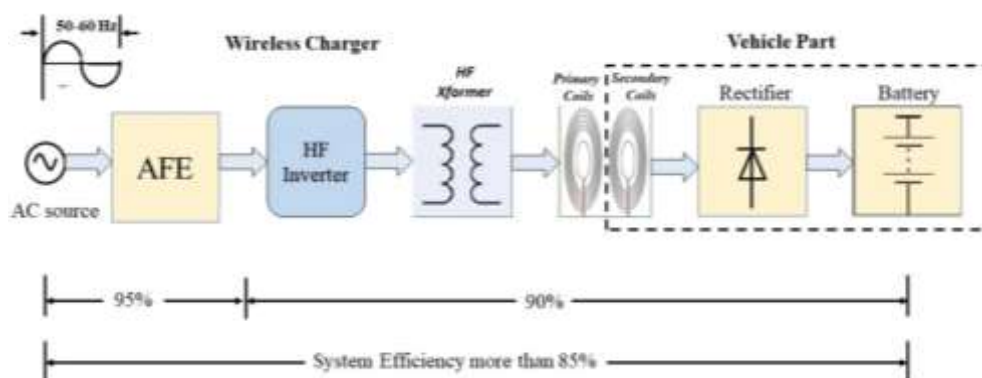
มีความซับซ้อน ใช้ต้นทุนสูง และถ้าหากทิศทางของลำแสงเลเซอร์ไม่ตรงกับตัวรับ หรือมีการส่งไม่ตรงกับทิศทางที่ต้องการจะทำให้เกิดความสูญเสียพลัง และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้

ค). เทคโนโลยีการประจุไฟฟ้าไร้สายและการประยุกต์ใช้

หลักการพื้นฐานของการประจุไฟฟ้าแบบไร้สายจะอาศัยหลักการเดียวกันกับหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) แต่จะใช้ช่องว่างอากาศแทนแกนเหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งออกตามลักษณะการใช้งานดังนี้ การประจุไฟฟ้าแบบยานยนต์สถิต (SWC) คือการประจุไฟฟ้าเมื่อยานยนต์ไฟฟ้าจอด หยุดนิ่งไม่มีการเคลื่อนที่ การประจุไฟฟ้าแบบยานยนต์เคลื่อนที่ (DWC) คือการประจุไฟฟ้าเมื่อยานยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปตามเส้นทาง หรือระหว่างการเดินทาง (L. A. Maglaras, et al., 2015) การประจุไฟฟ้าแบบยานยนต์เสมือนเคลื่อนที่ (QWC) คือการประจุไฟฟ้าขณะจอดชั่วคราวระหว่างการเดินทาง เช่นการประจุไฟฟ้าไร้สายในขณะจอดระหว่างรอสัญญาณไฟจราจร การจอดชั่วคราวของรถยนต์ส่งสาธารณะระหว่างรับส่งผู้โดยสาร ซึ่งการประจุไฟฟ้าแบบไร้สายที่กล่าวมาใช้การประจุไฟฟ้าผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดของการประจุไฟฟ้าในแต่ละแบบมีดังต่อไปนี้

1). การประจุไฟฟ้าไร้สายแบบยานยนต์สถิต

การประจุไฟฟ้าไร้สายแบบยานยนต์สถิตได้รับการพัฒนาและมีมาตรฐานรองรับ คือ SAE 2954 การประจุไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อตัวรับและตัวส่งจัดเรียงเป็นแนวเดียวกัน รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบเรโซแนนซ์เหนี่ยวนำ และขั้นตอนการแปรผันพลังงานและประสิทธิภาพของระบบ ในขั้นตอนแรกแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับแปรผันพลังงานสู่ระบบไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วงจรภาคหน้าแบบแอคทีฟ (Active Front End, AFE) และระบบปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง เพื่อให้การแปรผันมีประสิทธิภาพสูง จึงจำเป็นต้องใช้คอนเวอร์เตอร์ความถี่สูง และมีหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อทำการแยกระบบก่อนส่งผ่านกำลังเข้าสู่ขดลวดปฐมภูมิ ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงนี้จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสลับ ซึ่งเป็นไปตามกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) สนามแม่เหล็กดังกล่าวจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสลับความถี่สูงที่ฝั่งขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น จะต้องเชื่อมต่อกับวงจรชดเชยที่เหมาะสมกับเงื่อนไขการเรโซแนนซ์ ขั้นตอนสุดท้ายไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกเรียงกระแสด้วย เรกติไฟเออร์ประสิทธิภาพสูง (High Efficient Rectifier) เพื่อประจุไฟฟ้าให้แก่แบตเตอรี่ (J. M. Miller, et al., 2015)



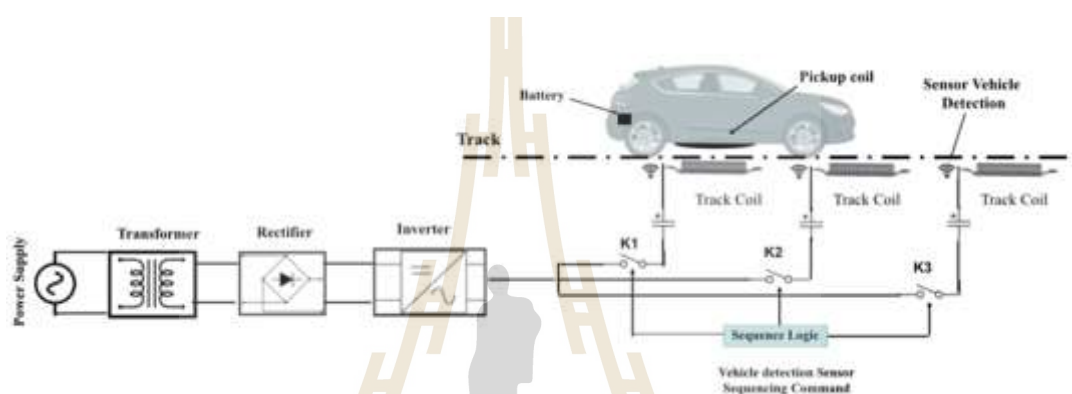
รูปที่ 2.7 แผนภาพการทำงานของระบบเรโซแนนซ์เหนี่ยวนำ

2). การประจุไฟฟ้าแบบไร้สายในขณะที่ยานยนต์เคลื่อนที่ (DWC)

การประจุไฟฟ้าแบบไร้สายในขณะที่ยานยนต์เคลื่อนที่ หรือขณะขับขี่โดยไม่ต้องหยุดหรือรอระหว่างการประจุไฟฟ้า แนวคิดดังกล่าวริเริ่มโดย Bolger และคณะ ในปี ค.ศ. 1978 (J. G. Bolger, et al., 1978) ในปัจจุบันผู้นำด้านการพัฒนาการประจุไฟฟ้าแบบไร้สายขณะยานยนต์เคลื่อนที่ในปัจจุบันคือสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีขั้นสูงเกาหลี (KAIST) โดยหลายปัญหาในเทคโนโลยีการประจุไฟฟ้าไร้สายได้รับแก้ไขโดยคณะวิจัยของสถาบันดังกล่าว ยกตัวอย่างเช่น การส่งกำลังอย่างต่อเนื่อง การควบคุมกระแสที่ความถี่สูงของอินเวอร์เตอร์ Choi และคณะ (S. Choi, et al., 2013) ได้ทำการประเมินว่า เทคโนโลยี OLEV สามารถที่จะปรับปรุงข้อด้อยยานยนต์ไฟฟ้าได้ เช่น เพิ่มระยะการขับขี่ ลดขนาดของแบตเตอรี่ ความถึงต้นทุนของแบตเตอรี่ และกาพัฒนาแบบจำลองของระบบประจุไฟฟ้าไร้สายขณะยานยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ โดยแผนภาพแสดงการทำงานของเทคโนโลยีดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.8

ขดลวดสำหรับส่งพลังงานจะติดตั้งบนผิวจราจร (On-Road Coils หรือ Track Coils) เพื่อส่งกำลังให้ขดลวดตัวรับที่ติดตั้งที่ยานยนต์ (Pick up Coil) อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะทำงานภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม ขดลวดสำหรับส่งพลังงานไฟฟ้าสำหรับการประจุไฟฟ้าไร้สายในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่มี 2 รูปแบบ โดยมีรูปร่างที่แตกต่างกัน คือ แบบยืดยาว (Stretched Tracks) และแบบก้อนหรือแบบแผ่นสั้น (Lumped Track) โดยตัวส่งแบบยืดยาวจะมีความยาวมากกว่าตัวรับ ส่วนตัวส่งแบบแผ่นสั้นจะมีความยาวใกล้เคียงกับตัวรับ ผู้นำด้านการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับตัวส่งแบบยืดยาวคือ สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีขั้นสูงเกาหลี โดยใช้ระบบ OLEV เป็นต้นแบบในการพัฒนา ส่วนตัวส่งแบบแผ่นสั้นมีคณะวิจัยจากมหาวิทยาลัยออกแลนด์ (Auckland University) เป็นผู้ริเริ่มในการพัฒนา (J. Shin, et al., 2014) สำหรับตัวส่งแบบแผ่นสั้นการส่งกำลังจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนการควบคุมของขดลวดตัวรับและตัวส่งซึ่งเรียกว่าการส่งกำลังแบบแบ่งเป็นส่วน (Segmentation) ข้อดีของ

วิธีการนี้ก็คือ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการส่งและหลีกเลี่ยงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากแผ่นตัวส่งที่อยู่ข้างเคียงและไม่ได้คู่ควบหรือไม่ได้จับคู่กับตัวรับ งานวิจัยก่อนหน้านี้มุ่งเน้นไปที่ขนาดของขดลวดและการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเอียง (Misalignment) ระหว่างขดลวดตัวรับและตัวส่ง สำหรับระบบการประจุไฟฟ้าไร้สายแบบยานยนต์สถิต (SWC) สำหรับระบบประจุไฟฟ้าไร้สายขณะยานยนต์เคลื่อนที่ (DWC) งานวิจัยจะมุ่งเน้นไปที่การประเมินค่าความยาวที่เหมาะสมของขดลวดตัวส่งแบบยืดหยุ่น สำหรับตัวส่งแบบแผ่นสั้นจะมุ่งเน้นที่การจดวงและการหาระยะห่างระหว่างแผ่นที่เหมาะสม ซึ่งจะสัมพันธ์กับการส่งพลังงาน ทิศทางและความเร็วของยานยนต์



รูปที่ 2.8 การประจุไฟฟ้าแบบไร้สายในขณะที่ยานยนต์เคลื่อนที่

ความเร็วของการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการประจุไฟฟ้าแบบไร้สายในขณะยานยนต์เคลื่อนที่ เนื่องจากตำแหน่งของขดลวดทุติยภูมิมีการเคลื่อนที่ ทำให้ฟลักซ์ (Flux) มีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันซึ่งส่งผลให้การส่งกำลังไฟฟ้ามีความผันผวน เมื่อขดลวดตัวรับและตัวส่งเคลื่อนที่มาในตำแหน่งที่วางตัวในแนวเดียวกันการส่งผ่านกำลังที่ตำแหน่งดังกล่าวจะมีค่าเป็น 100 % เมื่อรถเคลื่อนต่อไปในตำแหน่งที่ขดลวดตัวรับและตัวส่งอยู่เยื้องกันหรือตัวรับอยู่ระหว่างแผ่นขดลวดตัวส่ง 2 ตัว การส่งกำลังไฟฟ้าก็จะลดลง อุปสรรคที่สำคัญของการประยุกต์ใช้การประจุไฟฟ้าแบบไร้สายคือต้องใช้ต้นทุนสูงในการติดตั้งระบบ และต้องการช่องจราจรสำหรับติดตั้งระบบ ซึ่งเป็นเรื่องยากสำหรับการประยุกต์ใช้ในเขตเมืองที่มีช่องทางการจราจรจำกัดและคับคั่ง

3). การประจุไฟฟ้าไร้สายแบบยานยนต์กึ่งเคลื่อนที่ (QWC)

การประจุไฟฟ้าไร้สายแบบกึ่งเคลื่อนที่ คือการประจุไฟฟ้าไร้สายในขณะที่ยานยนต์เคลื่อนที่ช้า หรือหยุดชั่วคราว โดยโครงสร้างพื้นฐานมาจากระบบ SWC แต่สามารถทำงานได้คล้าย DWC ดังนั้น QWC จึงเป็นการนำข้อดีของทั้ง 2 ระบบมาใช้ Jang และคณะ (Y. J. Jang, et al., 2016) ได้ทำการสร้างแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความคุ้มค่าด้านการลงทุนของระบบ SWC DWC และ QWC สำหรับระบบขนส่งสาธารณะ ระบบประจุไฟฟ้าแบบ QWC มีความเหมาะสมกับ

การติดตั้งบริเวณที่มีสัญญาณไฟจราจร และมีการควบคุมการประจุไฟฟ้าที่สัมพันธ์กันกับระบบสัญญาณไฟจราจร และใช้งบประมาณในการลงทุนเริ่มแรกน้อยกว่าระบบ DWC Mohamed และคณะ (A. A. S. Mohamed, et al., 2017) สร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาความยืดหยุ่นของการใช้งานระบบ QWC โดยแบบออกเป็น 3 กรณีที่แตกต่างกัน 1) ประจุไฟฟ้าด้วยระดับกำลังคงที่ 2) ประจุไฟฟ้าแบบกำลังแปรผัน (Variable power charging) 3) กรณียานยนต์ส่งกำลังสู่โครงข่ายไฟฟ้ากำลัง (Vehicle to grid, V2G) และ โครงข่ายไฟฟ้ากำลังสู่ยานยนต์ (Grid to vehicle, G2V) ผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถเพิ่มระยะเวลาขับขี่ได้อย่างมีนัยสำคัญในรถบัสโดยสาร โดยเฉพาะในบริเวณที่มีการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร ซึ่งระบบ KAIST OLEV เป็นระบบ DWC ที่ประสบความสำเร็จในการทดสอบใช้งานจริง ซึ่งในกรณีที่มีการประจุไฟฟ้าในขณะที่หยุดรถชั่วคราวก็ถือได้ว่าระบบดังกล่าวคือระบบ QWC ได้เช่นกัน นอกจากนี้ รูปทรง ระยะห่าง วงจรชดเชย (Compensation topology) ความถี่ตำแหน่งของตัวรับและตัวส่ง (Alignment) และการออกแบบขดลวด (Coil design) เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการคู่ควบ และประสิทธิภาพของระบบ และประสิทธิภาพของ DWC จะขึ้นอยู่กับความเร็วของยานยนต์ไฟฟ้าที่เคลื่อนที่บนช่องทางที่มีการติดตั้งตัวส่งกำลัง ดังนั้นในการออกแบบระบบการประจุไฟฟ้าแบบไร้สายจึงจำเป็นต้องหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อพิจารณาความถี่และระดับของการส่งกำลังไฟฟ้าจะพบว่าทั้ง 2 ค่า มีผลกระทบต่อกัน และเป็นปัจจัยที่สำคัญที่จะต้องได้ออกแบบหรือปรับค่าให้เหมาะสมเพื่อให้ระบบการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายมีประสิทธิภาพสูงสุด ถ้าหากใช้ความถี่ในการส่งเพิ่มขึ้น จะทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพในการส่งเพิ่มขึ้น แต่จะส่งผลให้การส่งกำลังไฟฟ้าได้จำกัด ปัจจุบันกำลังอยู่ระหว่างการพัฒนาในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการส่งกำลังไฟฟ้าและยังไม่เสร็จสมบูรณ์ ตารางที่ 2.2 แสดงการศึกษา และวิจัย ของบริษัท และมหาวิทยาลัยเพื่อหาค่าการส่งกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับระบบประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย (A. Ahmad, et al., 2018)

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างองค์กรที่กำลังวิจัยเกี่ยวกับการส่งกำลังแบบไร้สาย

ชื่อองค์กร	ความถี่ (kHz)	ประสิทธิภาพ (%)	ระยะส่งกำลัง (cm)	ปี ค.ศ.	กำลัง (kW)
KAIST	20	71 - 85	1-20	2013	60 (OLEV buses)
	20	80	15	2014	5-15
	20	71	20	2015	22

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างองค์กรที่กำลังวิจัยเกี่ยวกับการส่งกำลังแบบไร้สาย (ต่อ)

ชื่อองค์กร	ความถี่ (kHz)	ประสิทธิภาพ (%)	ระยะส่งกำลัง (cm)	ปี ค.ศ.	กำลัง (kW)
UM Dearborn	80	96	20	2014	7.7
	95	95.3	15	2015	6
	1000	95	15	2015	3.3
NYU	85	91	21	2015	25
Tokohu University	360	75	0-20	2012	15-18
Saitama University	50	94	7	2011	1.5-3
University of Auckland	20	NA	20	2011	2
	20	NA	10-25	2013	2-7
	85	91.3	10	2015	1
ETH Zurich	1000	96.5	52	2015	5
	85	95.8	10-20	2015	50

2.2.3 รูปแบบความเร็วของยานยนต์ไฟฟ้า (Electric vehicle's velocity trajectory)

การหารูปแบบความเร็วเพื่อการใช้พลังงานที่เหมาะสมสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็น สำหรับการเพิ่มระยะทางการขับขี่ซึ่งเป็นจุดด้อยของยานยนต์ไฟฟ้า และเพื่อลดการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดอย่างฉับพลันซึ่งส่งผลกระทบต่อกรอกแบบและขนาดที่เหมาะสมของระบบสะสมพลังงาน ดังนั้นจึงได้ทำการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับ ขั้นตอนวิธีการ (Algorithm) ในการกำหนดรูปแบบของความเร็ว (Velocity trajectory or velocity profile) ที่เหมาะสมเพื่อใช้พลังงานในการขับเคลื่อนน้อยที่สุดในเส้นทางที่ต้องการ

ก่อนจะเริ่มทำการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับรูปแบบความเร็วของยานยนต์ไฟฟ้า จะต้องกล่าวถึงการแบ่งประเภทของสภาพการจราจรที่ใช้อ้างอิงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยทั่วไปรูปแบบของความเร็ว (Vehicle trajectory) ของแต่ละเส้นทางจะเป็นลักษณะเฉพาะของการขับขี่บนเส้นทางนั้น ซึ่งจะผนวกเอาปัจจัยที่มีผลกระทบ กับรูปแบบการเคลื่อนที่ เช่น สภาพการจราจร ชนิดของยานยนต์ และความเร็วสูงสุดที่กฎหมายกำหนดในแต่ละเส้นทาง เป็นต้น ดังนั้น การจะทำการเปลี่ยนรูปแบบของความเร็วเพื่อหาค่าที่เหมาะสม จึงต้องขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของการจราจร

โดยแบ่งออกเป็น 2 แบบดังนี้ คือ สภาพการจราจรแบบเปิด (Open environment) และสภาพการจราจรแบบปิด (Close environment) (Y. J. Jang, E. S. Suh and J. W. Kim, 2016) สภาพการจราจรแบบเปิด คือสภาพการจราจรที่มีผลกระทบจากปัจจัยภายนอกมาก ตัวอย่างเช่น การจราจรบนถนนสาธารณะที่มีการจราจรหนาแน่น ซึ่งจะได้รับผลกระทบต่อรูปแบบความเร็วจากยานยนต์อื่นที่ใช้ถนนร่วมกัน สัญญาณไฟจราจร และคนเดินถนน เป็นต้น ซึ่งการปรับปรุงค่าที่เหมาะสมของรูปแบบความเร็ว เพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้งานจริงจะเป็นไปได้ยาก หรืออาจเป็นไปได้เลย ส่วนการจราจรแบบปิด คือสภาพการจราจรที่ยานยนต์ที่เราศึกษาได้รับผลกระทบจากภายนอกน้อย เช่น ถนนในส่วนสาธารณะ ถนนในสวนสัตว์ ถนนในมหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นการขับขี่ในพื้นที่ปิด และถนนสาธารณะ หรือถนนหลวง (Highway traffic condition) ที่มีการจราจรที่เบาบาง ก็จะถือว่าเป็นเงื่อนไขการขับขี่ในสภาพแวดล้อมแบบปิดได้ การปรับปรุงรูปแบบการขับขี่เพื่อการประหยัดพลังงานและการประยุกต์ใช้กับเส้นทางที่ศึกษา จะสามารถทำได้จริงในสภาพแวดล้อมดังกล่าว จะสังเกตได้ว่ารูปแบบความเร็วที่สร้างขึ้นใหม่มีความแตกต่างจากรูปแบบความเร็วเดิม หรือรูปแบบความเร็วอ้างอิงมาก ต่อไปจะกล่าวถึงบทความทางวิชาการที่ศึกษาผลกระทบของรูปแบบการใช้ความเร็วของยานยนต์ที่มีต่อการประหยัดพลังงานและการปล่อยมลพิษ

บทความวิจัยฉบับนี้ (Mierlo, et al., 2004) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของใช้พลังงานและการปล่อยมลพิษของยานยนต์ต่อรูปแบบการขับขี่ โดยรวมผลกระทบจากสภาพการจราจรด้วยการวัดค่า ทดสอบการปล่อยมลพิษ และการทำแบบจำลองการใช้พลังงานและการปล่อยมลพิษ ต่อรูปแบบการขับขี่ที่แตกต่างกัน เช่นรูปแบบการขับขี่ที่เร่ร่อน (Sportive) และการขับขี่แบบประหยัด (Eco-driving) โดยจะทำการแยกวิเคราะห์ตามรูปแบบการขับขี่ เนื่องจากผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการลดขนาดของเครื่องยนต์ การลดน้ำหนักบรรทุกของรถยนต์ส่วนบุคคล การใช้ระบบหยุดและเริ่มทำงานของเครื่องยนต์ขณะจอดชั่วคราว มีผลกระทบต่อการปล่อยมลพิษและการใช้พลังงานของยานยนต์ได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังมีปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือรูปแบบของความเร็วในการขับขี่ การทดสอบทำโดยทำการฝึกอาสาสมัครจำนวน 24 คนทำการขับขี่โดยใช้รูปแบบความเร็วแบบใหม่ ผลการทดสอบและเก็บข้อมูลพบว่า รูปแบบการขับขี่มีผลกระทบต่อการใช้พลังงานและการปล่อยมลพิษอย่างมีนัยสำคัญ

เพื่อหา รูปแบบความเร็วที่ทำให้ยานยนต์ใช้พลังงานที่น้อยที่สุด โดยคำนึงถึงเงื่อนไขสถานะของแบตเตอรี่ (State of charge : SOC) และเวลาในการขับขี่ (T. van Keulen, et.al., 2010) ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการประหยัดพลังงานด้วยการนำพลังงานจลน์และพลังงานศักย์กลับมาใช้โดยการนำกลับมาเก็บในแบตเตอรี่ระหว่างการเบรกหรือการขับขี่ขณะลงเขา (Driving downhill) และนำพลังงานที่เก็บสะสมไว้มาใช้เป็นพลังงานขับเคลื่อน โดยใช้ฟังก์ชัน fmincon ของโปรแกรม MATLAB ในการหาค่าความเร็วที่เหมาะสมกับการขับขี่ในขณะลง

เขา ผลการทดสอบการเก็บข้อมูลรูปแบบความเร็วของยานยนต์ผ่าน ระบบที่ช่วยบอกตำแหน่งที่อยู่บนพื้นผิวโลก โดยอาศัยสัญญาณดาวเทียม หรือ จีพีเอส (Global Positioning System, GPS) พบว่าสามารถประหยัดพลังงานได้ 5% เมื่อเทียบกับการควบคุมการขับขี่แบบกำหนดค่าความเร็วคงที่ (Cruise controller with constant velocity setpoint) จากการเลือกเส้นทางขับขี่ที่มีระดับความชันสูง ผู้วิจัยได้ทำการสรุปรูปแบบในการขับขี่ไว้ว่าความจะทำการลดความเร็วในขณะที่ใกล้ถึงยอดเขาหรือยอดของทางชัน แล้วทำการเร่งความเร็วในขณะที่ลงเขา จะสังเกตได้ว่ารูปแบบของความเร็วที่สร้างขึ้นใหม่มีรูปแบบที่ใกล้เคียงกับความเร็วอ้างอิงที่ใช้เปรียบเทียบ

การใช้กำลังงานและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่เป็นปัจจัย 2 ที่สำคัญในการพัฒนาระบบขนส่งด้วยยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก (4 ที่นั่ง) ที่มีควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยตัวเอง (Autonomy) ด้วยเหตุนี้ (Carlos Flores, et.al., 2015) ได้ทำการพัฒนาการออกแบบและประยุกต์ใช้ระบบกำเนิด หรือสร้างรูปแบบความเร็วของการเคลื่อนที่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้หลักการของการคำนวณค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อการใช้พลังงานอย่างประหยัดที่สุดโดย ซึ่งไม่ต้องการการเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ใด ๆ ในยานยนต์ไฟฟ้า (เช่น แบตเตอรี่ มอเตอร์ หรือระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง) การทดสอบจะใช้เส้นทางจริงในการทดสอบและทำการทดสอบหลายรอบแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยจะทำการแบ่งเส้นทางออกเป็นช่วงย่อย แบ่งตามค่าความชันของเส้นทาง แล้วสร้างเส้นทางอ้างอิงเพื่อให้ผู้ใช้ขับขี่ตามรูปแบบความเร็วดังกล่าว ผลการทดสอบ โดยทำการเปรียบเทียบกับกรณีใช้คนเป็นผู้ขับขี่และใช้ระบบขับอัตโนมัติตามรูปแบบความเร็วอ้างอิงที่สร้างขึ้นพบว่า วิธีการการสร้างรูปแบบความเร็วนี้สามารถประหยัดการใช้พลังงาน คิดเป็น 17 % เมื่อเทียบกับการใช้คนเป็นผู้ขับขี่ สำหรับเส้นทางดังกล่าว

ผลงานวิจัยที่เสนอวิธีการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าด้วยการหารูปแบบความเร็วที่ใช้พลังงานอย่างประหยัด เพื่อเพิ่มระยะทางการขับขี่ให้เพิ่มมากขึ้น (Driving range) (S. Rohkämper, M. Hellwig and W. Ritschel, 2017) บทความฉบับนี้เสนอวิธีการวางแผนความเร็วที่เหมาะสมเพื่อหารูปแบบของความเร็ว (Velocity trajectory) โดยใช้แบบจำลองยานยนต์อย่างง่าย และใช้ขั้นตอนวิธีกำหนดการพลวัต (Dynamic programming algorithm) โดยแบ่งเส้นทางขับขี่ออกเป็นช่วงย่อยเท่ากัน ส่วนละ 10 m โดยอัลกอริทึมจะหาค่าความเร็วที่เหมาะสมของแต่ละส่วน แล้วกำหนดรูปแบบความเร็วสูงสุด และรูปแบบความเร็วที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ ผลการจำลองจากแบบจำลองสถิต (Quasi-static approach) พบว่าเมื่อใช้ความเร็วต่ำรูปแบบความเร็วที่เหมาะสมจะใกล้เคียงกับรูปแบบความเร็วสูงสุดที่กำหนดไว้ และเมื่อใช้ความเร็วสูงขึ้นจนถึงจุดที่แรงต้านจากอากาศมีค่ามากขึ้น ทำให้ต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนมากขึ้น ทำให้ฟังก์ชันต้นทุน (Cost function) ของพลังงานสูงกว่าต้นทุนของเวลาที่ผู้วิจัยกำหนด ก็จะเปลี่ยนมาใช้ความเร็วที่ต่ำ และมีค่าใกล้เคียงกับขอบเขตต่ำสุดของความเร็วที่กำหนด นอกจากนี้ผลงานวิจัยฉบับนี้ได้มีการนำเสนอการ

เปรียบเทียบผลการใช้พลังงานจากแบบจำลองระหว่างการทำลองโดยใช้แบบจำลองสถิตและแบบจำลองพลวัต เมื่อเปรียบเทียบกับค่าวัดพบว่าให้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกัน แต่การจำลองแบบสถิตมีข้อได้เปรียบเมื่อนำไปใช้ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะทำให้มีการลู่เข้าสู่คำตอบและใช้เวลาน้อยกว่า

ในบทความฉบับนี้ (Andreas Weißmann, et.al., 2017) ได้ทำการใช้การควบคุมความเร็วของยานยนต์แบบปรับตัวได้โดยใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด (An energy-optimal adaptive cruise control) โดยใช้แบบจำลองการคำนวณการควบคุมล่วงหน้า (Model predictive control, MPC) โดยใช้กำหนดการพลวัต (Dynamic programming) (Elbert et al., 2013) ในการค้นหาความเร็วและเวลาที่เหมาะสมกับสภาพเส้นทาง เมื่อสร้างรูปแบบการเคลื่อนที่หรือรูปแบบของความเร็วทั้งเส้นทางแล้วในขั้นตอนนี้จะคำนวณก่อนการขับขี่ (Offline calculation) ก็จะส่งรูปแบบความเร็วตามเวลาจริง (Online) ในขณะขับขี่ เพื่อผู้ขับขี่ตามรูปแบบความเร็วให้ใกล้เคียงที่สุดเท่าที่จะทำได้ แล้วทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบโดยการใช้ข้อมูลการขับขี่จริงของเส้นทางอ้างอิงกับขั้นตอนวิธีการจำลองรูปแบบความเร็วใหม่ที่มีรวมประมาณค่าผลกระทบของสภาพจราจร ผลการจำลองพบว่าถึงแม้ผลจะมีผลกระทบจากสภาพการจราจร ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ตามรูปแบบความเร็วที่เหมาะสมที่สุดได้ แต่แบบจำลองก็ยังสามารถลดการใช้พลังงานได้ 7.8 % เมื่อเทียบกับการขับขี่ปกติ

2.3 สรุป

รายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ซึ่งการศึกษาวรรณกรรมทางวิชาการดังกล่าวช่วยให้ทราบถึง ระเบียบวิธีของผู้วิจัยท่านอื่น ปัญหา ข้อเสนอแนะ โดยงานวิจัยดังกล่าวจะใช้ในการอ้างอิง และดำเนินการต่อยอดการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยานยนต์ไฟฟ้าใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนและใช้ระบบสะสมพลังงานซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้หมายถึงแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุสองชิ้นเป็นแหล่งจ่ายและสะสมพลังงาน ซึ่งยานยนต์ไฟฟ้ามีข้อได้เปรียบยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในหลายประการตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 การจำลองการเคลื่อนที่ และการออกแบบยานยนต์ไฟฟ้า จำเป็นต้องทราบถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 4 หัวข้อหลัก ได้แก่ หลักการของการขับเคลื่อนและการเบรก ยานยนต์ไฟฟ้าและส่วนประกอบ กำลังและพลังงานของระบบสะสมพลังงาน พลังงานคืนกลับจากการเบรก โดยรายละเอียดดังนี้

3.2 หลักการของการขับเคลื่อนและการเบรก

การจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนและการเบรกที่ถูกต้องเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบและศึกษาลักษณะการใช้พลังงานและกำลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า ผลจากการจำลองสามารถนำไปกำหนดพิกัดของระบบในยานยนต์ไฟฟ้าได้ทั้ง 3 ระบบ ได้แก่ ระบบขับเคลื่อนและส่งกำลัง ระบบจ่ายและสะสมพลังงาน และระบบเสริม ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้หลักการการเคลื่อนที่ หรือพลศาสตร์ของยานยนต์ เพื่อประมาณค่ากำลังลากจูงและความเร็วของยานยนต์ รวมถึงสมรรถนะและแรงขับเคลื่อน

3.2.1 พลศาสตร์ของยานยนต์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานยนต์ไฟฟ้า โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอการจำลองยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้งานบนผิวถนน ดังแสดงผังรูปที่ 3.1 เมื่อยานยนต์มวล M_v เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ขึ้นทางชันที่ทำมุม α กับพื้นราบ แรงขับเคลื่อนที่จะทำให้รถยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าคือ F_{te} ซึ่งแรงขับเคลื่อนจะต้องเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่จากการหมุนของล้อ (Rolling resistance) หรือ F_{rr} แรงต้านจากอากาศ (Aerodynamic drag) F_{ad} และแรงต้านจากการไต่ทางชัน F_{rg} และแรงที่จะทำให้รถยนต์มีความเร่ง (The acceleration force) ในกรณีที่มีความเร็วไม่คงที่ F_{acc} (Mi Chris, et.al, 2011)

แรงต้านการเคลื่อนที่จากการหมุนของล้อเกิดการแรงเสียดทานระหว่างผิวของยางรถยนต์และผิวถนน ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานการหมุนระหว่างยางและผิวถนน C_f แรงที่กระทำในแนวตั้งฉาก F_N เนื่องจากน้ำหนักของรถยนต์และแรงโน้มถ่วงของโลก $M_v g$ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อรถยนต์หยุดนิ่งหรือไม่มีแรงกระทำระหว่างยางรถยนต์ และผิวถนนก็จะไม่เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ขึ้น ดังนั้นสมการของแรงต้านการเคลื่อนที่จากการหมุนสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.1 โดยค่าสัมประสิทธิ์ C_f สามารถพิจารณาได้ดังตารางที่ 3.1

$$F_{rr} = -F_{te} \text{ ถ้า } v = 0 \text{ และ } F_{te} < C_f M_v g \cos \alpha \text{ มิฉะนั้น}$$

$$F_{rr} = -C_f M_v g \cos \alpha \quad (3.1)$$

แรงต้านอากาศจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอากาศ ρ (kg/m^3) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอากาศ C_d พื้นที่ด้านหน้าของรถยนต์ A และความเร็วของรถยนต์ v สมการสำหรับแรงต้านอากาศสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.2 โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอากาศ C_d สามารถพิจารณาได้ดังตารางที่ 3.2

$$F_{ad} = -0.5 \rho C_d A v^2 \quad (3.2)$$

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการหมุน (Mi Chris, et.al, 2011)

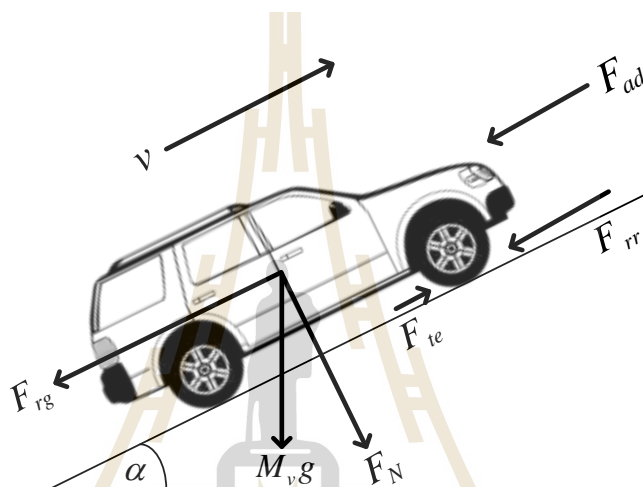
ผิวจราจร	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการหมุน (C_f)
ยางรถยนต์บนถนนคอนกรีต	0.013
ยางรถยนต์บนถนนลูกรัง	0.020
ถนนลาดยาง	0.025
ถนนดิน	0.050
สนามหญ้า	0.1-0.35
ล้อบนรางเหล็ก	0.001-0.002

แรงที่เกี่ยวข้องกับความลาดเอียงของพื้นผิวจราจรขึ้นอยู่กับมวลของรถยนต์ M_v มุมของผิวถนนที่กระทำกับพื้นราบ α และความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก g สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.3

$$F_{rg} = -M_v g \sin(\alpha) \quad (3.3)$$

แรงที่ทำให้เกิดความเร่ง คือแรงที่จะทำให้ยานยนต์มีความเร่ง ซึ่งอยู่ภายใต้กฎข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's second law) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็นสมการเชิงเส้นดังสมการที่ 3.4

$$F_{acc} = M_v a = M_v \frac{dv}{dt} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.1 แผนภาพวัตถุอิสระของแบบจำลอง

ดังนั้นแรงที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนรถยนต์คือผลรวมของแรงต้านที่ได้กล่าวมาดังสมการที่ 3.5





$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{rg} + F_{acc} \quad (3.5)$$

จากสมการที่ 3.4 และ 3.5 สามารถหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ยานยนต์ไฟฟ้าต้องการได้ดังนี้

$$P_e = \frac{v}{\eta_t} (F_{rr} + F_{ad} + F_{rg} + F_{acc}) \quad (3.6)$$

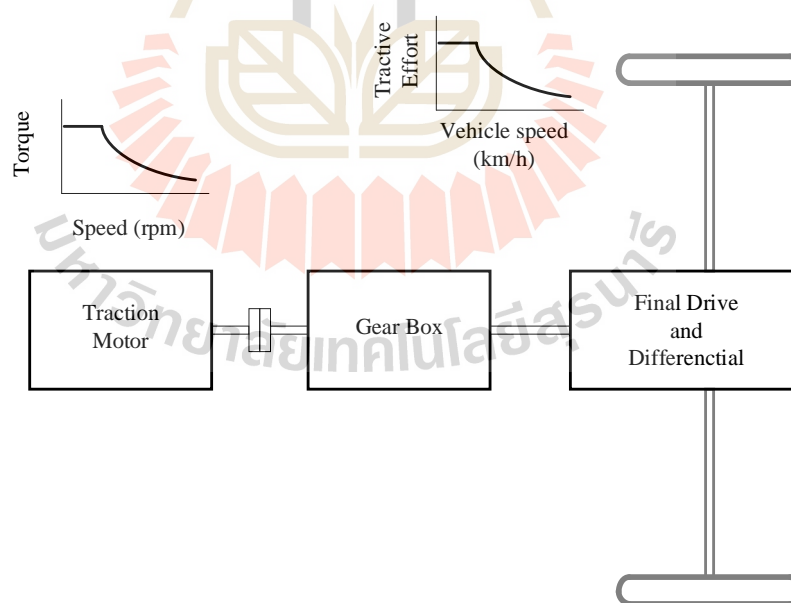
เมื่อ η_t คือ ค่าประสิทธิภาพรวม ซึ่งประกอบไปด้วย $\eta_{motor} \times \eta_{conv} \times \eta_{mech}$ และให้มีค่าเป็น 0.88 0.98 และ 0.98 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอากาศ (Mi Chris, et al, 2011)

ชนิดของยานยนต์	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอากาศ (C_d)
 รถเปิดประทุน	0.5-0.7
 รถตู้	0.5-0.7
 รถยนต์นั่งส่วนบุคคล	0.4-0.55
 รถบรรทุก	0.8-1.5
 รถบัส	0.6-0.7
 รถจักรยานยนต์	0.6-0.7

3.2.2 กำลังลากจูงและความเร็วของยานยนต์

ระบบกำลังขับเคลื่อน (Power trains) หมายถึงชุดอุปกรณ์หลักที่ส่งกำลังขับเคลื่อน ตั้งแต่ ต้นกำลังคือมอเตอร์ลากจูง (Traction motor) ระบบส่งกำลัง (Transmission) หรือชุดเกียร์ (Gear box) เฟืองขับ (Drive shafts) เฟืองท้าย (Differential gear) เฟืองขับตัวสุดท้าย (Final drive) และล้อ (Wheels) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ระบบกำลังขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้า

ชุดเกียร์ประกอบไปด้วยชุดอัตราทดเกียร์จากเพลาด้านเข้า (Input Shaft) และเพลาด้านออก (Output Shaft) เพื่อปรับลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานหรือความต้องการของโหลดตามที่ได้ออกแบบไว้ เพื่องขับตัวสุดท้ายจะทำหน้าที่ลดความเร็วและจ่ายแรงบิดลงสู่ล้อที่ใช้ในการขับเคลื่อนผ่านเฟืองท้าย

แรงบิดที่ล้อเพื่อทำการขับเคลื่อน ซึ่งถูกส่งถ่ายโดยต้นกำลัง สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.7

$$T_w = i_g i_o \eta_t T_p \quad (3.7)$$

เมื่อ i_g คือ อัตราทดฟันเฟืองของระบบส่งกำลัง (Transmission) หมายถึงความเร็วด้านเข้า (Input Rotating Speed) ต่อความเร็วด้านออก (Output Rotating Speed) i_o คืออัตราทดเฟืองของเฟืองขับตัวสุดท้าย η_t ประสิทธิภาพรวมของระบบขับเคลื่อนจากต้นกำลังสู่ล้อ และ T_p แรงบิดด้านออกจากต้นกำลัง

แรงลากจูง (Tractive Effort) ที่เกิดขึ้นที่ล้อสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 และอธิบายได้ด้วยสมการที่ 3.8

$$F_t = \frac{T_w}{r_d} \quad (3.8)$$

แทนค่า สมการที่ 3.7 ในสมการที่ 3.8 จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ 3.9

$$F_t = \frac{i_g i_o \eta_t T_p}{r_d} \quad (3.9)$$

ความเสียหายในฟันเฟืองและความสูญเสียในแบริ่งและความสูญเสียทางกลสามารถแทนได้ด้วยค่าประสิทธิภาพทางกลของส่วนประกอบต่าง ๆ โดยฟันเฟืองแต่ละคู่มักมีประสิทธิภาพประมาณ 95-97% ส่วนแบริ่งและข้อต่อมีประสิทธิภาพประมาณ 98-99% ชุดเกียร์มีค่าประสิทธิภาพประมาณ 85-90% และชุดเกียร์ที่มีอัตราทดสูงมีประสิทธิภาพประมาณ 75-80% ความเร็วรอบที่ล้อ (rpm) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.10)

$$N_w = \frac{N_p}{i_g i_o} \quad (3.10)$$

เมื่อ N_p คือความเร็วรอบ (rpm) ของมอเตอร์ และ r_d คือรัศมีวงล้อ ต่อจากนั้นจะส่งผ่านระบบส่งกำลังโดยผ่านชุดเกียร์เพื่อปรับลักษณะของแรงบิดและความเร็ว (Torque Converter) และผ่านเฟืองขับตัวสุดท้าย ดังนั้นความเร็วของยานยนต์มีค่าดังสมการที่ 3.11

$$V = \frac{\pi N_w r_d}{30} \quad (\text{m/s}) \quad (3.11)$$

แทนค่า สมการที่ 3.10 ลงในสมการที่ 3.11 จะได้ดังสมการที่ 3.12

$$V = \frac{\pi N_p r_d}{30 i_g i_o} \quad (\text{m/s}) \quad (3.12)$$

3.2.3 สมรรถนะและแรงขับเคลื่อน

สมรรถนะของยานยนต์จะบ่งชี้ด้วยค่าความเร็วสูงสุดคงที่ (Maximum Cruising Speed) ค่าสมรรถนะในการไต่ทางชัน (Gradeability) และสมรรถนะในการเร่ง (Acceleration) การประเมินค่าสมรรถนะของยานยนต์ไฟฟ้าจะอยู่บนพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างแรงลากจูงและความเร็วของยานยนต์ และแรงต้านที่กระทำกับยานยนต์

3.2.3.1 ความเร็วสูงสุดของยานยนต์ไฟฟ้า

สามารถให้คำจำกัดความได้ว่า เป็นความเร็วคงที่ของยานยนต์ ขณะขับเคลื่อนด้วยกำลังสูงสุดของมอเตอร์ขับเคลื่อนบนเส้นทางราบ (Flat Road) ความเร็วสูงสุดของยานยนต์ไฟฟ้าจะถูกกำหนดโดยแรงลากจูงและแรงต้านการเคลื่อนที่ดังสมการ 3.13

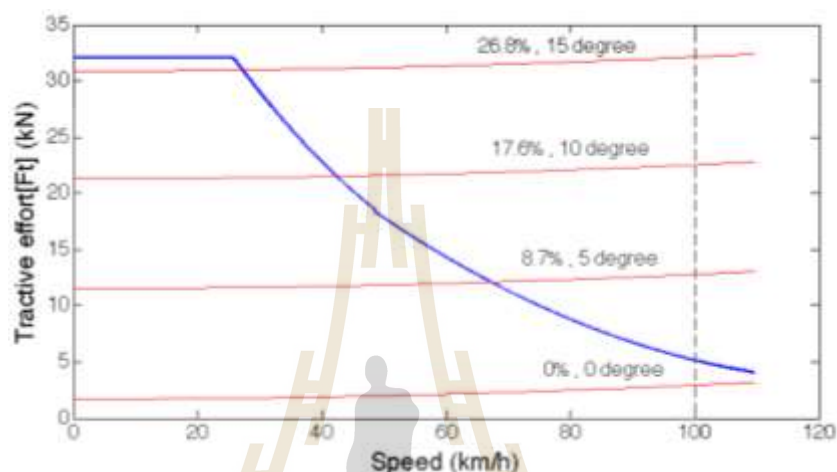
$$\frac{i_g i_o \eta_t T_p}{r_d} = M g f_r \cos \alpha + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 \quad (3.13)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 3.13 พบว่ายานยนต์ไฟฟ้าจะมีความเร็วสูงสุดเมื่อพจน์ด้านซ้ายมือเท่ากับพจน์ด้านขวามือ หรือที่จุดที่แรงลากจูงและแรงต้านมีค่าเท่ากัน ซึ่งก็คือจุดตัดของเส้น โคง้ของแรงลากจูงและเส้น โคง้ของแรงต้านการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 3.3

หากไม่มีจุดตัดของเส้น โคง้ระหว่างเส้น โคง้ของแรงลากจูงและเส้น โคง้ของแรงต้านการเคลื่อนที่ สาเหตุเนื่องมาจากกำลังของมอเตอร์มีมาก หรือมอเตอร์มีขนาดใหญ่ หรืออัตราทดของเกียร์มีค่าสูง ในกรณีนี้ ความเร็วสูงสุดของยานยนต์ไฟฟ้าจะถูกกำหนดโดยความเร็วของมอเตอร์เมื่อขับด้วยกำลังสูงสุด จากสมการที่ 3.12 ความเร็วสูงสุดของยานยนต์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นดังสมการที่

$$V_{max} = \frac{\pi N_p \max r_d}{30 i_{gmin} i_o} \quad (\text{m/s}) \quad (3.14)$$

เมื่อ $N_p \max$ และ i_{gmin} คือ ความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ และอัตราทดเกียร์ต่ำสุดของระบบส่งกำลังตามลำดับ



รูปที่ 3.3 แรงลากของมอเตอร์ขับเคลื่อน ความเร็ว และแรงด้านการเคลื่อนที่

3.2.3.2 ความสามารถในการไต่ทางชัน (Gradeability)

ความสามารถในการไต่ทางชันหมายถึงระดับหรือมุมที่ยานยนต์สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปโดยสามารถรักษาความเร็วให้คงที่ได้ สำหรับยานยนต์เชิงพาณิชย์ขนาดหนัก เช่นรถโดยสารไฟฟ้า ความสามารถไต่ทางชันหมายถึงระดับหรือมุมของระดับที่สูงที่สุดที่ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถผ่านไปได้ในทุกช่วงความเร็ว สามารถหาค่ามุมไต่ทางชันได้จากสมการที่ 3.15

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{d - f_r \sqrt{f_r^2 - d^2 + 1}}{1 + f_r^2} \right) \quad (3.15)$$

เมื่อ

$$d = \frac{i_g i_o \eta_t T_p / r_d - 1/2 \rho_a C_D A_f V^2}{Mg}$$

นอกจากนี้ความสามารถในการไต่ทางชันยังสามารถหาได้จากการสร้างแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงลากจูงและแรงต้านทางการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 3.3

3.2.3.3 สมรรถนะในการเร่ง (Acceleration Performance)

สมรรถนะในการเร่ง หมายถึงเวลาที่ใช้ในการเร่งและระยะทาง โดยเริ่มจากหยุดนิ่ง ไปสู่ความเร็วค่าหนึ่ง (เช่น จาก 0 ถึง 90 km/h) บนพื้นราบ จากกฎข้อที่สองของนิวตัน ความเร่งของยานยนต์ไฟฟ้าสามารถเขียนในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 3.16

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{F_t - F_{rr} - F_{ad}}{M} \quad (3.16)$$

$$= \frac{i_g i_o \eta_t T_p / r_d - M g f_r - 1/2 \rho_a C_D A_f V^2}{M} \quad (3.17)$$

จากสมการที่ 3.17 เวลาที่ใช้ในการเร่ง t_a และระยะทางขณะทำการเร่ง S_a จากความเร็วต่ำ V_1 สู่ความเร็วสูง V_2 สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังสมการที่ 3.18 และ 3.19 ตามลำดับ

$$t_a = \int_{V_1}^{V_2} \frac{M}{i_g i_o \eta_t T_p / r_d - M g f_r - 1/2 \rho_a C_D A_f V^2} dV \quad (3.18)$$

$$S_a = \int_{V_1}^{V_2} \frac{MV}{i_g i_o \eta_t T_p / r_d - M g f_r - 1/2 \rho_a C_D A_f V^2} dV \quad (3.19)$$

สมการที่ 3.18 และสมการที่ 3.19 ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Methods) ในการหาผลเฉลย

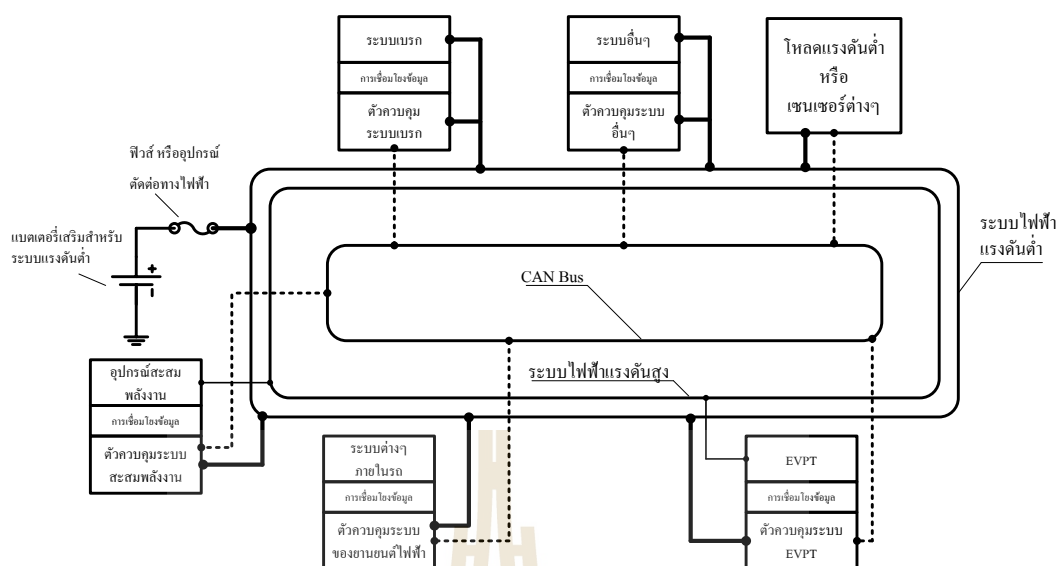
3.3 ยานยนต์ไฟฟ้าและส่วนประกอบ

เมื่อเปรียบเทียบยานยนต์ไฟฟ้ากับยานยนต์ที่ใช้กำลังขับเคลื่อนจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน จะพบว่ายานยนต์ไฟฟ้ามีความซับซ้อนน้อยกว่า เนื่องจากไม่ต้องมีระบบที่ซับซ้อนในการควบคุมการฉีดจ่ายเชื้อเพลิง รวมถึงระบบส่งกำลังก็มีส่วนประกอบที่ลดลง ทำให้ระบบมีส่วนประกอบน้อยกว่า ซับซ้อนน้อยกว่าทำให้มีความน่าเชื่อถือมากกว่า นอกจากนี้ยานยนต์ไฟฟ้ายังไม่มีมลภาวะ (Zero emission vehicle) โดยเฉพาะมลภาวะทางอากาศและมลภาวะทางเสียง และถ้าหากมีการจัดการที่ดีกับแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ หรือหมดอายุการใช้งานแล้ว โดยมีกระบวนการนำไปทำลายที่ถูกต้องแล้วยานยนต์ไฟฟ้าก็จะไม่มีการปล่อยมลภาวะสู่สิ่งแวดล้อมเลย แต่ยานยนต์ไฟฟ้าต้องการ

อุปกรณ์สะสมพลังงานที่สามารถจ่ายกำลัง (Power) และพลังงาน (Energy) ที่สูงในขณะที่ต้องมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา นั้นคือมีค่ากำลังและพลังงานต่อน้ำหนัก หรือค่ากำลังจำเพาะ และพลังงานจำเพาะที่สูง (Specific power and specific energy) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และต้องมีค่าความหนาแน่นของกำลังและพลังงานต่อปริมาตร (Power density and energy density) ที่สูงด้วยเพื่อให้มีขนาดที่กะทัดรัด มีพื้นที่ห้องโดยสาร และพื้นที่เก็บสัมภาระมากขึ้น เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในกับมอเตอร์ไฟฟ้า จะพบว่าประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในมีประสิทธิภาพการแปรผันพลังงานที่ต่ำมาก โดยเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินมีประสิทธิภาพประมาณ 30 ถึง 37 % และเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลมีประสิทธิภาพประมาณ 40 % ในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงประมาณ 90 % แบตเตอรี่และอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ก็มีประสิทธิภาพที่สูงเช่นกัน คืออยู่ที่ระดับ 90 % ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวมของระบบจากแบตเตอรี่จนถึงเพลลาของมอเตอร์จะอยู่ที่ประมาณ 70 % ซึ่งสูงกว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในอย่างมีนัยสำคัญ

3.3.1 ส่วนประกอบของยานยนต์ไฟฟ้า

ส่วนประกอบของยานยนต์ไฟฟ้าที่สมบูรณ์ไม่ได้มีส่วนประกอบเพียง วงจรการขับเคลื่อน และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับการขับเคลื่อนเท่านั้น แต่ยังคงประกอบด้วยระบบย่อยอื่น ๆ เพื่อที่จะสามารถทำให้ระบบทำงานได้ ในรูปที่ 3.4 ระบบจะต้องมีอุปกรณ์สะสมพลังงาน ซึ่งก็คือแบตเตอรี่ หรือตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับบัสแรงดันสูง (High voltage bus) และส่งให้อุปกรณ์การขับเคลื่อน มอเตอร์จะเป็นส่วนหนึ่งของบวกรการส่งกำลังของยานยนต์ไฟฟ้า (Electric vehicle power train) หรือเขียนย่อว่า EVPT ที่อยู่ทางด้านขวาของรูปภาพ ซึ่งทั้งระบบสะสมพลังงานและ EVPT ต่างก็มีระบบควบคุมของตัวเอง ซึ่งตัวควบคุมแบตเตอรี่จะควบคุมการประจุและคายประจุ รวมถึงจัดการการทำงานของแบตเตอรี่เพื่อให้จ่ายโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนตัวควบคุมของ EVPT จะควบคุมความเร็ว (Speed) หรือแรงบิด (Torque) ของมอเตอร์ด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ในรูปที่ 3.4 ตัวเก็บสะสมพลังงาน และ EVPT อาจอยู่ห่างกันแต่ในความเป็นจริงแล้ว ทั้ง 2 ระบบควรอยู่ใกล้กัน เพื่อลดความยาวของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เช่นเดียวกับตัวควบคุมของระบบต่าง ๆ ซึ่งในความเป็นจริงอาจจะอยู่ในกล่องควบคุมเดียวกัน หรือใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกัน ในรูปที่แสดงเขียนแยกกันเพื่อให้เห็นถึงหน้าที่การทำงานที่ชัดเจน



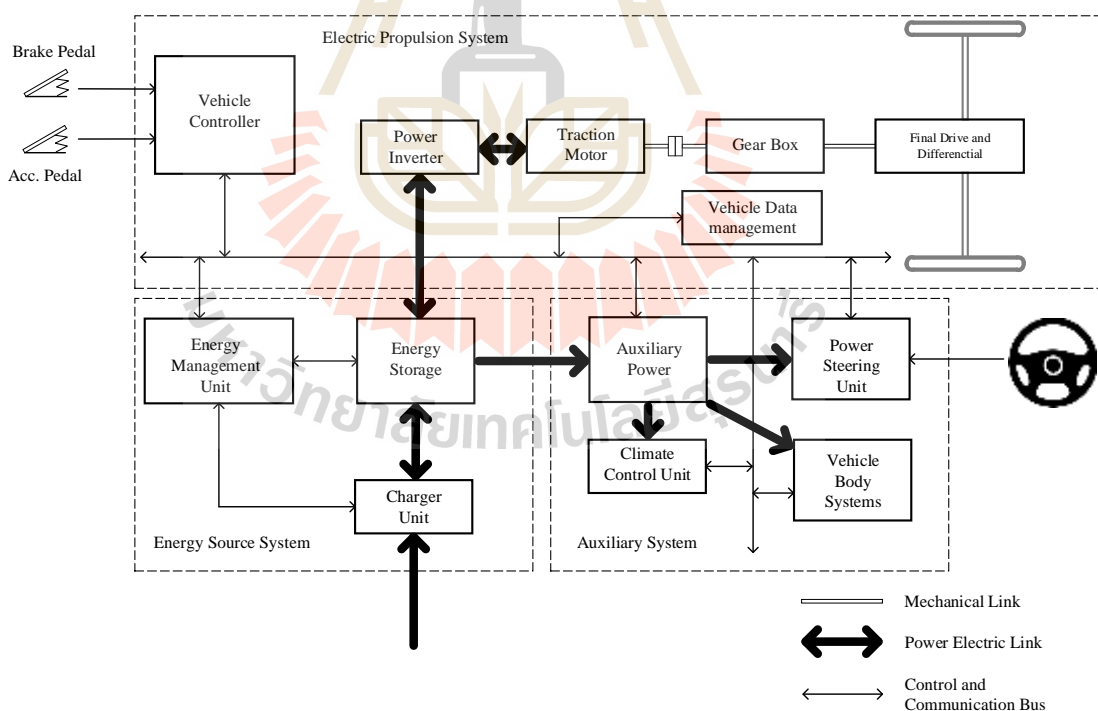
รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของยานยนต์ไฟฟ้า (Masrur M.A. , 2008)

นอกจากนี้รูปที่ 3.4 ยังประกอบไปด้วยอีกหลายระบบเช่น ตัวควบคุมของรถยนต์ไฟฟ้า (Vehicle controller) ซึ่งจะรับสัญญาณความเร็วของรถ ตำแหน่งของคันเร่ง และอื่น ๆ เพื่อควบคุมและตัดสินใจว่า ควรจะเพิ่มหรือลดแรงบิดจากมอเตอร์หรือไม่ เพื่อให้การควบคุมรถเป็นไปตามที่ต้องการ และส่งสัญญาณไปที่ตัวควบคุมของ EVPT ให้ดำเนินการ เช่นเดียวกัน ตัวควบคุมระบบเบรกก็จะรับสัญญาณตำแหน่งของแป้นเบรก ความเร็วของรถ และอื่น ๆ ส่งคำสั่งการใช้แรงในการเบรกที่ต้องการ และยังรับสัญญาณสถานะของระบบสะสมพลังงาน (State of charging) เพื่อที่จะดำเนินการหาโอกาสการจ่ายคืนพลังงานจากการเบรก และส่งสัญญาณต่อไปยัง EVPT เพื่อดำเนินการ จากทั้งหมดที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า การส่งสัญญาณและข้อมูลมีความสำคัญมาก และระบบย่อยต่าง ๆ ต้องทำงานประสานกันอย่างต่อเนื่อง การส่งผ่านข้อมูลของระบบควบคุมต่าง ๆ จะใช้ระบบ CAN bus (Controller Area Network) ซึ่งเป็น โพรโตคอลการสื่อสารและการส่งข้อมูลที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์

นอกจากนี้ระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าประกอบด้วย สามระบบหลักดังนี้ ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า (Electric Propulsion System) ระบบสะสมพลังงาน (Energy Source System) และระบบเสริม (Auxiliary System) ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าประกอบด้วย หน่วยควบคุม หน่วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง หรืออินเวอร์เตอร์ มอเตอร์ลากจูง ระบบส่งกำลังทางกล หน่วยสะสมพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุสองชั้นเป็นต้น ระบบการจัดการพลังงาน หรือระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System, BMS) และระบบประจุไฟฟ้า ระบบเสริมประกอบด้วยระบบอื่นที่ช่วยให้ยานยนต์ไฟฟ้าขับเคลื่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย เช่นระบบบังคับ

เดี่ยวกำลัง (Power Steering Unit) ระบบปรับอากาศ และระบบจากไฟฟ้าเสริม (Low Voltage Converter)

สัญญาณด้านเข้าของระบบควบคุมคือ คันเร่ง แป้นเบรก เข้าสู่หน่วยควบคุมเพื่อจะส่งสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมสู่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อทำการปรับการจ่ายกำลังสู่มอเตอร์ให้เหมาะสม นอกจากนี้หน่วยควบคุมจะต้องทำการปรับและสื่อสารกับระบบจัดการพลังงานเพื่อการจ่ายกำลังจากระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมกับการใช้งาน ความปลอดภัย และอายุการใช้งานของอุปกรณ์สะสมพลังงาน ระบบจัดการพลังงานต้องควบคุมการจ่ายพลังงานและการประจุพลังงาน รวมถึงการจ่ายพลังงานกลับคืนจากการเบรก และจากประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย ทั้งในขณะขับขี่และขณะหยุดรถ และจัดการการสะสมพลังงานในกรณีที่มีหลายชนิดทำงานร่วมกัน ระบบเสริม โดยระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งอาจจะมีระดับแรงดันที่แตกต่างกันของระบบไฟฟ้าในของยานยนต์ทั้งหมด รูปแบบของโครงสร้างหรือส่วนประกอบของระบบส่งกำลังและระบบขับเคลื่อน สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะของการส่งกำลังขับเคลื่อนและแหล่งจ่ายพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบโดยทั่วไปของยานยนต์ไฟฟ้า

3.3.2 การใช้พลังงาน

สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจะพิจารณาพลังงานในหน่วย กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) มากกว่าที่จะใช้หน่วยจูล หรือกิโลจูล (J or kJ) โดยทั่วไปแล้วการประเมินค่าการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าจะใช้ค่าพลังงานต่อระยะทาง (kWh/km) เนื่องจากแบตเตอรี่ที่เป็นแหล่งพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งสามารถวัดกระแสและแรงดันได้ที่ขั้วของแบตเตอรี่จึงเป็นการเหมาะสมที่จะใช้หน่วยวัดพลังงานในหน่วย kWh สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ค่าการใช้พลังงานจะมีค่าเท่ากับผลรวมของกำลังต้านออกที่ขั้วของแบตเตอรี่ เมื่อพิจารณาเฉพาะระบบขับเคลื่อน กำลังต้านออกของแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากับ กำลังที่ต้านการเคลื่อนที่ กำลังที่สูญเสียในระบบส่งกำลัง และมอเตอร์ขับเคลื่อน รวมถึงกำลังสูญเสียในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง กำลังที่สูญเสียในระบบส่งกำลัง และมอเตอร์ขับเคลื่อน สามารถแทนด้วยค่าประสิทธิภาพ η_t และ η_m ตามลำดับ ดังนั้นกำลังต้านออกของแบตเตอรี่สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.20

$$P_{es-out} = \frac{v}{\eta_t \eta_m} \left(Mg(f_r \cos \theta + \sin \theta) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \frac{dV}{dt} \right) \quad (3.20)$$

สมการที่ 3.20 ยังไม่รวมผลของโหลดอื่นที่จ่ายโดยระบบเสริม (Auxiliary Power Supply) ในกรณีที่โหลดเสริมมีนัยสำคัญก็จำเป็นต้องรวมผลของโหลดดังกล่าวด้วย เมื่อพิจารณาผลของการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรก (Regenerative Braking) :ซึ่งสามารถนำพลังงานจากการเบรกจากมอเตอร์ขับเคลื่อนขณะทำงาน ในโหมดกำเนิดไฟฟ้า (Generator) กลับไปประจุแบตเตอรี่กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคืนกลับจากการเบรกที่ขั้วของแบตเตอรี่สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.21

$$P_{es-in} = \frac{\alpha v}{\eta_t \eta_m} \left(Mg(f_r \cos \theta + \sin \theta) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \frac{dV}{dt} \right) \quad (3.21)$$

เมื่อระดับของความชันหรือ $\sin \theta$ และค่าความเร่ง dV/dt ค่าใดค่าหนึ่งเป็นลบ หรือเป็นลบทั้งคู่ ค่า α จากสมการที่ 3.21 ($0 < \alpha < 1$) คือ คีเปอร์เซ็นต์ของค่าพลังงานจากการเบรกที่สามารถจ่ายพลังงานคืนกลับ โดยมอเตอร์ลากจูง ซึ่งค่าดังกล่าวเรียกว่า ค่าแฟคเตอร์การจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรก (The regenerative braking factor) พลังงานสุทธิที่ใช้จากแบตเตอรี่สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.22

$$E_{out} = \int P_{es-out} dt + \int P_{es-in} dt \quad (3.22)$$

ถ้าหากพลังงานสุทธิที่ใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าในสมการที่ 3.22 มีค่าเท่ากับพลังงานรวมที่จ่ายโดยแบตเตอรี่เมื่อวัดที่ขั้วของแบตเตอรี่ ถ้าหากมีค่ามากกว่าหมายความว่าแบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้และต้องการการประจุไฟฟ้า

3.3.3 การหาพิกัดของมอเตอร์ขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

การเลือกพิกัดการทำงานของมอเตอร์มีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และสามารถทำงานได้อย่างมีความน่าเชื่อถือ การใช้มอเตอร์ที่มีค่าพิกัดที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ไม่สามารถขับโหลดได้ ขับโหลดได้น้อยกว่าที่ต้องการ หรือไม่มีความน่าเชื่อถือ บ่อยครั้งที่มอเตอร์อาจจะหยุดการทำงาน เนื่องจากการขับ โหลดที่เกินกำลังของมอเตอร์ และระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า หรือถ้าหากเลือกมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น จะมีพลังงานสูญเสียเนื่องจากการทำงานที่ต่ำกว่าค่ากำลังพิกัดมากขึ้น และยังเป็นการลงทุนที่เกินความจำเป็น นอกจากนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำ และซิงโครนัสมอเตอร์จะทำงานด้วยค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) ที่ต่ำลง ถ้าหากทำงานด้วยค่ากำลังที่ต่ำกว่าค่าพิกัดของมอเตอร์ (Dubey K. Gopal, 2001)

เมื่อมอเตอร์ทำงานก็จะเกิดความร้อนขึ้น เนื่องมาจากการสูญเสียพลังงาน (Losses) ภายในมอเตอร์ และทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิโดยรอบ หากความร้อนที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวมีค่าเท่ากับความร้อนที่ระบายออกไปจนไม่มีการสะสมความร้อน หรือเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งสภาวะคงตัวของอุณหภูมิ (Steady state temperature) จะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าสูญเสีย และกำลังไฟฟ้าสูญเสียก็มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของมอเตอร์

ความร้อนที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เกิดขึ้นมากที่สุดที่ขดลวดของมอเตอร์เนื่องจากที่ขดลวดมีความหนาแน่นของความสูญเสียพลังงานของตัวนำไฟฟ้ามากที่สุด และความร้อนที่สะสมที่จุดดังกล่าวจะระบายออก หรือทำให้เย็นลงได้ช้ามาก เนื่องมาจากขดลวดจะหุ้มด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า และฝังลงไปในช่วง หรือสล๊อต ซึ่งยากที่จะระบายความร้อนได้โดยตรง และวัสดุที่ทนความร้อนได้น้อยที่สุดในวัสดุที่ประกอบขึ้นเป็นมอเตอร์ก็คือ วัสดุฉนวนไฟฟ้า ซึ่งการทนต่อความร้อนของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนจะแบ่งเป็นประเภท หรือคลาสดังตารางที่ 3.3

ถ้าหากอุณหภูมิของฉนวนไฟฟ้าสูงเกินกว่าขีดจำกัดก็จะทำให้สูญเสียสภาพความเป็นฉนวนทำให้ขดลวดลัดวงจร และทำให้ขดลวดเสียหายได้ สำหรับ โหลดของมอเตอร์ที่มีค่าคงที่ การจัดการกับความสูญเสียทางไฟฟ้า และความร้อนจะเรียบง่ายกว่าโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิขดลวดไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60085

IEC 60085 (ปี ค.ศ. 2007)	IEC 60085 (เก่า)	อุณหภูมิสูงสุด	ดัชนีการทนต่อความร้อน
70		70 °C	< 90 °C
90		90 °C	90 – 105 °C
105	γ	105 °C	105 – 120 °C
120	A	120 °C	120 – 130 °C
130	E	130 °C	130 – 155 °C
155	B	155 °C	155 – 180 °C
180	F	180 °C	180 – 200 °C
200	H	200 °C	200 – 220 °C
250		250 °C	> 250 °C

การประมาณขนาดของมอเตอร์ โดยใช้กระแสสมมูล (Equivalent Current) แรงบิด และกำลังไฟฟ้า สำหรับโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงและมีค่าสูงเป็นบางช่วง (Fluctuating and Intermittent Load) แทนค่ากระแสของมอเตอร์ด้วยกระแสสมมูล I_{eq} ซึ่งเป็นกระแสที่ทำให้เกิดความสูญเสียทางไฟฟ้าได้ เท่ากับกระแสที่โหลดจริงของมอเตอร์ โดยการหาค่ากระแสสมมูลนั้น พิจารณาดังนี้ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในมอเตอร์ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ กำลังสูญเสียคงที่ P_c ซึ่งเป็นกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นอยู่กับโหลดของมอเตอร์ ได้แก่ ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) และความต้านทานจากแรงเสียดทาน และกำลังสูญเสียที่ขึ้นอยู่กับโหลดของมอเตอร์คือ กำลังสูญเสียในขดลวดตัวนำ (Copper Loss) สำหรับโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลง หรือมีการชักตัวอย่างจำนวน n ค่า และกระแสของมอเตอร์ I_1, I_2, \dots, I_n สำหรับช่วงเวลา t_1, t_2, \dots, t_n สามารถเขียนกระแสสมมูลได้ดังนี้

$$P_c + I_{eq}^2 R = \frac{(P_c + I_1^2 R)t_1 + (P_c + I_2^2 R)t_2 + \dots + (P_c + I_n^2 R)t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

หรือ

$$P_c + I_{eq}^2 R = \frac{P_c(t_1 + t_2 + \dots + t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} + \frac{(I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n)R}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

ดังนั้นสามารถหาค่ากระแสสมมูลได้

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (3.23)$$

สมการที่กล่าวมาอยู่ภายใต้สมมุติฐานว่าความร้อนที่เกิดขึ้น และระบบสามารถระบายความร้อนได้หมด หรืออยู่ในสภาวะคงตัวตลอดการทำงานของมอเตอร์ ดังนั้นสามารถนำกระแส I_{eq} ไปใช้ในการพิจารณาเลือกพิกัดของมอเตอร์ได้

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถทนรับกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าค่าพิกัดในช่วงเวลาสั้นๆ ได้ (Short Time Overload Capacity) โดยการออกแบบโดยทั่วไปจะสามารถทนกระแสได้สูงกว่าค่าพิกัดได้ 2 เท่า (3 ถึง 3.5 เท่าสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกแบบให้ทนกระแสสูงโดยเฉพาะ) ถ้าหากกระแสไฟฟ้ามี่ค่าเกินกว่าที่กำหนดก็อาจจะเกิดประกายไฟขึ้นระหว่างแปรงถ่าน และคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ที่อยู่ในระดับที่ไม่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นสัดส่วนของกระแสไฟฟ้าสูงสุดต่อกระแสไฟฟ้าพิกัด ให้มีค่าเป็น λ ดังนั้น

$$\lambda \geq \frac{I_{max}}{I_{rated}} \quad (3.24)$$

เมื่อ I_{max} คือค่ากระแสสูงสุด และ I_{rated} คือค่าพิกัดกระแสของมอเตอร์ ดังนั้นสามารถหาค่ากระแสพิกัดของมอเตอร์ได้จาก

$$I_{rated} \geq \frac{I_{max}}{\lambda} \quad (3.25)$$

มอเตอร์เหนี่ยวนำ และซิงโครนัสมอเตอร์ สำหรับการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ค่าแรงบิดของโหลดจะต้องไม่เกินค่าแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถรับได้ ดังนั้นถ้าหากใช้สมการของกระแสไฟฟ้า ดังที่กล่าวมาในสมการ 3.25 อาจจะหาค่ากระแสพิกัดที่เลือกมาอาจจะไม่มีแรงบิดเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ ในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยปกติแล้วจะออกแบบให้แรงบิดที่สามารถทนได้ต่อค่าพิกัดของแรงบิดของมอเตอร์คือ 1.65 ถึง 3 สำหรับซิงโครนัสมอเตอร์จะอยู่ในช่วง 2 ถึง 2.25 ถ้าเป็นชนิดที่ออกแบบเป็นพิเศษจะมีค่าถึง 3.5 ดังนั้นสามารถหาค่าพิกัดแรงบิดของมอเตอร์จากสมการ 3.26

$$T_{\text{rated}} \geq \frac{T_{\text{max}}}{\lambda'} \quad (3.26)$$

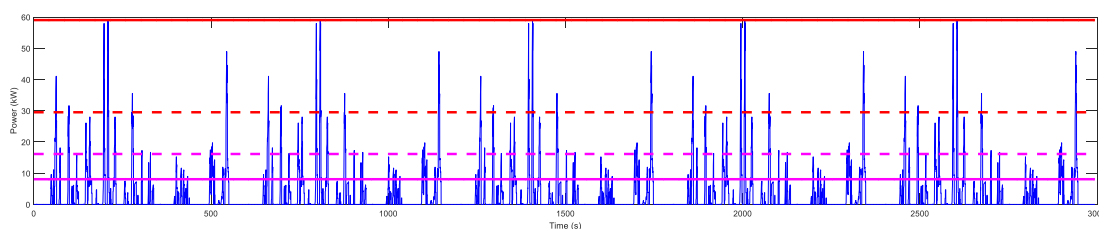
จากวิธีการสมมูลกระแสไฟฟ้า ซึ่งอยู่ภายใต้สมมุติฐานว่าความสูญเสียทางไฟฟ้าที่มีค่าคงที่ตลอดการทำงาน ดังนั้นจากสมการดังกล่าวจึงต้องมีความระมัดระวังกับโหลด และพลังงานสูญเสียที่มีการเปลี่ยนแปลง และมอเตอร์ที่มีค่าความถี่ หรือความเร็วขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ และซิงโครนัสมอเตอร์ ดังนั้นเมื่อแรงบิดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก สามารถหาค่าแรงบิดสมมูลที่จะใช้พิจารณาเป็นค่าพิกัดแรงบิดของมอเตอร์ดังนี้

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + \dots + T_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (3.27)$$

จากสมการที่ 3.27 สามารถเลือกพิจารณาค่าพิกัดของมอเตอร์ที่เหมาะสมได้ เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่ากำลังไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงบิด ดังนั้นสามารถพิจารณาค่าพิกัดกำลังของมอเตอร์ได้จากสมการ 3.28

$$P_{eq} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (3.28)$$

จะสังเกตได้ว่าสมการที่ 3.23 3.27 และ 3.28 คือการหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square หรือ Quadratic Mean) ดังนั้นจากที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่า สมการที่ 3.23 3.27 และ 3.28 สามารถใช้ในการพิจารณาค่าพิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (Shunt Motor) และสามารถนำสมการที่ 3.27 และ 3.28 ในการหาค่าพิกัดแรงบิด และพิกัดกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และมอเตอร์ซิงโครนัสได้ ต่อไปจะเป็นตัวอย่างผลการคำนวณหาค่า พิกัดของมอเตอร์ โดยใช้เส้นทางหรือวงจรการขับจี (Drive Cycles) คือ NYCC (The New York City Cycle) ซึ่งเป็นข้อมูลการขับจียานยนต์ในเมืองนิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกา และมีลักษณะ การจราจรแบบในเมืองใหญ่ที่มีการใช้ความเร็วต่ำและมีการหยุดและเคลื่อนที่โดยใช้ความเร่ง บ่อยครั้ง เมื่อคำนวณการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า ก็จะสามารถหาค่ากำลังงานของมอเตอร์ได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดที่ใช้เลือกฟักัดของมอเตอร์

จากรูปที่ 3.6 มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโหลดที่มอเตอร์ขับโหลดดังกล่าวคือ 59.0349 kW มีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสอง เท่ากับ 8.0751 kW ให้แรงบิดที่สามารถทนได้สูงสุด ต่อค่าฟักัดของแรงบิดของมอเตอร์คือ 2 หรือ μ' มีค่าเท่ากับ 2 ดังนั้นเราควรเลือกค่าฟักัดกำลังของมอเตอร์คือขนาด 29.5174 kW

3.4 กำลังและพลังงานของระบบสะสมพลังงาน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระบบสะสมพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งติดตั้งอยู่ภายในรถร่วมกับระบบประจุพลังงานไฟฟ้า เพื่อประจุไฟฟ้าจากโครงข่ายไฟฟ้ากำลัง สำหรับแบตเตอรี่จะสะสมพลังงานในรูปพลังงานเคมี แล้วแปลงไปสู่พลังงานไฟฟ้าสำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนต่อไป ซึ่งระบบสะสมพลังงานต้องรองรับการจ่ายคืนพลังงานจากการเบรก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นประสิทธิภาพของยานยนต์ไฟฟ้าจึงขึ้นอยู่กับการจัดการของระบบสะสมพลังงาน ในงานวิจัยนี้เราจะมุ่งศึกษาเฉพาะระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเท่านั้น

3.4.1 แบตเตอรี่

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้คำจำกัดความต่อไปนี้เมื่อกล่าวถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของแบตเตอรี่เซลล์ (Cell): องค์ประกอบพื้นฐานของแบตเตอรี่ โดยมีแรงดันไฟฟ้า 3 V ถึง 4 V ในกรณีของแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน (Li-Ion)

บล็อก (Block): การเชื่อมต่อกันของเซลล์โดยตรงในรูปแบบการต่อขนาน โดยจะยังคงมีระดับแรงดันไฟฟ้า 3 V ถึง 4 V ในกรณีของแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน

แบตเตอรี่ หรือแบตเตอรี่มอดูล (Battery Module): หมายถึง เซลล์หรือบล็อกมาเชื่อมต่อแบบอนุกรม ส่งผลให้มีแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น และมีลักษณะการเชื่อมต่อทางกายภาพที่เหมือนกัน

แพค (Pack): แบตเตอรี่ หรือแบตเตอรี่มอดูล มีการเชื่อมต่อกันแบบขนาน หรืออนุกรม

ระบบแบตเตอรี่ (Battery System): แบตเตอรี่แพคที่เชื่อมต่อกับระบบควบคุม เช่น เชื่อมต่อกับระบบการจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System) พัดลมระบายอากาศ และระบบแสดงผล เป็นต้น

แบตเตอรี่จะประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีหลายเซลล์ซึ่งสามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า และสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้ากลับมาสะสมเป็นพลังงานเคมีได้ ระบบสะสมพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่ (Battery storage system) หรือเขียนย่อว่า BESS ซึ่งจะใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในการควบคุม โดยระบบควบคุมจะควบคุมการประจุไฟฟ้า การคายประจุไฟฟ้า และการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อขับ โหลดอย่างเหมาะสม ส่วนระบบสะสมพลังงานโดยใช้ตัวเก็บประจุสองชั้น (Ultracapacitor energy storage system) หรือเขียนย่อว่า UESS เพื่อให้ได้ค่าแรงดันพิกัด และกระแสพิกัดที่ใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ดังนั้น แต่ละเซลล์ของอุปกรณ์สะสมพลังงานไฟฟ้าจะต้องอนุกรมหรือขนานกัน และถ้าหากมีการต่ออนุกรมหรือขนานกันเกินกว่า 3 เซลล์ ก็จะต้องมีระบบเฝ้าตรวจสอบและติดตามค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ (Mi Chris, et.al, 2011) เพื่อจัดการให้ทุกเซลล์มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เท่ากัน โดยปกติแล้วแบตเตอรี่จะมีสมบัติที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูง แต่มีความหนาแน่นของกำลังงานต่ำ ซึ่งปัจจัยหลักก็มาจากความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ซึ่งส่งผลให้การจ่ายโหลด และกระแสในการประจุไฟฟ้ามีค่าที่จำกัด สำหรับตัวเก็บประจุสองชั้นเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ตัวเก็บประจูงยิ่งยวดจะมีลักษณะที่มีความหนาแน่นของกำลังงานสูง แต่มีความหนาแน่นของกำลังงานต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากความต้านทานภายในของตัวเก็บประจูงยิ่งยวดที่มีค่าต่ำกว่าแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถทำให้ตัวเก็บประจูงยิ่งยวดมีกระแสในการประจุไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าในการจ่ายโหลดสูงกว่าแบตเตอรี่ ข้อดีอีกข้อหนึ่งของตัวเก็บประจูงยิ่งยวดคือ การมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน จึงเหมาะสมกับการจ่ายโหลดในช่วงที่ต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูง หรือช่วงที่รถไฟฟ้าทำการเร่งความเร็ว ดังนั้นการที่จะทำการใช้งานหรือควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สะสมพลังงานให้ได้มีประสิทธิภาพจึงต้องศึกษาสมบัติ หรือลักษณะของอุปกรณ์สะสมพลังงานดังกล่าว ซึ่งลักษณะของแบตเตอรี่ที่สำคัญประกอบไปด้วยค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ความจุ (Capacity) ความจุของแบตเตอรี่หรือเขียนย่อว่า C คือจำนวนของประจุไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายโหลดได้ก่อนที่จะคายประจุหมดอย่างสมบูรณ์ ในหน่วย SI ความจุจะมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ แต่โดยทั่วไปค่าความจุของแบตเตอรี่จะมีหน่วยเป็น แอมแปร์ ชั่วโมง หรือ Ah โดยที่ 1 Ah จะมีค่าเท่ากับ 3600 คูลอมบ์ การระบุอัตราการคายประจุของแบตเตอรี่ด้วยอัตรา C ในหน่วยแอมแปร์ เมื่อแบตเตอรี่คายประจุด้วยอัตรา nC ดังนั้นแบตเตอรี่ก็จะจ่ายกระแสได้ $1/n$

ชั่วโมง ยกตัวอย่างเช่น สำหรับแบตเตอรี่ความจุ 2 Ah ดังนั้นอัตรา $C/5$ ก็หมายความว่าแบตเตอรี่จะจ่ายกระแส 400 mA และจ่ายกระแสได้นาน 5 ชั่วโมงเป็นต้น

การสะสมพลังงาน (Energy stored) การสะสมพลังงานหรือเขียนย่อว่า E ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และจำนวนประจุที่เก็บสะสมไว้ ซึ่งมีหน่วยเป็นวัตต์ ชั่วโมง หรือ Wh สมมติให้แบตเตอรี่มีแรงดันไฟฟ้าคงที่ดังนั้น

$$E (Wh) = V \times C \quad (3.29)$$

เมื่อ V คือแรงดันไฟฟ้า และ C คือค่าความจุในหน่วย Ah

สถานะของประจุไฟฟ้า (State of charge) สถานะของประจุไฟฟ้า หรือเขียนย่อว่า SOC ถือเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของยานยนต์ไฟฟ้า SOC คือ การวัดค่าความจุที่เหลืออยู่ของแบตเตอรี่ เมื่อพิจารณาว่าการประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ด้วยกระแส $I_b(t)$ ดังนั้นจากเวลา t_0 ถึง t แบตเตอรี่จะเก็บประจุไฟฟ้าได้

$$\int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau \quad (3.30)$$

ประจุมรวมของแบตเตอรี่ที่มีอยู่จะเขียนได้ดังนี้

$$Q_0 = \int_{t_0}^{t_2} I_b(\tau) d\tau \quad (3.31)$$

เมื่อ t_2 คือเวลาที่ยุติการประจุไฟฟ้า ดังนั้นค่า SOC ก็จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$SOC(t) = \frac{\int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau}{Q_0} \times 100\% \quad (3.32)$$

โดยทั่วไปจะรักษาระดับ SOC ของแบตเตอรี่ไว้ระหว่าง 20 ถึง 95 %

ปริมาณของการคายประจุ (Depth of Discharge) ปริมาณการคายประจุหรือเขียนย่อว่า DOD สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์กับการคายประจุไฟฟ้าได้ดังนี้

$$DOD(t) = \frac{Q_0 - \int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau}{Q_0} \times 100\% \quad (3.33)$$

โดยทั่วไปจะต้องป้องกันแบตเตอรี่ไม่ให้คายประจุออกจนหมดหรือมีค่า DOD น้อยเกินไป และควรกำหนดระดับแรงดันที่จะยุติการคายประจุเมื่อแบตเตอรี่มีค่าแรงดันต่ำกว่าค่าแรงดันดังกล่าว

พลังงานจำเพาะ (Specific energy) พลังงานจำเพาะหมายถึง ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเก็บสะสมได้ต่อมวลของแบตเตอรี่ ซึ่งมีหน่วยเป็น Wh/kg และค่าพลังงานจำเพาะสามารถถ่ายเปลี่ยนแปลงได้ตามอัตราการคายประจุ ตารางที่ 3.4 (Mi Chris, et al, 2011) เป็นการเปรียบเทียบค่าพลังงานจำเพาะจากหลายแหล่งพลังงานที่ใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน

ความหนาแน่นของพลังงาน (Energy density) ความหนาแน่นของพลังงานหมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่สามารถเก็บสะสมได้ ต่อลูกบาศก์เมตร (ปริมาตรของแบตเตอรี่) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก ปริมาณพลังงานที่เก็บสะสมในแบตเตอรี่หารด้วยปริมาตรของแบตเตอรี่ ซึ่งมีหน่วยเป็น Wh/m³

กำลังไฟฟ้าจำเพาะ และความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Specific power and power density) กำลังไฟฟ้าจำเพาะหมายความว่า ปริมาณของกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่สามารถจ่ายได้ต่อน้ำหนักของแบตเตอรี่ในหน่วยกิโลกรัม ค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ซึ่งขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จากให้กับโหลด หน่วย SI ของกำลังไฟฟ้าจำเพาะคือ วัตต์ต่อกิโลกรัม หรือ W/kg ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะก็คือความสามารถของแบตเตอรี่ที่จะจ่ายพลังงานให้กับโหลดนั่นเอง การที่มีค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะสูงก็เป็นการบ่งชี้ว่า แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว ส่วนความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า หรือกำลังไฟฟ้าต่อปริมาตร ถ้าหากแบตเตอรี่มีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่อปริมาตร แต่มีค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะต่ำ ก็หมายความว่าแบตเตอรี่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มาก แต่สามารถจ่ายออกได้ช้า

ประสิทธิภาพแอมแปร์ ชั่วโมง คืออัตราส่วนระหว่างประจุไฟฟ้าที่ไหลออกระหว่างจ่ายโหลดของแบตเตอรี่ และประจุไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการทำให้แบตเตอรี่มีระดับประจุไฟฟ้ากลับมาเท่ากับประจุไฟฟ้าในช่วงเวลาก่อนการคายประจุ ในทางปฏิบัติทั้ง 2 ค่าจะมีค่าที่ไม่เท่ากัน

โดยปกติแล้วค่าดังกล่าวจะอยู่ในช่วง 65 ถึง 90 % ค่าประสิทธิภาพดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแบตเตอรี่ อุณหภูมิ และอัตราการประจุไฟฟ้า

ตารางที่ 3.4 ค่าพลังงานจำเพาะของแหล่งพลังงานหลายชนิด

แหล่งพลังงาน	พลังงานจำเพาะ (Wh/kg)
น้ำมันเชื้อเพลิง	12,500
แก๊สธรรมชาติ	9,350
เมทานอล (Methanol)	6,050
ไฮโดรเจน	33,000
ถ่านหิน	8,200
แบตเตอรี่ตะกั่ว กรด	35
แบตเตอรี่นิกเกิล แคดเมียม ไฮดรอกไซด์	50
แบตเตอรี่ลิเทียม โพลีเมอร์ (Li-P)	200
แบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน (Li-I)	120
ล้อตุ่นกำลัง (Flywheel)	30
ตัวเก็บประจุยิ่งยวด	3.3

ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ค่าดังกล่าวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงานของแบตเตอรี่ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยแบตเตอรี่หารด้วยจำนวนพลังงานที่แบตเตอรี่ต้องการเพื่อที่จะให้ค่า SOC เท่ากับแบตเตอรี่ขณะก่อนการจ่ายโหลด โดยปกติแล้วค่าดังกล่าวจะอยู่ในช่วง 55 ถึง 95 % จำนวนของดีพไซเคิล (Deep cycle) และวัฏจักรชีวิต (Cycle life) ของแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้ามีค่าดีพไซเคิล หรือค่าความสามารถใช้ประจุไฟฟ้าที่เก็บไว้ของแบตเตอรี่ จะมีค่าไม่สูงมากโดยประมาณอยู่ที่ 600 ดีพไซเคิล ที่ 80% DOD ของแบตเตอรี่ ดังนั้นกลยุทธ์ของการควบคุมจะต้องพยายามลดจำนวนครั้งของการคายประจุของแบตเตอรี่ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการใช้งาน

3.4.2 เทคโนโลยีแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่ใช้งานอยู่ในยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน ประกอบไปด้วยแบตเตอรี่ตะกั่วกรด แบตเตอรี่ที่ใช้สังกะสีเป็นธาตุหลัก (Nickel-base) เช่น นิกเกิล/ไฮดรอกไซด์ นิกเกิล/แคดเมียม และนิกเกิลเมทัลไฮดรอกไซด์ (Ni-MH) และแบตเตอรี่ที่ใช้ลิเทียมเป็นธาตุหลัก (Lithium-base) เช่น ลิเทียมโพลีเมอร์

(Li-P) และลิเทียมไอออน (Li-I) ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียมเป็นแบตเตอรี่ที่มีการนำมาใช้งานเป็นหลักในยานยนต์ไฟฟ้า โดยในตารางที่ 3.5 (Ehsani Mehrdad, et al., 2010) ได้ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของแบตเตอรี่ที่มีการนำมาใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า

แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-acid battery) เป็นแบตเตอรี่ที่ประสบความสำเร็จมากทางด้านยอดขายและเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมยานยนต์และการนำไปใช้งานในด้านอื่น ๆ ข้อดีของแบตเตอรี่นี้คือ มีราคาถูก เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นมาแล้ว และมีความสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูง แต่แบตเตอรี่ตะกั่ว กรดก็มีข้อเสียหลายด้านเช่นเดียวกัน เช่น มีน้ำหนักมาก ถ้าทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส ค่ากำลังจำเพาะและค่าพลังงานจำเพาะจะมีค่าลดลงมาก ดังนั้นในการใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดสำหรับระบบขับเคลื่อนจึงมีข้อจำกัดสำหรับประเทศที่มีอากาศหนาวเย็น สมการเคมีสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว กรด ระหว่างการคายประจุ คือ



สมการเคมีสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว กรด ระหว่างการประจุไฟฟ้า คือ



จากสมการเคมี ในขณะคายประจุ สารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และวัสดุแอคทีฟ (Active material) จะถูกใช้ และได้น้ำ และตะกั่วซัลเฟต (Lead sulfide) เมื่อทำการประจุแบตเตอรี่และแบตเตอรี่ได้รับพลังงานไฟฟ้า น้ำ และตะกั่วซัลเฟต จะถูกใช้ทำให้ได้ สารอิเล็กโทรไลต์ และวัสดุแอคทีฟกลับคืนมา แบตเตอรี่ลิเทียม (Lithium-base battery) ลิเทียมเป็น โลหะที่เบาที่สุดและมีความจุพลังงานทางไฟฟ้าเคมีที่น่าสนใจ และมีค่าพลังงานจำเพาะ และค่ากำลังจำเพาะที่สูงมาก ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียมมี 2 เทคโนโลยีหลักๆ ได้แก่ Li-P และ Li-I

แบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์ (Li-P battery) ใช้โลหะลิเทียมและโลหะทาทานซันที่ทำการแทรกออกไซด์ (M_yO_2) สำหรับขั้วไฟฟ้าลบ และบวกตามลำดับ โดยที่ M_yO_2 เป็นโครงสร้างที่เป็นชั้นซึ่งสามารถให้ ไอออน ของลิเทียมเข้าไปแทรกอยู่ได้ หรือสามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ ในกรณีทำการคายประจุไฟฟ้า และประจุไฟฟ้าตามลำดับ และได้น้ำอิเล็กโทรไลต์โพลิเมอร์แข็งชนิดบาง (Thin solid polymer electrolyte) หรือเขียนย่อว่า SPE (อิเล็กโทรไลต์ คือ สารละลายหรือของเหลวที่แตกตัวเป็นไอออนได้บางส่วน หรือทั้งหมด และยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้) มา

ใช้เพื่อให้ความปลอดภัย และยืดหยุ่นในการออกแบบเพิ่มมากขึ้น ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทั่วไปแสดงดังต่อไปนี้



ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของแบตเตอรี่

ชนิดของแบตเตอรี่	พลังงานจำเพาะ (Wh/kg)	กำลังสูงสุด (W/kg)	ประสิทธิภาพพลังงาน (%)	วัฏจักรชีวิต (Cycle life)	การคายประจุด้วยตัวเอง (% ต่อ 48 ชั่วโมง)
<i>Acid Aqueous solution</i>					
Lead / acid	35-50	150-400	> 80	500-1000	0.6
<i>Alkaline Aqueous solution</i>					
Nickel / cadmium	50-60	80-150	75	800	1
Nickel / iron	50-60	80-150	75	1500-2000	3
Nickel / zinc	55-75	170-260	65	300	1.6
Ni-MH	70-95	200-300	70	750-1200+	6
<i>Molten salt</i>					
Sodium / sulfur	150-240	230	80	800+	0 ^a
Sodium / nickel chloride	90-120	130-160	80	1200+	0 ^a
Lithium / iron sulfide (FeS)	100-130	150-250	80	1000+	?
<i>Organic / lithium</i>					
Li-I	80-130	200-300	>95	1000+	0.7

^a หมายถึง ไม่มีการคายประจุด้วยตัวเอง แต่มีการสูญเสียพลังงานจากความเย็น

ในขณะที่คายประจุไฟฟ้า ลิเทียมไอออนที่ขั้วไฟฟ้าลบจะเคลื่อนที่ผ่าน SPE และเข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างผลึก ที่ขั้วไฟฟ้าบวก เมื่อพิจารณาในขณะที่ประจุไฟฟ้า กระบวนการก็จะดำเนินการย้อนกลับโดยทั่วไปแล้ว แบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์มีแรงดันไฟฟ้า 3 V และมีค่าพลังงานจำเพาะประมาณ 155 Wh/kg ค่ากำลังจำเพาะประมาณ 315 W/kg โดยที่มีค่าการคายประจุด้วยตัวเองที่ต่ำมากคือประมาณ 0.5% ต่อเดือน และยังสามารถออกแบบได้หลายรูปร่างและหลายขนาด แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียของแบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์คือ ที่อุณหภูมิต่ำประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่จะลดลง

แบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน (Li-I battery) ใช้วัสดุที่ทำจากลิเทียมแทรกด้วยคาร์บอน (Lithiated carbon) (Li_xC) สำหรับขั้วไฟฟ้าลบ แทนที่จะใช้โลหะลิเทียม และลิเทียมแทรกโลหะทาทานชนิดที่ทำการแทรกออกไซด์ ($\text{Li}_{1-x}\text{M}_y\text{O}_z$) สำหรับขั้วไฟฟ้าบวก และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือของแข็งโพลิเมอร์ สำหรับใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ ลิเทียม ไอออนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ กลับไปกลับมาระหว่างขั้วไฟฟ้าบวก และขั้วไฟฟ้าลบระหว่างการคายประจุ และการประจุไฟฟ้า ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทั่วไปแสดงดังต่อไปนี้



ระหว่างการคายประจุไฟฟ้า ลิเทียม ไอออนจะถูกปล่อยจากขั้วไฟฟ้าลบ เคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปที่ขั้วไฟฟ้าบวก เมื่อทำการประจุไฟฟ้ากระบวนการก็จะดำเนินการย้อนกลับ วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าบวกอาจใช้ $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$ $\text{Li}_{1-x}\text{NiO}_2$ และ $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน มีเสถียรภาพ มีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว และปฏิกิริยาย้อนกลับที่ดีขึ้น โดย ขั้วบวกที่มีสารประกอบโคบอลต์ (Cobalt-based) จะมีค่าพลังงานจำเพาะ และค่าความหนาแน่นของพลังงานมากกว่าอีกสองชนิดที่ยกตัวอย่างมา แต่ก็มียุคที่พุ่งขึ้นด้วยเช่นกัน

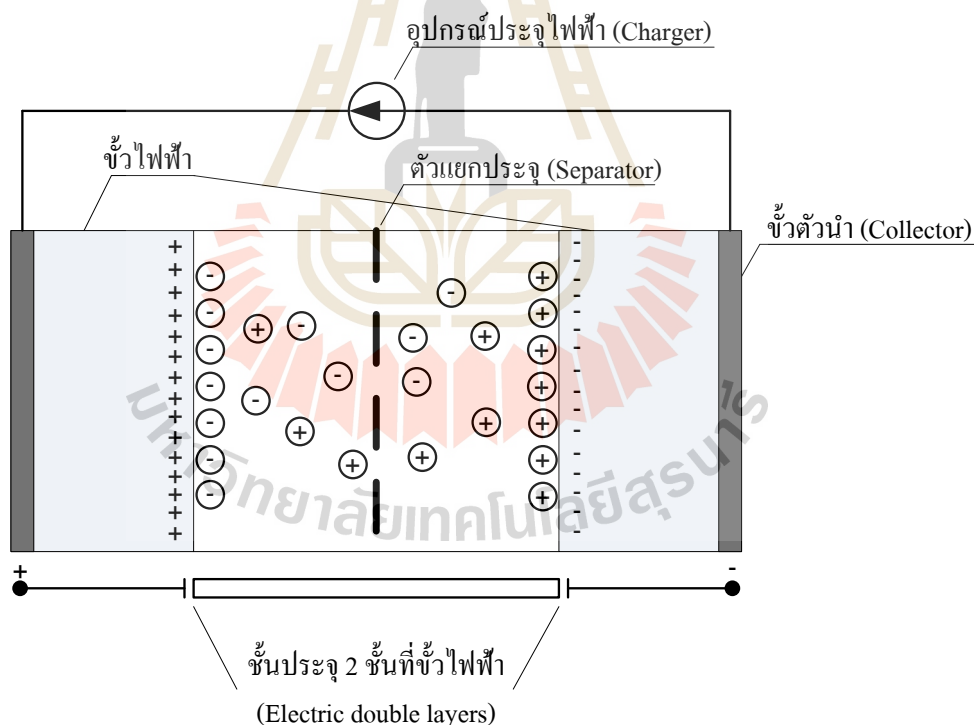
3.4.3 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุสองชั้น (Ultracapacitor) เนื่องจากรูปแบบการจับขั้วของยานยนต์ เป็นรูปแบบของการหยุดแล้วไป ทำให้เกิดการคายประจุไฟฟ้า และประจุไฟฟ้าในอุปกรณ์สะสมพลังงานบ่อยครั้ง กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ต้องการจากแบตเตอรี่มักมีน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการใช้จ่ายโหลดในช่วงเวลาสั้นๆ เช่นเมื่อมีการใช้ความเร่งหรือไต่ทางชัน อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุด ต่อกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยโดยทั่วไปจะอยู่ที่ 10 ต่อ 1 (Ehsani Mehrdad, et al., 2010) ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีกำลังไฟฟ้าจำเพาะที่สูง แต่มีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ต่ำเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ แต่อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าจำเพาะของตัวเก็บประจุยิ่งยวดก็มีค่าสูงสุดถึง 3 kW/kg ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าแบตเตอรี่ทุกชนิด ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถจ่ายกระแสที่สูงให้กับ โหลด และสามารถ

ประจุไฟฟ้าจากการจ่ายคืนพลังงานจากการเบรก ด้วยกระแสที่สูงซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน นอกจากนี้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดยังมีอายุการใช้งานหรือวัฏจักรชีวิตที่ยาวนานกว่าแบตเตอรี่แต่เนื่องจากการที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ต่ำมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ตัวเก็บประจุสองชั้นเป็นแหล่งสะสมพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าเพียงชนิดเดียวได้

หลักการทำงานเบื้องต้นของตัวเก็บประจุสองชั้นแสดงดังรูปที่ 3.7 เมื่อแท่งคาร์บอนแช่อยู่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่เป็นชั้นบาง (Thin sulfuric acid solution) เมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าคร่อมขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกและลบผ่านอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งทำให้เกิดการสะสมประจุที่ พื้นผิวหรือขอบของขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่สะสมได้เป็นตามสมการที่ 3.38

$$E_{cap} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.38)$$



รูปที่ 3.7 หลักการทำงานเบื้องต้นตัวเก็บประจุสองชั้น(Ehsani Mehrdad, et al.,2010)

หน่วยงานด้านพลังงานของประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. Department of energy) ได้ให้คำจำกัดความ ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดว่า ควรมีคุณลักษณะที่จะต้องมีความจำเพาะ และค่า

กำลังไฟฟ้าจำเพาะ มีค่าใกล้เคียง หรือสูงกว่า 5 Wh/kg และ 500 W/kg ตามลำดับ แต่เทคโนโลยีในปัจจุบันทำให้ตัวเก็บประจุสองชั้นมีค่าพลังงานจำเพาะ และค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะที่สูงถึง 4.3 Wh/kg และ 4300 W/kg ตามลำดับ ยกตัวอย่างตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีจำหน่ายในปัจจุบันดังตารางที่ 3.6 (Ehsani Mehrdad, et al., 2010) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Maxwell Technologies ยี่ห้อ BOOSTCAP[®]

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลทางเทคนิคของตัวเก็บประจุยิ่งยวดของบริษัท Maxwell Technologies

	BCA P0010 (เซลล์)	BMOD0115 (โมดูล)	BMOD0117 (โมดูล)
ความจุ (farads, -20% / +20%)	2600	145	435
ความต้านทานอนุกรมสูงสุด (mΩ)	0.7	10	4
ค่าแรงดันไฟฟ้า (ค่าสูงสุดต่อเนื่อง) (V)	2.5(2.8)	42(50)	14(17)
ค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะ (W/kg)	4300	2900	1900
ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Wh/kg)	4.3	2.22	1.82
ค่ากระแสสูงสุด (A)	600	600	600
น้ำหนัก (kg)	0.525	16	6.5
ปริมาตร (L)	0.42	22	7.5
กระแสรั่วไหล (mA) 12 ชั่วโมง ที่ 25°C	5	10	10

จากที่กล่าวมา การที่อุปกรณ์สะสมพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้ามีลักษณะเด่นที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นการยากที่จะให้ระบบสะสมพลังงานแบบใดแบบหนึ่งมีทั้งค่าพลังงานจำเพาะ ค่ากำลังจำเพาะ และวัฏจักรชีวิต ที่ดีที่สุดทั้ง 3 ค่า โดยในการใช้งานสำหรับยานยนต์ไฟฟ้านั้น ความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ถือว่ามีความสำคัญที่สุด ดังนั้นการใช้ระบบสะสมพลังงานแบบผสมจึงเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพของยานยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบระบบสะสมพลังงานแบบลูกผสม หรือระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริด (Hybrid energy storage system หรือ HESS) ระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุสองชั้นจะช่วยให้ระบบสะสมพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดได้อย่างเพียงพอและมีประสิทธิภาพ โดยกำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าของโหลดสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 11

$$R_{e/p} = \frac{E_r}{P_r} \quad (3.39)$$

โดยที่ E_r และ P_r คือพลังงานไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับยานยนต์ไฟฟ้าตามลำดับ และ $R_{e/p}$ คือ สัดส่วนของ พลังงานไฟฟ้าต่อกำลังไฟฟ้าของระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริด และสามารถเขียนให้อยู่ในพจน์ของน้ำหนักได้ดังสมการที่ 3.40

$$R_{e/p} = \frac{W_b E_b + W_c E_c}{W_b P_b + W_c P_c} \quad (3.40)$$

เมื่อ W_b และ W_c คือน้ำหนักของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดตามลำดับ E_b และ E_c คือค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดตามลำดับ P_b และ P_c คือค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดตามลำดับ

จากสมการที่ 3.40 สามารถเขียน ได้ดังสมการที่ 3.41

$$W_c = kW_b \quad (3.41)$$

เมื่อ

$$k = \frac{E_b - R_{e/p} P_b}{R_{e/p} P_c - E_c} \quad (3.42)$$

ดังนั้นค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะของระบบสะสมพลังงานไฟฟ้าแบบไฮบริด คือ

$$E_{spe} = \frac{W_b E_b + W_c E_c}{W_b + W_c} = \frac{E_b + kE_c}{1 + k} \quad (3.43)$$

และค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะของระบบสะสมพลังงานไฟฟ้าแบบไฮบริด คือ

$$P_{spe} = \frac{W_b P_b + W_c P_c}{W_b + W_c} = \frac{P_b + kP_c}{1 + k} \quad (3.44)$$

3.4.4 การควบคุมการทำงานของระบบสะสมพลังงาน

สำหรับด้านวิศวกรรมยานยนต์ ระบบการจัดการพลังงานจะเป็นส่วนที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เพราะจะต้องมีการจัดการพลังงานอย่างรวดเร็ว และต้องเชื่อมต่อกับระบบอื่น ๆ บนยานพาหนะ เช่น ระบบจัดการระบบขับเคลื่อน ระบบปรับอากาศ ระบบสื่อสาร และระบบความปลอดภัย (Safety systems) ด้วยเหตุนี้ระบบการจัดการพลังงานจึงมีความแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน และเส้นทางการขับขี่ ดังนั้นการจะแก้ปัญหาดังกล่าวได้นั้นจำเป็นจะต้องมีระบบการจัดการพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าที่สามารถจ่ายโหลดได้เหมาะสม และเพียงพอ (Hiramatsu Toshiyuki, et.al., 2014) ในขณะที่มีโหลดแต่ละประเภทที่มีลักษณะทางไฟฟ้าต่างกัน การจัดการแบตเตอรี่ก็จะต้องแตกต่างกัน โดยหลักๆ แล้ว ระบบการจัดการแบตเตอรี่จะต้องติดตามตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญระหว่าง การจ่ายโหลด (Discharging) และการประจุไฟฟ้า (Charging) ซึ่งได้แก่ ค่าแรงดัน กระแส รวมถึงอุณหภูมิภายใน และภายนอกของแบตเตอรี่ โดยปกติการทำ การตรวจสอบมีจุดประสงค์เพื่อใช้สั่งการอุปกรณ์ป้องกัน การแจ้งเตือน (Alarms) การปลดแบตเตอรี่จาก โหลด หรือปลดจากการประจุไฟฟ้า เมื่อค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังกล่าวถึงขีดจำกัด ในงานด้าน ไฟฟ้ากำลังจะใช้แบตเตอรี่ เพื่อสำรองกำลังไฟฟ้าที่ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลัง และสำรองไฟฟ้าสำหรับ ระบบสื่อสารสำหรับเหตุการณ์การเกิดกระแสไฟฟ้าดับ ซึ่งระบบจัดการแบตเตอรี่จะต้องทำงานใน สถานการณ์ดังกล่าว โดยระบบการจัดการแบตเตอรี่จะต้องรวบรวมการจัดการทุกอย่างไม่เพียงแต่ การติดตามตรวจสอบ และป้องกันแบตเตอรี่เท่านั้น แต่รวมไปถึงการรักษาแบตเตอรี่ให้พร้อมจ่าย กำลังไฟฟ้าได้อย่างเต็มกำลัง โดยที่จะต้องรักษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะให้ยาวนานที่สุด อีกทั้งการควบคุมระบบการประจุไฟฟ้า ไปจนถึงแผนการบำรุงรักษาแบตเตอรี่ การควบคุมแบตเตอรี่ อย่างมีประสิทธิภาพ และปลอดภัย จึงจำเป็นจะต้องมีความเข้าใจในการทำงานของแบตเตอรี่ ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องมีการควบคุม และกระบวนการทางเคมี ทั้งคุณลักษณะที่ทำให้แบตเตอรี่ทำงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และในขณะที่แบตเตอรี่ทำงานผิดพลาด วัตถุประสงค์หลัก ของระบบการ จัดการแบตเตอรี่ทุกชนิดประกอบด้วย 3 ข้อดังต่อไปนี้

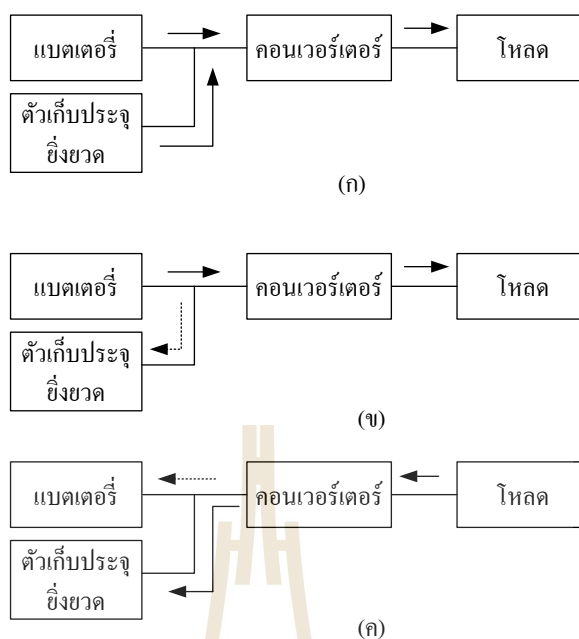
1. ป้องกัน เซลล์ของแบตเตอรี่ไม่ให้มีการใช้งานจนเกินขีดจำกัด และทำให้เกิดความเสียหาย
2. ยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่
3. ทำให้แบตเตอรี่มีความพร้อมที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดแต่ละแบบ

สำหรับระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริดแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุสองชั้นซึ่ง แหล่งจ่ายพลังงานคือหัวใจสำคัญของยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งแบตเตอรี่ก็ยังคงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลัก ของยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากแบตเตอรี่มีความหนาแน่นของพลังงานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ สะสมพลังงานอื่น ถึงแม้ว่าแบตเตอรี่จะมีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีมากขึ้น แต่แบตเตอรี่ก็มีความ

หนาแน่นของกำลังงานที่ไม่เพียงพอที่จะจ่ายให้กับโหลดที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงแบบฉับพลันได้ และแบตเตอรี่ไม่สามารถชาร์จหรือจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงฉับพลันได้เหมือนกับตัวเก็บประจุสองชั้นนอกจากนี้แบตเตอรี่ยังมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าโดยเฉพาะเมื่อใช้งานที่มีการชาร์จและจ่ายโหลดที่ใช้กระแสไฟฟ้าสูง โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สูงเกินกว่าความสามารถของแบตเตอรี่ก็จะจะทำให้เกิดความร้อนเกิน ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาด้านความปลอดภัยตามมา ด้วยเหตุนี้ของแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจึงมีขนาดใหญ่เกินความจำเป็นเนื่องจากจะต้องจ่ายโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าสูง ทำให้ใช้ระบบทำความร้อนเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้ แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่ยืนยาว ในขณะที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีคุณลักษณะที่สามารถประจุไฟฟ้าได้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง ทำให้สามารถจ่ายโหลดที่ต้องการกระแสสูงในช่วงเวลาสั้นๆ (ประมาณ 100-600A) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเหมาะการจ่ายโหลดช่วงเร่งความเร็วของยานยนต์ไฟฟ้า และการประจุไฟฟ้าของการจ่ายพลังงานกลับคืนจากการเบรก แต่อย่างไรก็ตามตัวเก็บประจุยิ่งยวดไม่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มากเหมือนแบตเตอรี่ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีแนวคิดที่จะมีการนำแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาทำงานร่วมกันเพื่อให้สามารถจ่ายกระแสได้สูง และจ่ายโหลดได้เพียงพอต่อการเดินทางโดยที่มีขนาดของแบตเตอรี่ที่ไม่ใหญ่เกินขนาด การจัดการการไหลของกำลังไฟฟ้า เพื่อการจ่ายโหลดร่วมกันที่เหมาะสมของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุสองชั้นหัวใจสำคัญของการทำงานดังกล่าว ขึ้นอยู่กับ อัลกอริทึม (Algorithm) และกลยุทธ์ของตัวควบคุม โดยมีจุดประสงค์โดยทั่วไปดังนี้

1. เพื่อให้มีระยะเวลาขับขี่ที่มากที่สุด
2. ลดการใช้งานเกินขนาดของอุปกรณ์
3. รักษาอายุการใช้งานของ HESS ให้ยืนยาวที่สุด
4. สามารถจ่ายโหลดในช่วงที่โหลดเพิ่มขึ้นสูงในทันทีได้

บ่อยครั้งที่อัลกอริทึมในการควบคุมจะมีหลายวัตถุประสงค์ โดยหลักการทำงานแล้วระบบจะต้อง รักษากระแสของแบตเตอรี่ให้คงที่เท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อลดความเครียดที่จะเกิดกับแบตเตอรี่ เพิ่มระยะทางการขับขี่ และยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ในขณะที่แบตเตอรี่จะทำหน้าที่ช่วยแบตเตอรี่ในการจ่าย โหลดที่มีกระแสสูงในช่วงกำลังโหลดสูงสุด (Peak power demand) โดยไม่ต้องมีการเพิ่มความจุของแบตเตอรี่ โดยเฉพาะในช่วงที่มีจ่ายพลังงานกลับคืนจากการเบรก ช่วงการเร่ง และการประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว (Fast charging) สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ยังคงเป็นปัญหาที่ยาก ในปัจจุบันยังไม่มีผลเฉลยของกลยุทธ์ระบบควบคุมที่ดีที่สุดสำหรับทุกสถานการณ์ โดยในรูปที่ 3.8 คือหลักการทำงานของ HESS สำหรับการจ่ายโหลดยานยนต์ไฟฟ้าในสถานการณ์ที่แตกต่างกัน (Mi Chris, et al, 2011)



(ก) โหลดต้องการกำลังไฟฟ้าสูง (ข) โหลดต้องการกำลังไฟฟ้าต่ำ
(ค) การจ่ายคืนกำลังไฟฟ้าจากการเบรก

รูปที่ 3.8 หลักการทำงานของ HESS

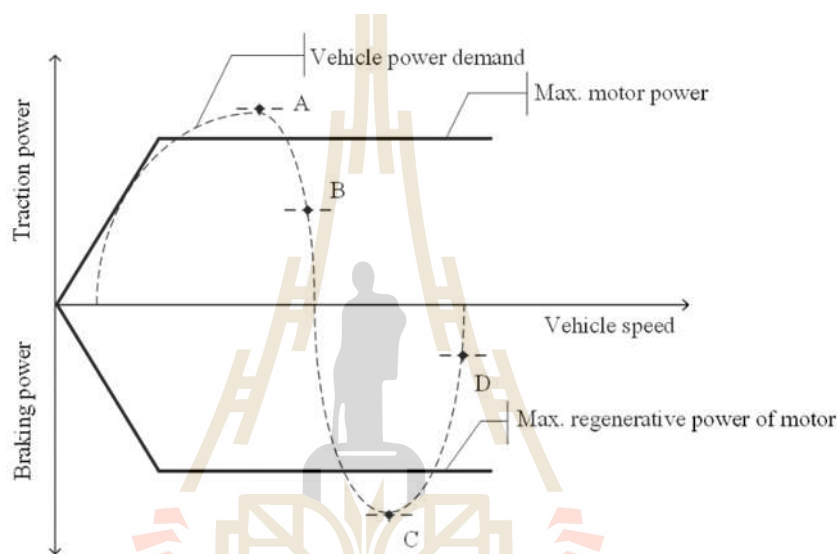
3.5 พลังงานคืนกลับจากการเบรก

ความสามารถในการเบรกอย่างปลอดภัยและสามารถจ่ายคืนพลังงานเพื่อนำมาใช้ในการขับเคลื่อนได้ สำหรับการขับขี่ในเขตเมืองโดยทั่วไปแล้ว แรงบิดที่ต้องการสำหรับการเบรกจะมีค่ามากกว่าแรงบิดของการขับเคลื่อน หรือในบางกรณีอาจจะมากกว่าแรงบิดที่มอเตอร์ลากจูงจะสามารถจ่ายได้ ในกรณีนี้จะต้องมีการควบคุมในการใช้ระบบเบรกแบบลูกผสมระหว่างเบรกทางไฟฟ้า และระบบเบรกทางกล เพื่อให้ได้แรงบิดในการเบรกที่เพียงพอและสามารถนำพลังงานจากการเบรกกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังรูปที่ 3.9 แสดงจุดทำงานของมอเตอร์ในการขับเคลื่อนและการเบรก

จากรูปที่ 3.9 ที่จุด A เป็นจุดทำงานที่มอเตอร์ไม่สามารถให้แรงลากจูงได้เพียงพอ จุดทำงาน B เป็นจุดทำงานที่มอเตอร์สามารถจ่ายกำลังได้ จุด C เป็นจุดที่มอเตอร์ไม่สามารถจ่ายกำลังในการเบรกได้เพียงพอโดยจุดนี้จะต้องมีการใช้เบรกทางกลร่วมด้วย ส่วนจุดทำงาน D เป็นจุดที่มอเตอร์สามารถมีกำลังในการเบรกได้เพียงพอ และสามารถจ่ายกำลังคืนกลับจากการเบรกได้ สมการที่ 3.45 แสดงกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า

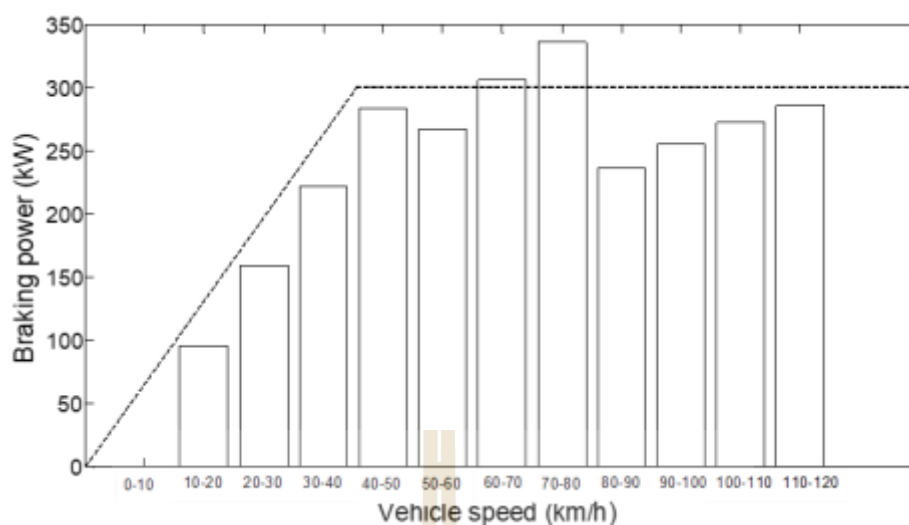
$$P_d = \frac{v}{1000} \left(Mg(f_r \cos \theta + \sin \theta) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \frac{dv}{dt} \right) \quad (\text{kW}) \quad (3.45)$$

$P_d > 0$ เมื่อล้อได้รับกำลังจากต้นกำลังแล้วทำให้ยานยนต์ขับเคลื่อนไปข้างหน้า ในกรณีนี้กำลังของการเบรคมีค่าเป็น 0 เมื่อ $P_d > 0$ เนื่องจากการเบรค พลังงานจลน์ของยานยนต์จะถูกใช้ไปในระบบเบรค ในกรณีนี้ กำลังขับเคลื่อนมีค่าเป็น 0 เมื่อทำการหาปริพันธ์ของสมการที่ 3.45 ตลอดช่วงเวลาที่ทำการขับขี่ ก็จะได้พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนและพลังงานที่ใช้ในการเบรค



รูปที่ 3.9 จุดทำงาน และเงื่อนไขการจ่ายพลังงานกลับจากการเบรค

พลังงานกลับคืนจากการเบรคมีความสัมพันธ์กับความเร็วของยานยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะการขับขี่ในเขตเมืองที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วและเบรคบ่อยครั้ง โดยทั่วไปจะไม่สามารถคืนพลังงานกลับจากการเบรคได้ที่ความเร็วต่ำ เนื่องจากที่ความเร็วต่ำจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force, EMF) หรือแรงดันที่โรเตอร์มีค่าต่ำกว่าที่จะจ่ายพลังงานคืนกับจากการเบรคได้ รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างกำลังจากการเบรคสะสมจำแนกตามระดับความเร็ว บนเส้นทาง UNECE Reg. 101 (UN Regulation No. 101 - Rev.3, 2018) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่มีการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรคที่ความเร็วต่ำกว่า 15 km/h ดังนั้นรูปที่ 3.10 จึงไม่มีการนำกำลังจากการเบรคที่ต่ำกว่า 15 km/h มาพิจารณา ดังนั้นที่ความเร็วต่ำกว่า 15 km/h ระบบเบรคทางกลจะทำงานแทนที่ระบบเบรคทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.10 กำลังงานจากการเบรกสูงสุดแบ่งตามย่านความเร็วสำหรับเส้นทาง UNECE Reg. 101

อีกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรกคือระบบสะสมพลังงานที่ใช้เก็บพลังงานคืนกลับจากการเบรก ถ้าหากระบบสะสมพลังงานสามารถรับกำลังไฟฟ้าจากการเบรกได้จำกัด ก็จะส่งผลให้พลังงานจากการเบรกเข้าสู่ระบบสะสมพลังงานน้อยลงไปด้วย ดังนั้นระบบสะสมพลังงานและความสามารถในการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรกจึงจะต้องมีการออกแบบให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถนำพลังงานคืนกลับจากการเบรกให้ได้มากที่สุด และระบบสะสมพลังงานมีขนาดที่เหมาะสมไม่มีขนาดใหญ่เกินไป

ค่าความหน่วงหรืออัตราการลดความเร็วของยานยนต์ไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรกโดยเมื่อใช้ความหน่วงในการเบรกเพิ่มขึ้นก็จะได้พลังงานจากการเบรกเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสำหรับรถยนต์โดยสารการเบรกด้วยความหน่วงไม่เกิน 0.15g ถือว่าเป็นการเบรกที่มีความนุ่มนวล แต่สำหรับการขับขี่ในเขตเมืองที่มีการเร่งและเบรกบ่อยครั้งอาจจะใช้ความหน่วงในการเบรกเกิน 0.3g ในบางกรณี

3.6 สรุป

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่ได้กล่าวถึงข้างต้นนี้ สามารถนำหลักการดังกล่าวมาใช้ในการเขียนการคำนวณแบบวนซ้ำในรูปแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการจำลองและคำนวณพฤติกรรมและค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการบูรณาการการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมในยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 4

การจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้าและการจัดการพลังงาน

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการจำลองการเคลื่อนที่ การทวนสอบผลของการจำลองเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการหาค่าพลังงานที่เหมาะสมที่สุด โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ระเบียบวิธีแบบกลุ่มอนุภาคในการหาค่าพลังงานที่เหมาะสมที่สุด และกล่าวถึงวิธีการและลำดับขั้นตอนที่ใช้ในการทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดสอบ พร้อมทั้งกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขในการหาค่าที่เหมาะสมของระบบบูรณาการในการจัดการพลังงาน

4.2 แบบจำลองและลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

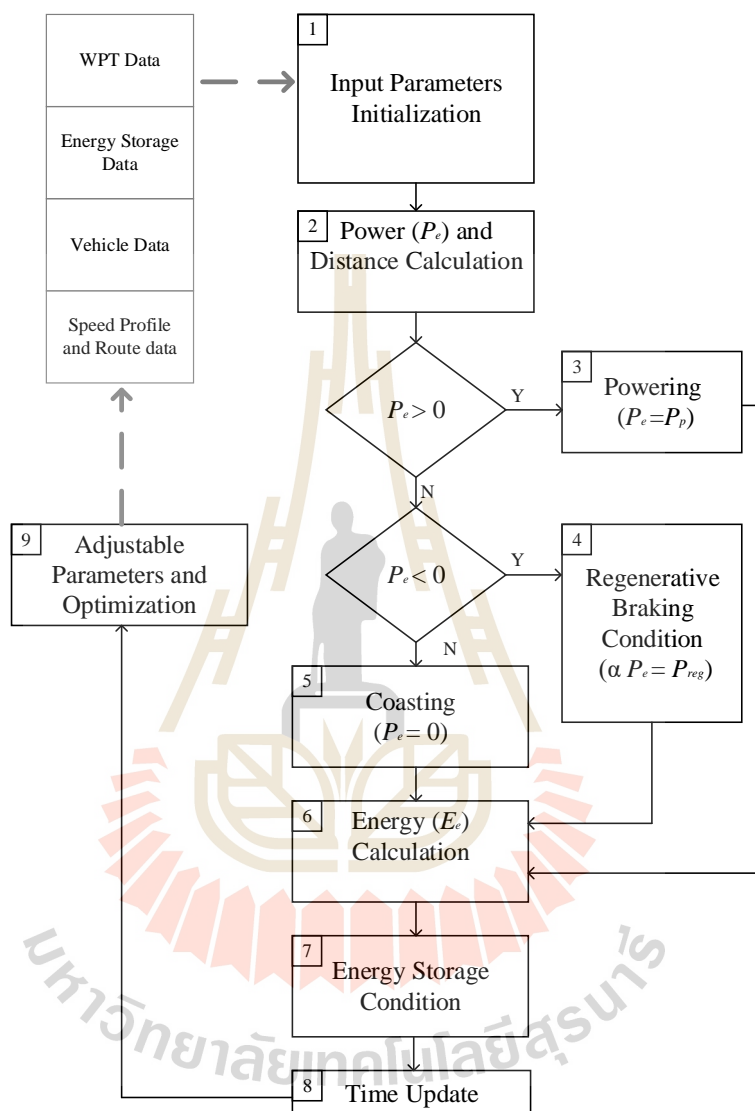
จากบทที่ 3 ที่ได้กล่าวถึงหลักการการจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อใช้ในการศึกษาด้านการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนวิธี (Algorithm) ของการจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และการทวนสอบหรือการยืนยันผลการจำลอง (Results confirmation) กับเอกสารทางวิชาการที่มีความน่าเชื่อถือ (Ehsani M., Gao, Y., & Emadi, 2010) เพื่อนำผลการจำลองดังกล่าวไปใช้ในระบบการจัดการพลังงานแบบบูรณาการสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นเป็นแหล่งพลังงานต่อไป

4.2.1 การจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการหาค่ากำลังและพลังงานที่ยานยนต์ไฟฟ้าต้องใช้ในการเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถนำผลการจำลองและแบบจำลอง ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์เพื่อพลังงานอย่างเหมาะสม นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบยานยนต์ไฟฟ้าและส่วนประกอบได้ รูปที่ 4.1 คือแผนภาพแสดงขั้นตอนการจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 นำเข้าข้อมูลและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เริ่มต้นการคำนวณ ได้แก่ ข้อมูลของอุปกรณ์การส่งกำลังแบบไร้สาย (Wireless power transfer, WPT) อุปกรณ์สะสมพลังงาน

ค่าพารามิเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้า รูปแบบความเร็วและข้อมูลของเส้นทาง โดยข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ในการจำลองในบทนี้สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 แผนภาพขั้นตอนการจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า

ขั้นที่ 2 คำนวณค่ากำลังทางไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อน (P_e) ในกรณีที่ P_e มีค่าเป็นบวก พลังงานคืนกลับจากการเบรกในกรณีที่ P_e มีค่าเป็นลบ และในกรณีที่ P_e มีค่าเท่ากับ 0 โดยที่ความเร็วของยานยนต์มีค่าเป็นบวก หมายถึงยานยนต์ไฟฟ้ากำลังแล่นด้วยความเฉื่อย (Coasting) ซึ่งไม่ใช้พลังงานในการขับเคลื่อนและไม่มีพลังงานคืนกลับจากการเบรก โดยสมการที่

ใช้ในการคำนวณค่าพลังงานทางไฟฟ้า คือสมการที่ 3.20 และ 3.21 และคำนวณระยะทางจากสมการที่ 3.19 ที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3

ขั้นที่ 3 นำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ในกรณีที่มีค่าเป็นบวกหรือกำลังงานที่ขายนต์ไฟฟ้าต้องการใช้ในการขับเคลื่อน P_p เข้าสู่การคำนวณค่าพลังงานในขั้นตอนที่ 6

ขั้นที่ 4 นำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ในกรณีที่มีค่าเป็นลบหรือกำลังงานที่ขายนต์ไฟฟ้าได้รับจากการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรก P_{reg} เข้าสู่การคำนวณค่าพลังงานในขั้นตอนที่ 6

ขั้นที่ 5 ในกรณีที่ขายนต์ไฟฟ้าแล่นด้วยความเฉื่อย ในขั้นตอนนี้จะทำการเก็บค่าเวลาและระยะทางที่ได้ แล้วส่งค่ากำลังงาน (ถึงแม้จะมีค่าเป็น 0) สู่อันดับที่ 6

ขั้นที่ 6 หาผลรวมของกำลังงาน T_i และพลังงานรวมทั้งหมดตั้งแต่ที่เวลา T_0 ถึง T_i โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.22

ขั้นที่ 7 พิจารณาเงื่อนไขของการจ่ายกำลังและพลังงานไฟฟ้าในกรณีที่มีการจำลองโดยผนวกระบบสะสมพลังงานในขายนต์ เช่น เมื่อระบบสะสมพลังงานมีสถานะของประจุ หรือ SOC เป็น 100 % ก็จะไม่สามารถทำการประจุไฟฟ้าได้ ไม่ว่าจะมาจากการจ่ายคืนพลังงานจากการเบรก หรือจากการประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย และเมื่อ ค่า SOC ต่ำกว่าระดับต่ำที่สุดที่ระบบสะสมพลังงานจะจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ก็จะตัดการจ่ายกำลังไฟฟ้า และพิจารณาถึงการจ่ายค่ากำลังสูงสุดที่ระบบแบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ โดยเงื่อนไขดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากสมการ 4.18 ถึง 4.19 สำหรับกรณีที่ไม่ได้พิจารณาระบบสะสมพลังงาน โดยพิจารณาเฉพาะความต้องการการใช้พลังงานของขายนต์ไฟฟ้า (EV's Energy consumption) ก็จะข้ามขั้นตอนนี้ไป

ขั้นที่ 8 ทำการปรับปรุงเวลาในการจำลองโดยการบวกผลรวมเวลาสะสมด้วยค่าผลต่างเวลา หรือเวลาในการชักตัวอย่าง (Sampling time)

ขั้นที่ 9 ในกรณีที่มีการศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการใช้กำลังงานและพลังงาน ก็จะเข้าสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ระเบียบวิธีแบบกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization: PSO) ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.3 ในกรณีที่ไม่ต้องหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สามารถข้ามขั้นตอนนี้ได้

4.2.2 การยืนยันผลการจำลอง

ผลของการจำลองทางคณิตศาสตร์จะต้องทำการตรวจสอบและยืนยันผลการจำลองเพื่อเป็นการทวนสอบว่าแบบจำลองและผลการจำลองมีความน่าเชื่อถือหรือไม่ ในหัวข้อนี้จะดำเนินการเปรียบเทียบผลการจำลองจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งทำการคำนวณแบบวนซ้ำโดยใช้โปรแกรมคำนวณและจำลองผลขายนต์ไฟฟ้าสำหรับการจัดการพลังงาน และการออกแบบ (Electric vehicle simulation for energy management and design, EVSED) ที่ ได้ พัฒนา ขึ้น

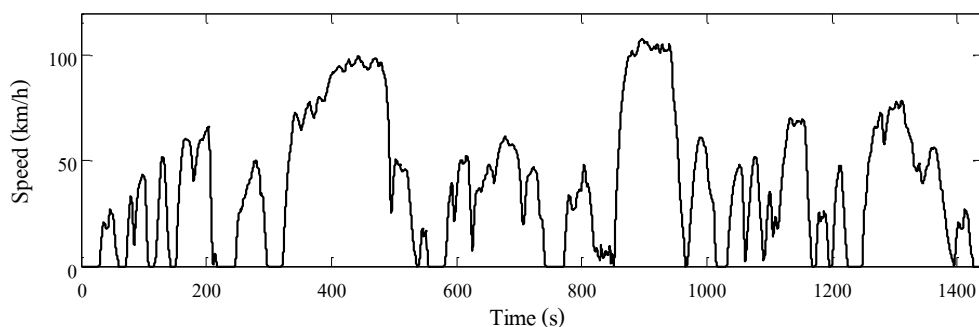
เปรียบเทียบกับผลการจำลองจากเอกสารอ้างอิงที่มีความน่าเชื่อถือ โดยเปรียบเทียบพลังงานของการขับเคลื่อน (Traction energy) ข้อมูลเบื้องต้นของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลอง แสดงในตารางที่ 4.1 และข้อมูลของเส้นทางหรือวัฏจักรการขับขี่ (Driving cycle) โดยจะทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 3 เส้นทาง ได้แก่ LA92 US06 และ ECE15 ซึ่งเป็นเส้นทางมาตรฐานในการทดสอบ (Dynamometer drive schedules USEPA, 2018) ข้อมูลของเส้นทางดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.2 และลักษณะของความเร็ว และเวลาของวัฏจักรการขับขี่ แสดงดังรูป 4.2 ถึง 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของยานยนต์ที่ใช้ในการจำลองเพื่อยืนยันผลการจำลอง

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
มวล (Vehicle Mass)	M	kg	1500
สัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน	f_r		0.01
สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ	C_D		0.3
พื้นที่หน้าตัด	A	m^2	2.2
ความหนาแน่นของอากาศ	ρ_o	kg/m^3	1.1455

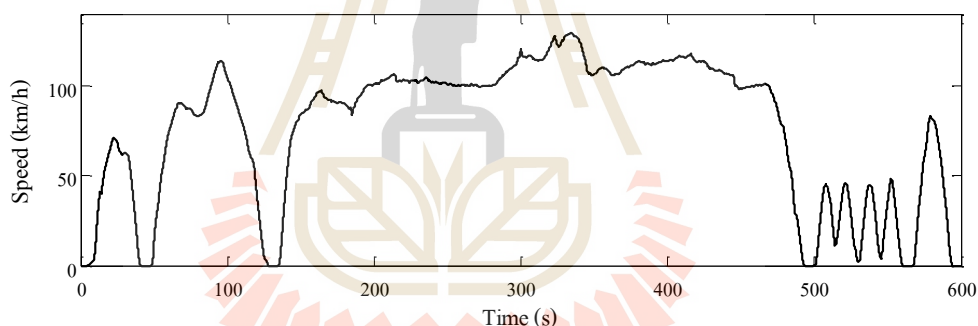
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลของเส้นทางที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลการจำลอง

พารามิเตอร์/เส้นทาง	LA92	US06	ECE15
ความเร็วสูงสุด (km/h)	108.15	129.23	120
ความเร็วเฉลี่ย (km/h)	39.60	77.84	48
ระยะทางต่อรอบการขับขี่ (km)	15.80	12.89	7.95
เวลาที่ใช้ในการขับขี่ (s)	1435	596	595
ความเร่งสูงสุด (m/s^2)	3.08	3.75	1.05
ความหน่วงสูงสุด (m/s^2)	-3.93	-3.08	-1.39



รูปที่ 4.2 รูปแบบความเร็วและเวลาของเส้นทาง LA92

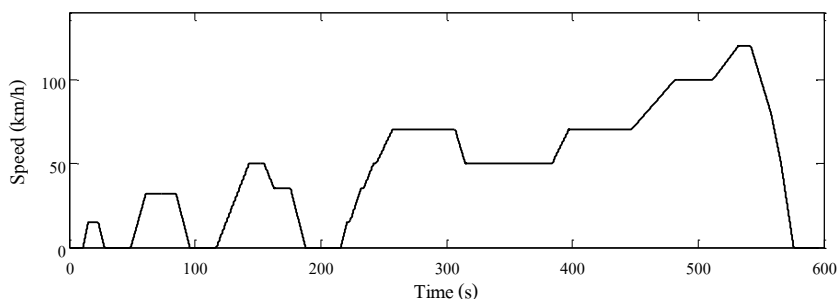
เส้นทาง LA92 เมื่อเทียบกับรูปแบบการขับขี่ในเขตเมือง เส้นทาง LA09 จะมีความเร็วสูงสุด และความเร็วเฉลี่ยที่มากกว่า แต่ใช้เวลาในการจอดหรือหยุดต่อระยะทางที่น้อยกว่า และมีอัตราเร่งสูงสุดที่มากกว่า



รูปที่ 4.3 รูปแบบความเร็วและเวลาของเส้นทาง US06

เส้นทาง US06 เป็นเส้นทางที่ใช้ความเร่งสูง และสูงที่สุดในเส้นทางทดสอบที่ได้เลือกใช้ในการเปรียบเทียบในเอกสารฉบับนี้ ซึ่งรูปแบบของการขับขี่นี้ใช้แทนสถานการณ์การขับขี่แบบรีบเร่ง (Aggressive)

เส้นทาง ECE15 ที่ใช้ในเอกสารฉบับนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงที่ 1 จะใช้เวลาการขับขี่อยู่ในช่วงวินาที ที่ 0 ถึงวินาที ที่ 195 จะเป็นรูปแบบของการขับขี่ในเขตเมือง คือมีเวลาในการหยุดรถเมื่อเทียบกับระยะทางที่มาก และมีความเร็วต่ำ ช่วงที่ 2 จากวินาที ที่ 196 ถึงวินาที ที่ 595 จะเป็นลักษณะของการขับเคลื่อนในแบบชานเมือง คือมีความเร็วสูงและมีการขับขี่ที่ต่อเนื่อง



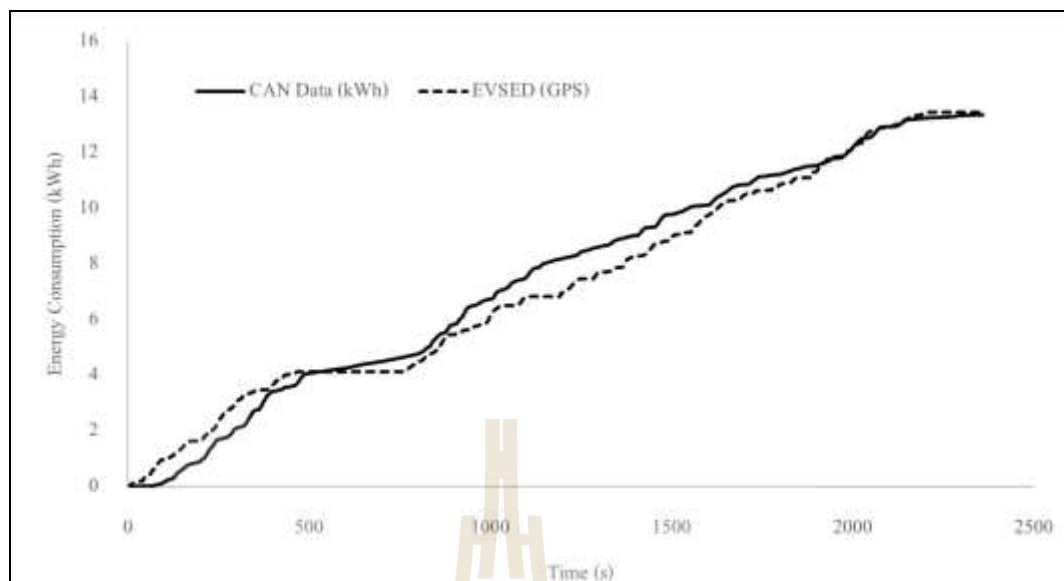
รูปที่ 4.4 รูปแบบความเร็วและเวลาของเส้นทาง ECE15

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าพลังงานของการขับเคลื่อน

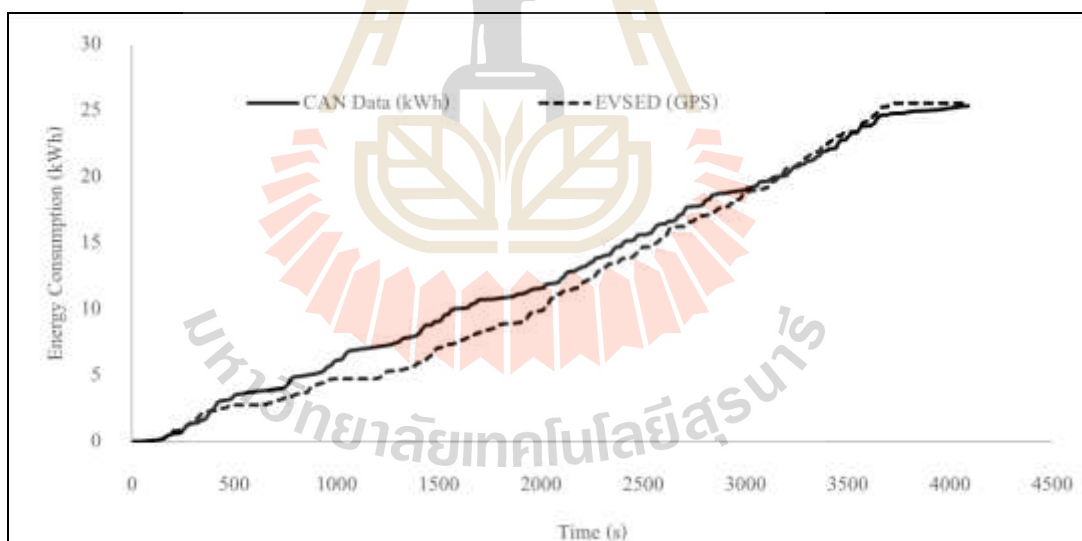
วัฏจักรการขับขี่ (Driving Cycle)	พลังงานของการขับเคลื่อน (kWh)		% ความคลาดเคลื่อน
	อ้างอิง	EVSED	
LA92	2.3559	2.3577	0.0764
US06	2.2655	2.2490	0.7283
ECE15	0.9691	0.9517	1.7954

จากผลการจำลองในตารางที่ 4.3 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดไม่เกิน 1.8 % และความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเพียง 0.0764 % ซึ่งถือว่า โปรแกรมคำนวณและจำลองผลยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับการจัดการพลังงาน และการออกแบบ (EVSED) มีความแม่นยำ

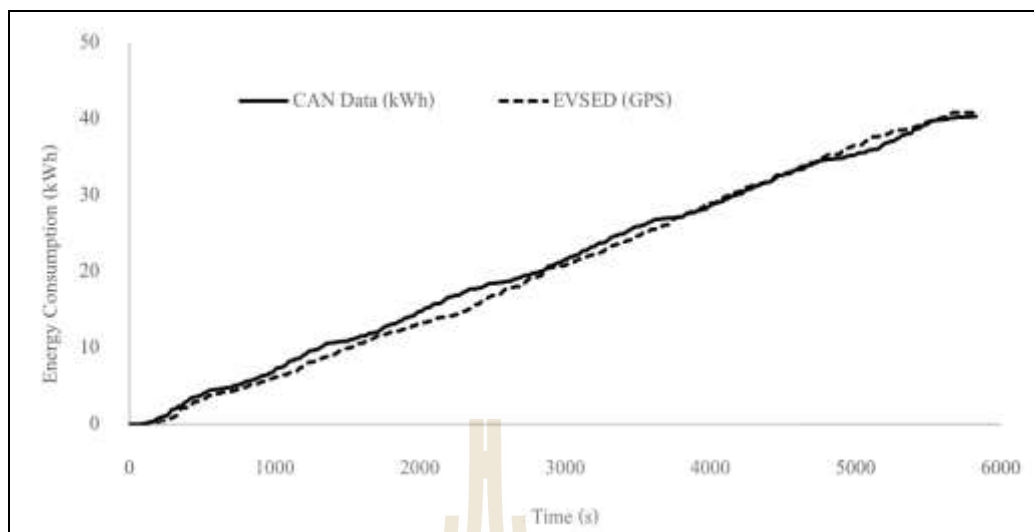
นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับค่าวัด โดยการใช้การเก็บข้อมูลของพลังงานที่ขั้วของแบตเตอรี่ ในการทดสอบการเดินรถของรถยนต์โดยสารไร้มลพิษของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือ PEA ZeBus ที่ทำการวิจัยและพัฒนาโดยทีมวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทำการทดสอบเดินรถไฟฟ้าโดยสารในเส้นทางถนนรอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แล้วเก็บข้อมูลการใช้พลังงานผ่านระบบ CAN (Control area network) แล้วทำการเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานที่คำนวณได้จากโปรแกรมจำลองผลการใช้พลังงาน (EVSED) โดยนำเข้าข้อมูลของเส้นทาง หรือรูปแบบของการใช้ความเร็ว (Speed profile) จากระบบบอกตำแหน่งด้วยดาวเทียม (GPS) ผลการจำลองสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.5 ถึง 4.7 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบข้อมูลการใช้พลังงานและผลการจำลองของเส้นทาง SUT091116



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบข้อมูลการใช้พลังงานและผลการจำลองของเส้นทาง SUT111116



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบข้อมูลการใช้พลังงานและผลการจำลองของเส้นทาง SUT181116r1

ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบว่าวัดการใช้พลังงานและผลการคำนวณ

วัฏจักรการขับขี่	พลังงานของการขับเคลื่อน (kWh)			% ความคลาดเคลื่อน
	Estimated by Battery Model	CAN Data	EVSED	
SUT091116	12.544	13.347	13.458	0.832
SUT111116	29.792	25.338	25.554	0.852
SUT181116r1	33.712	40.367	40.844	1.182

วัฏจักรการขับขี่ใช้เส้นทางรอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้ 3 ชุดข้อมูล คือ SUT091116 (ชื่อข้อมูลหมายถึงวันที่ทำการทดสอบ เช่น ทำการทดสอบวันที่ 09 เดือน พฤศจิกายน ปี ค.ศ. 2016 เป็นต้น) SUT111116 และ SUT181116r1 แล้วทำการเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานจากการวัด และผลจากการจำลองพบที่มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดไม่เกิน 1.2 % และความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเพียง 0.832 % เมื่อเทียบกับค่าวัด ดังนั้น โปรแกรม EVSED ที่พัฒนาขึ้นจึงเหมาะสมกับการใช้งานวิจัยสำหรับระบบการจัดการพลังงาน และการใช้พลังงานในยานยนต์ไฟฟ้า

4.3 การจัดการพลังงานและการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบ และขอบเขตเงื่อนไขในการหาค่าการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด โดยจะกล่าวถึงระเบียบวิธีแบบกลุ่มอนุภาคที่จะใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ ขั้นตอนการทดสอบและการเปรียบเทียบผล

4.3.1 ระเบียบวิธีแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO)

ฝูงอนุภาคเป็นการจำลองโครงสร้างทางสังคมของกลุ่มมีชีวิตอย่างง่าย การรวมกลุ่มทางสังคมของสิ่งมีชีวิตเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะบางประการ เช่น การหาอาหารเพื่อความอยู่รอดของกลุ่ม เป็นส่วนสำคัญที่ช่วยผลักดันให้ประชากรส่วนใหญ่ หรือทั้งหมดมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกัน กลุ่มสิ่งมีชีวิตที่มีพฤติกรรมในลักษณะนี้ได้แก่ ฝูงผึ้ง (Bee swarm) ฝูงปลา (Fish school) ฝูงนก (Bird flock) หรือ อนานิคมของมด (Ant colony) เป็นต้น (ษณัฒย์ กุลวรรณาภิพนัง, 2554) การกำหนดค่าตั้งต้นของแต่ละอนุภาค จะทำโดยการสุ่มทั้งตำแหน่ง \vec{x}_i และความเร็ว \vec{v}_i แล้วประเมินค่าของฟังก์ชัน โดยตัวแปรด้านเข้า (Input value) คือค่าตำแหน่งของอนุภาค จากนั้นทำการปรับตำแหน่งและความเร็ว แล้วประเมินค่าฟังก์ชันใหม่ในรอบของการคำนวณ (Iteration) หรือทุกช่วงของตัวแปรเวลา (Time step) เมื่ออนุภาคค้นพบรูปแบบที่ดีกว่าที่เคยพบก่อนหน้านี้ รูปแบบดังกล่าวก็จะถูกเก็บไว้ที่เวกเตอร์ $\vec{p}_i(t)$ เมื่อพิจารณาในพจน์ของการค้นหาในรูปแบบของแต่ละอนุภาค (Cognitive Component) (R Eberhart, J Kennedy, 1995) ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งประกอบไปด้วยผลต่างของ ตำแหน่งของอนุภาคที่ i ที่ทำให้ได้ผลเฉลยที่ดีที่สุดที่อนุภาคที่ i ค้นพบ หรือ $\vec{p}_i(t)$ กับตำแหน่งปัจจุบัน (ตำแหน่งของอนุภาค i ที่รอบการคำนวณที่ k) คูณด้วยค่าจากการสุ่ม ผลของพจน์นี้ทำให้ตำแหน่งของการค้นหาโคจรแกว่งไปมา (Oscillated trajectory) รอบจุด $\vec{p}_i(t)$ ในทำนองเดียวกัน พจน์ของฝูงอนุภาค (Social component) ซึ่งประกอบไปด้วยผลต่างของตำแหน่งที่ให้ผลเฉลยที่ดีที่สุดสำหรับฝูงอนุภาค (Global best) กับตำแหน่งปัจจุบันคูณด้วยค่าจากการสุ่ม ผลของพจน์นี้ทำให้ตำแหน่งของการค้นหาโคจรแกว่งไปมารอบจุด $\vec{g}(t)$ ดังนั้นการค้นหาของหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค ดังแสดงดังรูปที่ 4.8 การปรับทิศทางการค้นหาในแต่ละรอบการคำนวณจะขึ้นอยู่กับ สัดส่วนของค่าการสุ่มของพจน์ฝูงอนุภาค และพจน์การค้นหาของแต่ละอนุภาค (Cognitive component and social component) ผลของการปรับปรุงทิศทางนี้จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านปริภูมิเพื่อค้นหารอบ ๆ สองค่าที่ดีที่สุดดังกล่าว กระบวนการของการค้นหาแบบวิธีกลุ่มอนุภาคสามารถเขียนเป็นรหัสจำลอง (Pseudocode) ได้ดังต่อไปนี้

กำหนดค่าตัวแปรสุ่มและจำนวนประชากร (Initialize population)

Do

For $i = 1$ to Population size

If $f(\vec{x}_i) < f(\vec{p}_i)$ then $\vec{p}_i = \vec{x}_i$

$\vec{g} = \min(\vec{p}_{neighbor})$

For $j = 1$ to dimension

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + r_1c_1(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + r_2c_2(g_j(t) - x_{ij}(t))$$

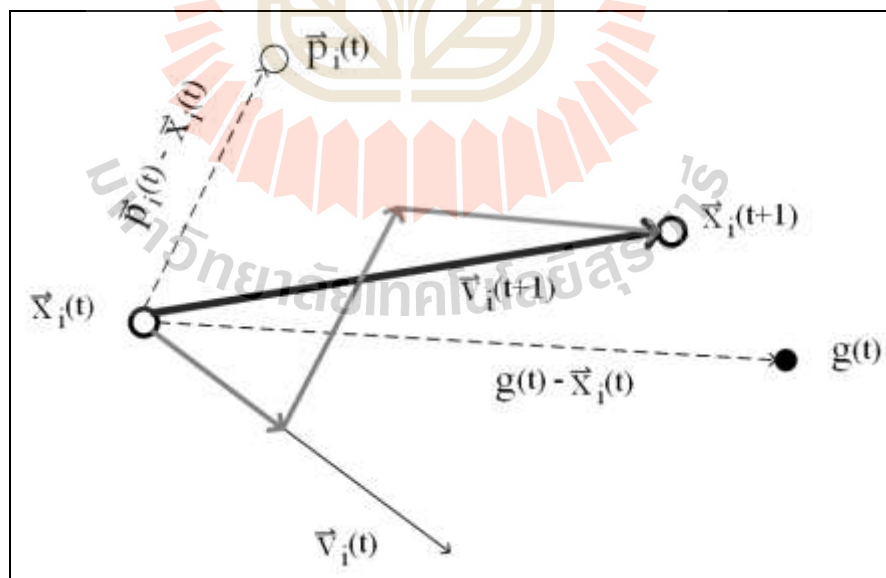
$$v_{ij}(t+1) = \text{sign}(v_{ij}(t+1)) \cdot \min(\text{abs}(v_{ij}(t+1)), v_{max})$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1)$$

Next d

Next i

ดำเนินการและหยุดเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไข (Until termination criterion is met)



รูปที่ 4.8 การปรับปรุงทิศทางของอนุภาค

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + r_1 c_1 (p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + r_2 c_2 (g_j(t) - x_{ij}(t)) \quad (4.1)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (4.2)$$

จากสมการ 4.1 และ 4.2 จะพบว่าการลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุดจะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรสุ่ม ในบางกรณีค่าตัวแปรสุ่มที่ไม่เหมาะสม จะทำให้การลู่เข้าสู่ค่าตอบใช้เวลานาน หรือไม่ลู่เข้า ดังนั้นจึงต้องมีการจำกัดค่าของตัวแปรสุ่มด้วยสัมประสิทธิ์ (Constriction coefficients) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้การจำกัดค่าของตัวแปรสุ่มด้วยสัมประสิทธิ์โดยอ้างอิงจาก (M. Clerc and J. Kennedy, 2002) และแสดงดังสมการที่ 4.3 ถึง 4.11

$$\chi = \frac{2k}{|2 - \phi - \sqrt{\phi^2 - 4\phi}|} \quad (4.3)$$

โดยที่

$$0 \leq k \leq 1 \quad (4.4)$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \geq 4 \quad (4.5)$$

$$w = \chi \quad (4.6)$$

$$c_1 = \chi \phi_1 \quad (4.7)$$

$$c_2 = \chi \phi_2 \quad (4.8)$$

$$k = 1 \quad (4.9)$$

$$\phi_1 = 2.05 \quad (4.10)$$

$$\phi_2 = 2.05 \quad (4.11)$$

4.3.2 วิธีการทดสอบและเส้นทางที่ใช้ในการทดสอบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการทดสอบและเปรียบเทียบการใช้พลังงานของวิธีการที่บูรณาการขึ้นและปรับปรุงรูปแบบความเร็วใหม่เปรียบเทียบกับรูปแบบความเร็วอ้างอิง โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำเข้าค่าพารามิเตอร์และข้อมูลเส้นทางและรูปแบบความเร็ว โดยในการศึกษานี้ทำการจำลองบน 3 เส้นทางคือ UNECE R.101 NYCC และ SUT091116 โดยทำการจำลองที่ละเส้นทาง

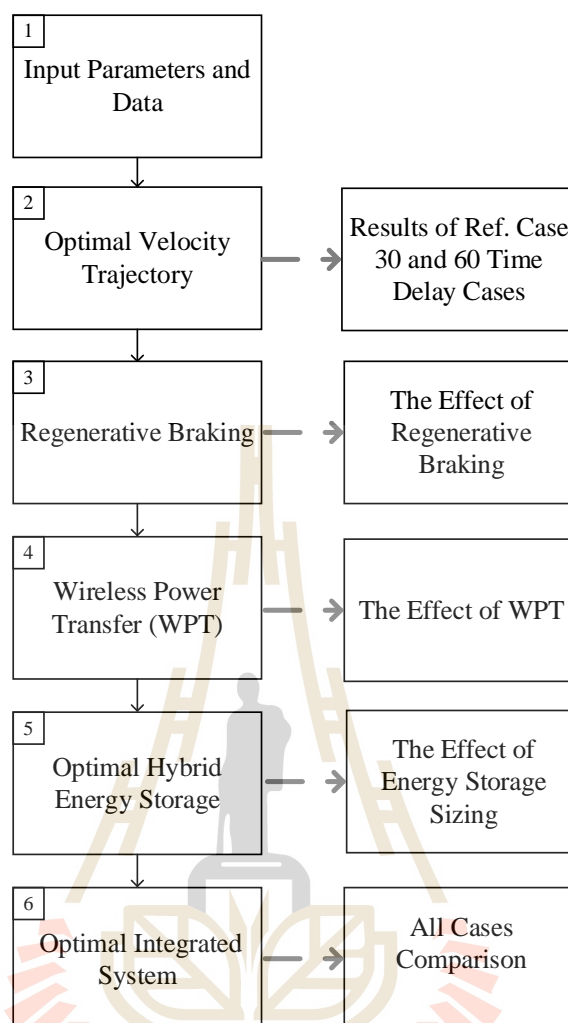
ขั้นตอนที่ 2 ดำเนินการหารูปแบบความเร็วใหม่ภายใต้เงื่อนไขสภาพการจราจรในสภาวะแวดล้อมแบบเปิด (Open Environment) สำหรับการให้พลังงานที่เหมาะสม โดยรายละเอียดของขั้นตอนนี้ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3.3 การปรับปรุงรูปแบบความเร็วเพื่อการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม แล้วทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับรูปแบบความเร็วอ้างอิง

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาผลกระทบที่มีต่อการจ่ายคืนพลังงานจากการเบรกโดยการจำลองการจ่ายคืนพลังงานจากการเบรกเพิ่มเติมในแบบจำลองที่ได้จากขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 4 เพิ่มการประจุไฟฟ้าแบบไร้สายในแบบจำลองที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 โดยทำการเพิ่มการจำลองการประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย (Y. J. Jang, E. S. Suh and J. W. Kim, 2016) จำนวน 1 ชุดในเส้นทางที่ใช้จำลอง แล้วเปรียบเทียบผลการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 5 ดำเนินการหาค่าน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมที่สุด เมื่อใช้ระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริดระหว่างแบตเตอรี่ลิเทียมและตัวเก็บประจุ 2 ชั้น หรือตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Ultra-Capacitor) แล้วเปรียบเทียบการทดสอบกับรูปแบบความเร็วอ้างอิง

ขั้นตอนที่ 6 ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองในแต่ละกรณีกับกรณีทำการบูรณาการร่วมกันตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นที่ 5 และสามารถเขียนสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 4.9

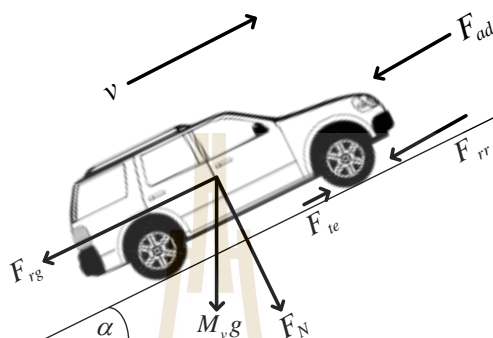


รูปที่ 4.9 แผนภาพการทดสอบ

4.3.3 การปรับปรุงรูปแบบความเร็วเพื่อการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม

ในหัวข้อนี้เกี่ยวข้องกับการใช้จำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematic modeling) เพื่ออธิบายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า (Vehicle movement) เพื่อหาค่าการใช้กำลังงานและพลังงาน (Power and energy consumption) จากนั้นจะทำการหาค่าความเร่งที่ทำให้ใช้พลังงานน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขการสร้างรูปแบบความเร็ว (Vehicle trajectory) โดยการปรับปรุงรูปแบบความเร็วดังกล่าวเป็นวิธีการใหม่ที่ใช้ในการศึกษาการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งระเบียบวิธีการทำงานของการปรับปรุงรูปแบบความเร็วใหม่จะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อนี้

เมื่อกำลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนจะมีค่าเท่ากับกำลังงานที่ต้านทานการเคลื่อนที่ (resistance power) บวกกับกำลังงานที่ต้านการเคลื่อนที่จากความเร่ง (Dynamic power for Acceleration of the vehicle) ดังแสดงในสมการที่ 4.12 และรูปที่ 4.10 แสดงแรงที่กระทำต่อยานยนต์ ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 เพื่อความสะดวกในการอ้างอิงจึงได้นำมาแสดงอีกครั้ง



รูปที่ 4.10 แผนภาพแรงที่กระทำต่อยานยนต์ไฟฟ้าบนพื้นเอียง

$$P_e = \frac{v}{\eta_t} (F_{rr} + F_{ad} + F_{rg} + M_v \delta \frac{dv}{dt}) \quad (4.12)$$

กำหนดให้ ความเร็วของยานยนต์คือ V มวลของยานยนต์ M , อยู่บนพื้นเอียงทำมุม α กับแนวพื้นราบ ดังรูปที่ 4.10 แรงที่กระทำกับยานยนต์ประกอบไปด้วย แรงต้านจากอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic drag: F_{ad}) แรงกระทำจากระดับความเอียง (Gradient force: F_{rg}) และแรงเสียดทานจากการหมุน (Rolling resistance force : F_{rr}) ส่วน $\frac{dv}{dt}$ หรือ a คือ ค่าความเร่ง และ δ คือแฟกเตอร์ความเฉื่อยจากการหมุน (Rotational Inertia Factor) ความสูญเสียจากการส่งกำลังระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ และในระบบไฟฟ้าทั้งหมดแทนด้วยค่าประสิทธิภาพ η_t สมการที่ 4.12 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 4.13

$$P_e = \frac{v}{1000\eta_t} (Mgf_r \cos \alpha + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + Mg \sin \alpha + M_v \delta \frac{dv}{dt}) \text{ kW} \quad (4.13)$$

การใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากการหาค่าปริพันธ์ของการใช้กำลังงาน ซึ่งแสดงดังสมการที่ 4.14

$$E_e = \int_{t_0}^{t_{final}} P_e dt \quad (4.14)$$

เมื่อ E_e คือ การใช้พลังงานสุทธิจากระบบสะสมพลังงาน
 เพื่อทำการหาค่าการใช้พลังงานที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ระเบียบวิธีแบบกลุ่มอนุภาค
 (PSO) ซึ่งสามารถเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) และเงื่อนไข ได้ดังสมการที่ 4.15

$$\min_{E_e} f(E_e) = \min_{E_e} (-E_0 + E_e(a_1, a_2)) \quad (4.15)$$

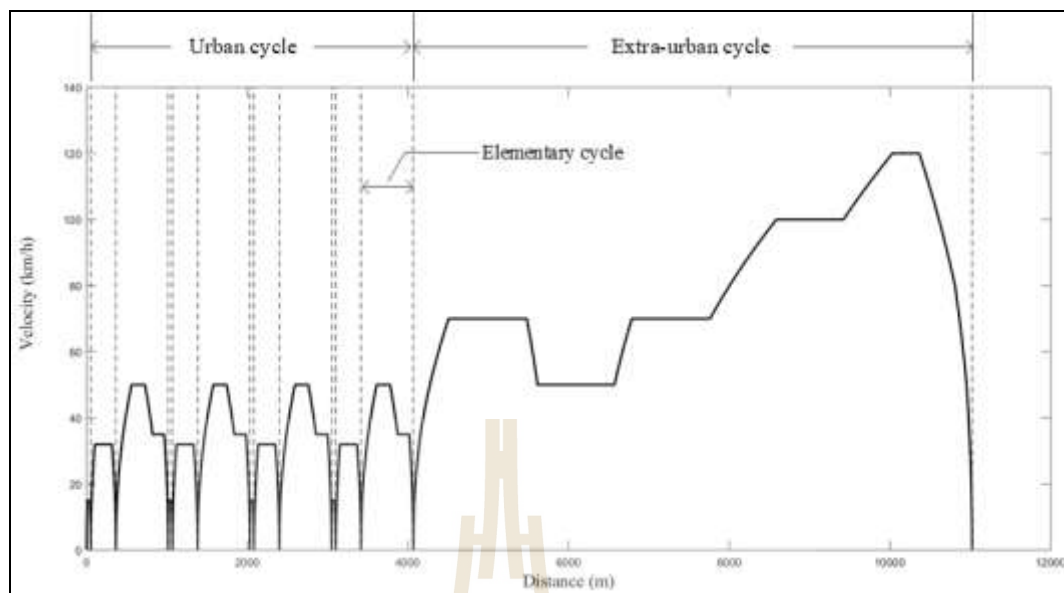
ภายใต้เงื่อนไข:

$$\begin{aligned} 0 &\leq a_1 \leq a_{ref_max1} \\ a_{ref_max_br} &\leq a_2 \leq a_{ref_max2} \\ (t_1 + t_2 + \dots + t_n) &\leq t_{final} \end{aligned}$$

เมื่อ

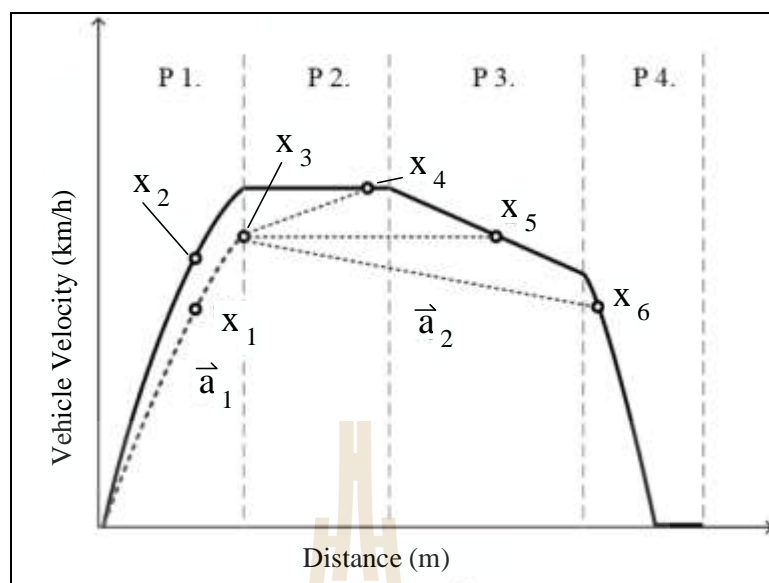
$$t_{final} = t_{ref} + t_{late}$$

เมื่อ E_0 คือระดับพลังงานเริ่มต้นของระบบสะสมพลังงาน a_1 และ a_2 คือค่าความเร่งที่ได้
 จากกระบวนการหาค่าพลังงานที่เหมาะสมที่สุด $a_{ref_max_br}$ คือ ค่าความหน่วงที่ใช้ในช่วงเบรก
 a_{ref_max1} คือ ค่าความเร่งสูงสุดของรูปแบบความเร็วอ้างอิง a_{ref_max2} คือค่าความเร่งสูงสุด หรือ
 ความหน่วงของรูปแบบความเร็วอ้างอิงที่อยู่ในช่วงความเร็วคงที่หรือช่วงของการเคลื่อนที่ด้วยความ
 เฉื่อย (Constance velocity and coasting period) $(t_1 + t_2 + \dots + t_n)$ คือ คือเวลาในการขับขี่ของวัฏ
 จักรขับขี่ย่อย (Elementary cycles) t_{final} คือเวลาในการขับขี่รวมทั้งหมด t_{ref} คือเวลาในการขับขี่
 ของรูปแบบความเร็วอ้างอิง และ t_{late} คือเวลาที่กำหนดให้ถึงที่หมายช้ากว่ารูปแบบความเร็วอ้างอิง
 ซึ่งให้ผู้ขับขี่สามารถใส่ค่าเพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการหาค่าพลังงานที่เหมาะสม โดยกระบวนการหา
 ค่าพลังงานที่เหมาะสมที่สุดใช้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้น้อยกว่า 10^{-6}



รูปที่ 4.11 รูปแบบความเร็วของเส้นทาง UNECE R.101

ในหัวข้อนี้จะใช้รูปแบบความเร็วของเส้นทาง UNECE Reg. 101 (UN Vehicle Regulations – 1958 UNECE, 2018) เป็นรูปแบบความเร็วตัวอย่างเพื่อใช้ในการอธิบายขั้นตอน (Algorithm) ในการสร้างรูปแบบความเร็วใหม่เพื่อการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม โดยเส้นทางดังกล่าวประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือวัฏจักรการขับขี่ในเขตเมือง (Urban driving cycle) และวัฏจักรการขับขี่นอกเขตเมือง (Extra-urban driving cycle) และผู้วิจัยยังได้แบ่งออกเป็นวัฏจักรย่อย (Elementary driving cycle) อีก 13 วัฏจักร โดยวัฏจักรย่อย 1 วัฏจักรหมายถึงตำแหน่งจากจุดจอดหรือจุดที่มีความเร็วเป็นศูนย์ถึงตำแหน่งที่มีความเร็วเป็นศูนย์ครั้งถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ข้อมูลของเส้นทางทดสอบมีดังต่อไปนี้ ระยะทางรวม 11.022 km ความเร็วสูงสุด 120 km/h ความเร็วเฉลี่ย 33.6 km/h ใช้เวลาในการขับขี่ (Driving time) 1,180 วินาที (s)



รูปที่ 4.12 วัฏจักรรูปแบบความเร็วของยานยนต์

โดยทั่วไปในวัฏจักรย่อย (Elementary Cycle) 1 วัฏจักรจะมีรูปแบบความเร็ว (Velocity profile) ในการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle) ที่สามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังรูปที่ 4.12 ส่วนที่ 1 (P 1.) (Segment 1.) เป็นช่วงในการเร่งความเร็ว เมื่อเร่งความเร็วถึงค่าหนึ่งจะเข้าสู่ส่วนที่ 2 (P 2.) (Segment 2.) เป็นช่วงที่มีความเร็วคงที่ (Constant Velocity) หรือมีความเร่ง (Acceleration) เป็นศูนย์ ส่วนที่ 3 (P 3.) เป็นช่วงที่ยานยนต์ไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงจากแรงเฉื่อย (Coasting) หรือสามารถพิจารณาใช้การเบรกในการลดความเร็วร่วมด้วย ส่วนสุดท้ายคือส่วนที่ 4 (P 4.) จะทำการเบรก (Braking) เพื่อให้ความเร็วลดลงเป็นศูนย์ หรือหยุดหนึ่งในการขับขี่จริงอาจจะประกอบด้วย ส่วนที่ 2 และ 3 หรือส่วนใดส่วนหนึ่ง ก็ได้ ใน 1 เส้นทาง (Route Cycle) จะประกอบด้วยวัฏจักรการขับขี่ย่อยหลายวัฏจักรด้วยกัน ดังรูปที่ 4.11 คือวัฏจักรขับขี่ทดสอบ (Test Driving route cycle) UNECE Reg. 101 ซึ่งประกอบด้วยวัฏจักรการขับขี่ย่อย (Elementary cycle) 13 วัฏจักร

ผู้วิจัยจึงสร้างขั้นตอนวิธีหรืออัลกอริทึม (Algorithm) ในการหารูปแบบความเร็วของการขับขี่ใหม่เพื่อให้ยานยนต์ไฟฟ้าใช้พลังงานอย่างเหมาะสมภายใต้เงื่อนไขของเวลาที่ผู้ขับขี่กำหนด ซึ่งจะต้องมีรูปแบบที่คล้ายเดิม เพื่อให้รูปแบบของความเร็วที่สร้างขึ้นใหม่สามารถใช้งานได้จริงภายใต้เงื่อนไขการขับขี่ของเส้นทางเดิม ไม่ว่าจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขสิ่งแวดล้อมของการจราจรแบบเปิด หรือสิ่งแวดล้อมแบบปิด เมื่อผู้ขับขี่กำหนดเวลาให้ถึงที่หมายช้าลงหรือใช้เวลาในการขับขี่มากขึ้น ระบบก็จะคำนวณรูปแบบของความเร็วที่เหมาะสมให้เพื่อการประหยัดพลังงาน (Energy

consumption) และถึงเป้าหมายตามกำหนดเวลา โดยใช้รูปแบบของความเร็วเดิมเป็นขอบเขตของความเร็วสูงสุด หมายความว่ารูปแบบของความเร็วที่สร้างขึ้นใหม่จะไม่มีความเร็วเกินรูปแบบการใช้ความเร็วเดิม จากรูปที่ 4.12 รูปแบบความเร็วเส้นที่บคือ รูปแบบความเร็วเดิม ส่วนเส้นประคือรูปแบบความเร็วใหม่ โดยในการทดสอบนี้จะทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานและกำลังงาน เมื่อผู้ขับขี่กำหนดให้ถึงที่หมายช้ากว่าเดิม 30 วินาที และ 60 วินาที

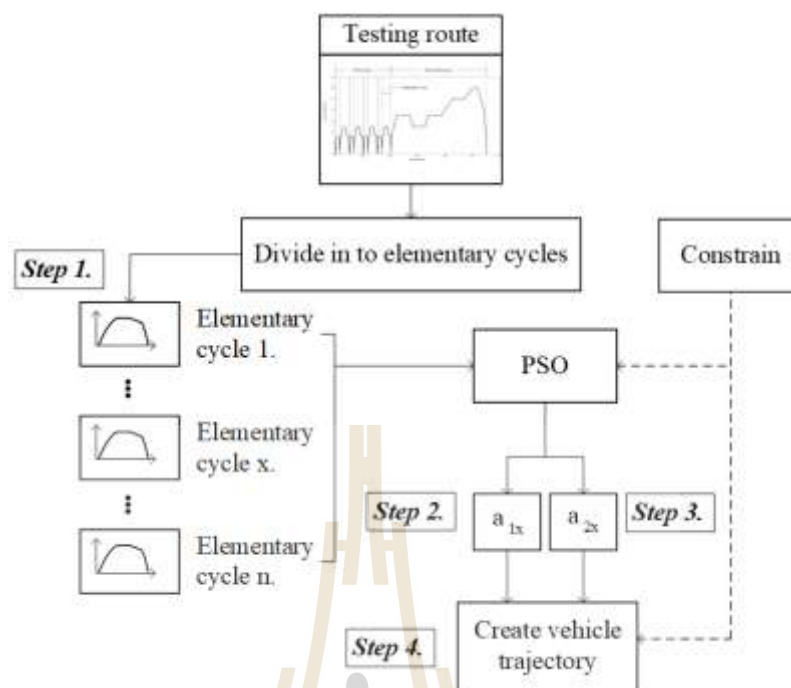
ขั้นตอนการสร้างรูปแบบความเร็วใหม่ (The New Velocity Profile Algorithm)

ขั้นที่ 1. ทำการแบ่งรูปแบบความเร็วของเส้นทางเดิม ออกเป็นวัฏจักรย่อย ดังรูปที่ 4.11 และแสดงขั้นตอนวิธีการในรูปที่ 4.13

ขั้นที่ 2. เมื่อพิจารณาเป็นรายวัฏจักรในส่วนที่ 1 จะดำเนินการหาค่าความเร่ง (\ddot{a}_{1x}) ที่เหมาะสมด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) โดยที่ \ddot{a}_{1x} คือค่าความเร่งของส่วนที่ 1 ของวัฏจักรย่อยที่ x ดังรูปที่ 4.13 โดยมีเงื่อนไขว่าความเร็วของยานยนต์ที่คำนวณได้จากโปรแกรมจำลองผลจะต้องมีค่าความเร็วไม่เกินรูปแบบความเร็วเดิม เช่นจากรูปที่ 4.12 ที่จุด x1 ที่มีค่าความเร็วต่ำกว่าจุดทำงาน x2 ที่อยู่บนเส้นรูปแบบความเร็วเดิมที่ใช้เป็นขอบเขตของความเร็วสูงสุด และใช้เวลาในการขับขี่ไม่เกินกว่าเวลาที่ผู้ขับขี่กำหนด (โดยในการทดสอบนี้จะทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานและกำลังงาน เมื่อผู้ขับขี่กำหนดให้ถึงที่หมายช้ากว่าเดิม 30 วินาที และ 60 วินาที)

ขั้นที่ 3. ในช่วงที่ 2 และ 3 จะพิจารณาร่วมกันโดยหาค่าความเร่ง (\ddot{a}_{2x}) โดยที่ \ddot{a}_{2x} คือค่าความเร่งของส่วนที่ 2 ของวัฏจักรย่อยที่ x ดังรูปที่ 4.12 เมื่อเริ่มพิจารณาที่จุด x3 ในรูปที่ 4.12 ด้วยวิธีการเดียวกันกับขั้นตอนในข้อที่ 2 แต่จะมีขอบเขตการค้นหาที่กว้างกว่า โดยค่าความเร่งที่ได้สามารถมีค่าเป็น บวก (ความเร็วเพิ่มขึ้น) มีค่าเป็นศูนย์ (ความเร็วคงที่) หรือมีค่าเป็นลบก็ได้ (ความเร็วลดลง) ซึ่งจะทำให้เกิดรูปแบบความเร็วที่เป็นไปได้ 3 รูปแบบคือ จากจุด x3 ถึงจุด x4 จากจุด x3 ถึงจุด x5 และ จากจุด x3 ถึงจุด x6 ดังรูปที่ 4.12

ขั้นที่ 4. เมื่อความเร็วของรูปแบบความเร็วใหม่มีค่าเท่ากับความเร็วของรูปแบบความเร็วเดิมที่ตำแหน่งเดียวกัน (ที่ระยะทางเท่ากัน) และเป็นตำแหน่งที่มีความเร่งของรูปแบบความเร็วอ้างอิงหรือรูปแบบความเร็วเดิมมีค่าต่ำกว่า \ddot{a}_1 และ \ddot{a}_2 ก็จะกำหนดให้รูปแบบของความเร็วใหม่มีค่าเท่ากับรูปแบบของความเร็วเดิม และเมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 4 (Segment 4.) ซึ่งจะต้องทำการเบรกก็จะใช้รูปแบบการเบรกแบบเดียวกันและหยุดที่ตำแหน่งเดียวกันเสมอ ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวเป็นไปตามสมการที่ 4.15 ต่อจากนั้นดำเนินการทำซ้ำข้อ 2 ถึง ข้อ 4 สำหรับวัฏจักรย่อยทั้งหมดตลอดเส้นทาง



รูปที่ 4.13 ขั้นตอนวิธีการสร้างรูปแบบความเร็วใหม่

4.3.4 เงื่อนไผ่และการจำลองระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริด

การดำเนินการหาค่าสัดส่วนของน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดของระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริด (Hybrid energy storage system, HESS) ภายใต้เงื่อนไขการจ่ายคืนพลังงานจากการเบรก การประจุพลังงานแบบไร้สาย และการจ่ายโหลดตลอดระยะทางการทดสอบ การเตรียมข้อมูลสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ของระบบสะสมพลังงาน ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว จำเป็นต้องกำหนดขอบเขตของน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานที่จะทำการค้นหาค่าที่เหมาะสม และค่าความผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้ โดยค่าขอบเขตของน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานจะใช้ค่าตัวประกอบน้ำหนัก (Mass factor) หรือ MF ไม่เกิน 2.26 และค่าความผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้ ไม่เกิน 10^{-6} ซึ่งค่า MF สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.16

$$MF = (M_{tare} + M_{load} + M_{ESS}) / M_{tare} \quad (4.16)$$

เมื่อ M_{tare} คือมวลของยานยนต์ไฟฟ้า M_{load} คือมวลที่บรรทุกของยานยนต์ไฟฟ้า และ M_{ESS} คือมวลของระบบสะสมพลังงาน

ในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการกลุ่มอนุภาคในการหาค่าน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดของระบบสะสมพลังงาน ภายใต้เงื่อนไขที่รวมผลจากการจ่ายคืนพลังงานจากการเบรก การประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย และการจ่ายโหลดตลอดระยะทางที่ใช้ทดสอบดังแสดงในสมการที่ 4.17

$$\min_w f(E_e) = (-E_0(W) - nE_{ch} - E_{regen} + E_D) \quad (4.17)$$

โดยที่ $W = W_c + W_b$

เมื่อ E_0 คือพลังงานที่อยู่ในระบบสะสมพลังงานในตอนเริ่มต้น E_D คือพลังงานที่ยานยนต์ไฟฟ้าต้องการในการขับเคลื่อน E_{regen} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากการจ่ายคืนพลังงานจากการเบรก n คือ จำนวนของสถานีประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย E_{ch} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากการประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย W_c และ W_b คือน้ำหนักของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และน้ำหนักของแบตเตอรี่ตามลำดับ โดยการหาค่าพลังงานและกำลังงานไฟฟ้าจำเพาะของระบบสะสมพลังงานไฟฟ้าแบบไฮบริด สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 3.43 และ 3.44 ตามลำดับ ซึ่งได้ระบุไว้ในบทที่ 3

สำหรับเงื่อนไขการประจุไฟฟ้าและแบบจำลองของระบบสะสมพลังงาน เมื่อกำหนดให้ $E(t)$ คือ พลังงานไฟฟ้าของระบบสะสมพลังงานที่เวลา t โดยพลังงานที่สามารถประจุและคายประจุได้จะมีการจำกัดขอบเขตบนและขอบเขตล่าง หรือค่าพลังงานที่สามารถใช้งานได้สูงสุดและต่ำสุด ดังสมการที่ 4.18

$$E^l \leq E(t) \leq E^u \quad (4.18)$$

เมื่อ E^l และ E^u คือขอบเขตล่างและขอบเขตบนของระบบสะสมพลังงานตามลำดับ ซึ่งค่าขอบเขตดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับค่าความจุพลังงานของระบบสะสมพลังงานดังสมการที่ 4.19

$$E_0 = E^u - E^l = (\beta - \alpha)E^{cap} \quad (4.19)$$

โดยที่ $0 < \alpha < \beta < 1$

เมื่อ E_0 คือค่าพลังงานความจุเริ่มต้นที่สามารถใช้งานได้จริงของระบบสะสมพลังงาน ค่า E^{cap} ค่าความจุของระบบสะสมพลังงาน ค่า α และ β จะกำหนดโดยโรงงานผู้ผลิตระบบสะสมพลังงาน สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ค่า α และ β มีค่าเป็น 0.2 และ 0.95 ตามลำดับ

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้ค่าความจุของระบบสะสมพลังงานที่ค่าคงที่เมื่อระดับการประจุและการคายประจุอยู่ในช่วง E^l ถึง E^u เพื่อความสะดวกในการหาค่าพลังงานที่เหมาะสมที่สุด โดยสมมุติฐานดังกล่าวได้นำมาใช้ในแบบจำลองของยานยนต์ไฟฟ้าโดยทั่วไป (Y. J. Jang, E. S. Suh and J. W. Kim, 2016) สำหรับการประมาณค่าสถานะของประจุที่ต้องทดสอบหาค่าความจุของระบบสะสมพลังงานโดยละเอียด สามารถพิจารณาได้จาก ภาคผนวก. ก

4.3.5 การส่งกำลังแบบไร้สาย (Wireless power transfer, WPT)

การประจุกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เพื่อประจุไฟฟ้าสู่ระบบสะสมพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าในขณะที่ขับขี่ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การประจุไฟฟ้าแบบไร้สายอยู่ภายใต้สมมุติฐานกำลังไฟฟ้าในการส่งผ่านคงที่ เมื่อยานยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่มาอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับขดลวดส่งกำลัง (Power transmitter) และจะไม่มีกำลังเมื่อยานยนต์เคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งของขดลวดส่งกำลัง เมื่อกำหนดให้กำลังงานในการส่งผ่านกำลังมีค่าคงที่ พลังงานที่ได้รับการส่งผ่านจึงขึ้นอยู่กับเวลาในการส่งกำลังหรือเวลาที่ยานยนต์ไฟฟ้าอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับขดลวดส่งกำลัง ดังนี้

$$E_{ch} = \eta_{ch} \int P_s(t) dt \begin{cases} 0, & \text{เมื่อ } x(t) > x^f \text{ หรือ } x(t) < x^0 \\ P_s, & \text{เมื่อ } x^0 \leq x(t) \leq x^f \end{cases} \quad (4.20)$$

เมื่อ x^0 คือตำแหน่งเริ่มต้นของขดลวดส่งกำลัง x^f คือตำแหน่งด้านปลายของขดลวดส่งกำลัง P_s คือ กำลังไฟฟ้าในการส่งผ่านกำลังแบบไร้สาย η_{ch} คือ ค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลัง และ E_{ch} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากการประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย

สำหรับการหาค่าตำแหน่งติดตั้งขดลวดส่งกำลังแบบไร้สาย เพื่อให้ได้การส่งกำลังที่ทำให้การใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุด

$$\min_{E_s} f(E_s) = \min_{E_s} (-E_0 + E_D - E_{ch}(x^f, x^0)) \quad (4.21)$$

โดยใช้กระบวนการกลุ่มอนุภาคในการหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ที่จะทำให้อานยนต์ไฟฟ้าใช้พลังงานน้อยที่สุดในการเดินทาง

4.4 สรุป

วิธีการและขั้นตอนการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบกรณีฐานหรือรูปแบบความเร็วอ้างอิงกับผลของการหาค่าการใช้พลังงานที่เหมาะสมของการปรับปรุงความเร็ว การติดตั้งระบบส่งกำลังแบบไร้สาย น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสม ผลกระทบของการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรก และนำผลดังกล่าวมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับระบบการใช้พลังงานที่มีการบูรณาการทุกกรณีเข้าด้วยกัน ซึ่งผลของการทดสอบดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ในบทที่ 5



บทที่ 5

ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้าและการจัดการพลังงาน

5.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการจำลอง ประกอบไปด้วยผลการเปรียบเทียบของผลกระทบของการใช้พลังงานระหว่างขั้นตอนวิธีหรืออัลกอริทึมของการปรับปรุงรูปแบบการใช้ความเร็วที่ผู้วิจัยนำเสนอ กับรูปแบบการควบคุมความเร็วอัตโนมัติแบบคงที่ (Cruise control) ที่ใช้ในยานยนต์ปัจจุบัน และทำการศึกษาผลการจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า 3 เส้นทาง เส้นทางละ 6 กรณีศึกษา โดยทำการเปรียบเทียบผลการจำลอง คือ การใช้พลังงาน (Eload) พลังงานสุทธิ (Enet) และกำลังงานสูงสุด (Ppeak) โดยมีค่าพารามิเตอร์ด้านเข้า (Input parameters) เบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 5.1 และ 5.2 โดยจะมีการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์และการแบ่งเส้นทางเป็นวัฏจักรย่อยที่แตกต่างกันในแต่ละกรณี โดยรูปที่ 5.1 ถึง 5.3 แสดงการแบ่งวัฏจักรย่อยของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 (UNECE R.101) เส้นทางอ้างอิงที่ 2 (NYCC) และเส้นทางอ้างอิงที่ 3 (SUT091116) ตามลำดับ เพื่อหาค่าการใช้พลังงานที่เหมาะสมที่สุด หรือผลกระทบที่มีต่อพลังงานสุทธิและการใช้พลังงาน ดังนั้นในบทนี้จะประกอบไปด้วยผลการจำลองใน 5 หัวข้อคือ หัวข้อที่ 5.2 ถึง 5.6 คือ เปรียบเทียบผลการจำลองการใช้พลังงานของการปรับปรุงรูปแบบการใช้ความเร็ว ผลการจำลองการใช้พลังงานบนเส้นทางอ้างอิงที่ 1 เส้นทางอ้างอิงที่ 2 เส้นทางอ้างอิงที่ 3 และสรุปผลการจำลองเบื้องต้น ตามลำดับ

การทดสอบและเปรียบเทียบผลของทั้ง 6 กรณีศึกษามีรายละเอียดดังนี้

กรณีที่ 1 (Case 1 หรือย่อว่า C1) ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ไม่มี การปรับปรุงรูปแบบการใช้ความเร็ว ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเรียกว่ากรณีฐาน (Base case) กับผลการจำลองเมื่อมีการปรับปรุงรูปแบบการใช้ความเร็ว เมื่อกำหนดให้เวลาถึงที่หมายช้า 30 และ 60 วินาที

กรณีที่ 2 (Case 2 หรือย่อว่า C2) เปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างกรณีฐานและกรณีที่มีการปรับปรุงรูปแบบการใช้ความเร็ว เมื่อกำหนดให้เวลาถึงที่หมายช้า 30 และ 60 วินาที โดยทำการเพิ่มผลกระทบของการใช้พลังงานเมื่อมีการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรกร่วมด้วย

กรณีที่ 3 (Case 3 หรือย่อว่า C3) เปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างกรณีฐานและกรณีที่มีการปรับปรุงรูปแบบการใช้ความเร็ว เมื่อกำหนดให้เวลาถึงที่หมายช้า 30 และ 60 วินาที โดยทำการเพิ่มผลกระทบของการใช้พลังงานเมื่อมีการประจุพลังงานแบบไร้สาย (Wireless power transfer, WPT) ร่วมด้วย

กรณีที่ 4 (Case 4 หรือย่อว่า C4) เปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างกรณีฐานและกรณีที่มีการปรับปรุงรูปแบบการใช้ความเร็ว เมื่อกำหนดให้เวลาถึงที่หมายช้า 30 และ 60 วินาที โดยทำการเพิ่มผลกระทบของการใช้พลังงานเมื่อมีการหาค่าน้ำหนักของแบตเตอรี่ลิเทียมที่เหมาะสมกับเส้นทาง

กรณีที่ 5 (Case 5 หรือย่อว่า C5) เปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างกรณีฐานและกรณีที่มีการปรับปรุงรูปแบบการใช้ความเร็ว เมื่อกำหนดให้เวลาถึงที่หมายช้า 30 และ 60 วินาที โดยทำการเพิ่มผลกระทบของการใช้พลังงานเมื่อมีการหาค่าน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริด (แบตเตอรี่ลิเทียมและตัวเก็บประจุไฟฟ้า 2 ชั้น) ที่เหมาะสมกับเส้นทาง

กรณีที่ 6 (Case 6 หรือย่อว่า C6) เปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างกรณีฐานและกรณีที่มีการปรับปรุงรูปแบบการใช้ความเร็ว เมื่อกำหนดให้เวลาถึงที่หมายช้า 30 และ 60 วินาที โดยทำการเพิ่มผลกระทบของการใช้พลังงานเมื่อมีการจัดการพลังงานแบบบูรณาการ หมายถึงมีการรวมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าคืนกลับจากการเบรก การประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย และการหาค่าน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานแบบไฮบริด

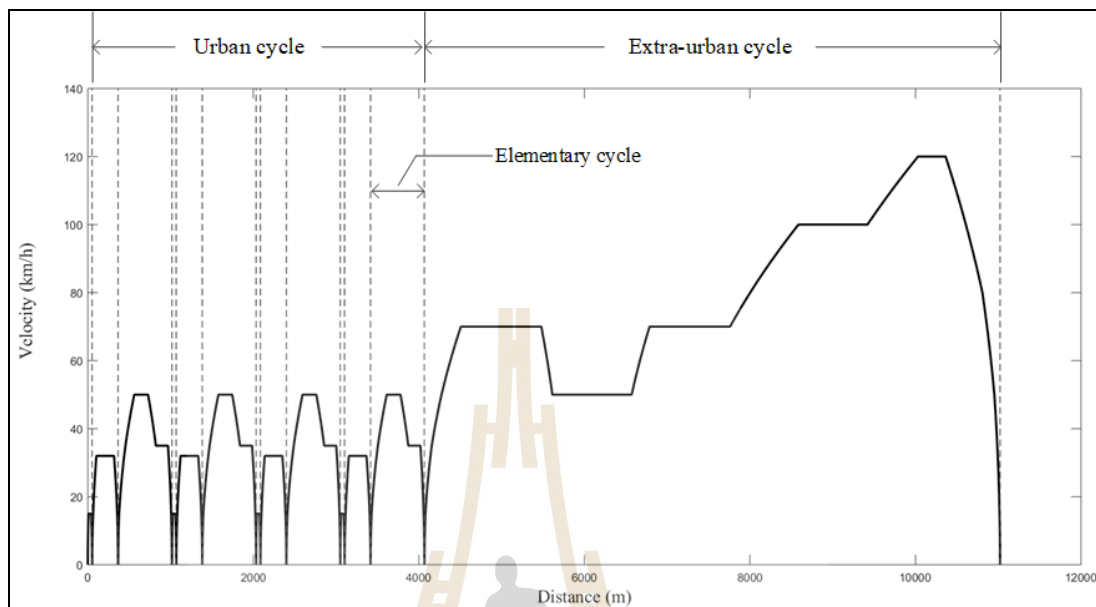
สามารถพิจารณาวิธีการทดสอบและเส้นทางที่ใช้ในการทดสอบโดยละเอียดได้จากหัวข้อ 4.3.2 จากนั้นทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงาน ค่าพลังงานสุทธิ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละเส้นทาง

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลของเส้นทางที่ใช้ทดสอบระบบการจัดการพลังงาน

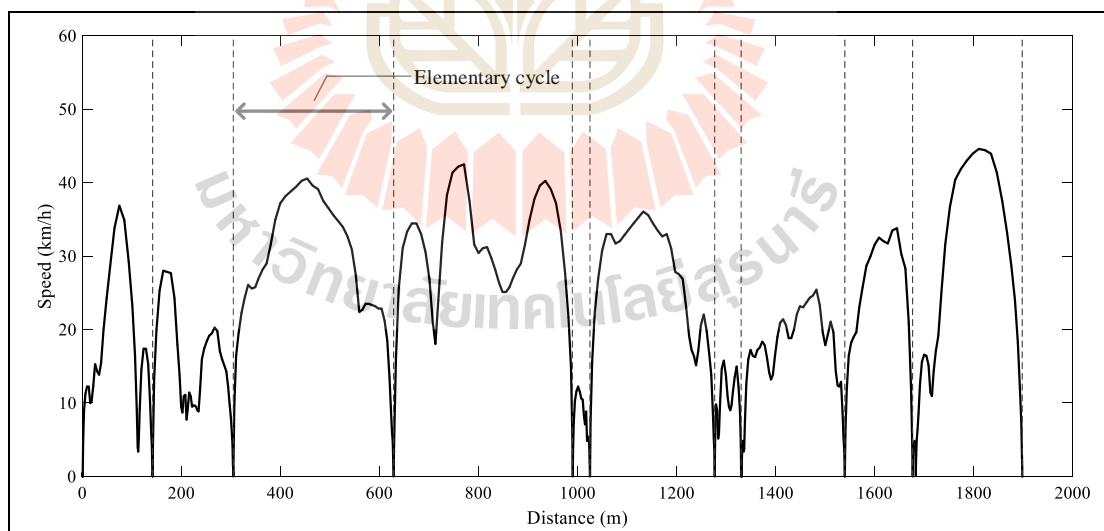
พารามิเตอร์/เส้นทาง	UNECE R.101	NYCC	SUT091116
ความเร็วสูงสุด (km/h)	120	44.58	54.32
ความเร็วเฉลี่ย (km/h)	33.6	11.43	18.10
ระยะทางต่อรอบการขับขี่ (km)	11.022	1.89	11.879
เวลาที่ใช้ในการขับขี่ (s)	1,180	598	2,362
ความเร่งสูงสุด (m/s^2)	1.042	2.68	2.552
ความหน่วงสูงสุด (m/s^2)	-1.389	-2.64	-2.212
จำนวนวัฏจักรย่อย	13	10	14

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลอง

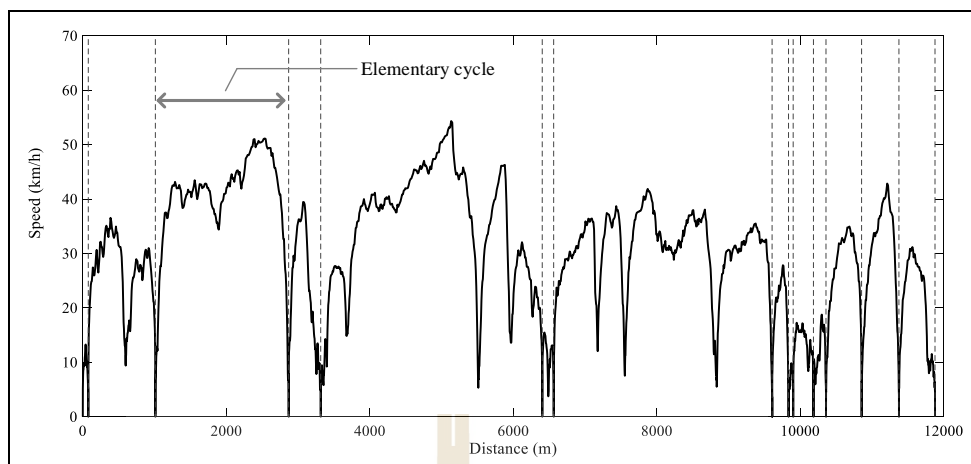
พารามิเตอร์ (หน่วย)	ความหมาย	ค่า
M (kg)	น้ำหนักรวมสูงสุดของยานยนต์ (GVWR) (สำหรับการทดสอบกรณีที่ 1-3)	1500
M_{ESS} (kg)	น้ำหนักของระบบสะสมพลังงาน (สำหรับการทดสอบกรณีที่ 1-3)	300
M_{TAR} (kg)	น้ำหนักรถเปล่า (ไม่รวมระบบสะสมพลังงาน)	1200
i_o	อัตราทดเฟืองท้าย	4.12
r_d (m)	รัศมีวงล้อ	0.27
δ_1	เฟลคเตอร์ความเฉื่อยของการหมุน 1	0.04
δ_2	เฟลคเตอร์ความเฉื่อยของการหมุน 2	0.0025
g (m/s ²)	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	9.81
η_{reg}	ประสิทธิภาพการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรก	0.714
η_g	ประสิทธิภาพการส่งกำลังผ่านเกียร์และเพลา	0.88
η_m	ประสิทธิภาพขอมอเตอร์	0.95
η_{in}	ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์	0.98
C_f	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องจากการหมุน	0.01
ρ_o (kg/m ³)	ความหนาแน่นของอากาศ	1.145
C_D	สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ	0.3
A (m ²)	พื้นที่ด้านหน้าของยานยนต์	2.2
P_{WPT_V} (kW)	กำลังสูงสุดของระบบประจุไฟฟ้า แบบไร้สายที่ติดตั้งภายในยานยนต์ไฟฟ้า	20
L_{WPT_V} (m)	ความยาวของลวดตัวนำสำหรับระบบ ประจุไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งบนผิวจราจร	20



รูปที่ 5.1 การแบ่งวัฏจักรย่อยของเส้นทาง UNECE R.101



รูปที่ 5.2 การแบ่งวัฏจักรย่อยของเส้นทาง NYCC

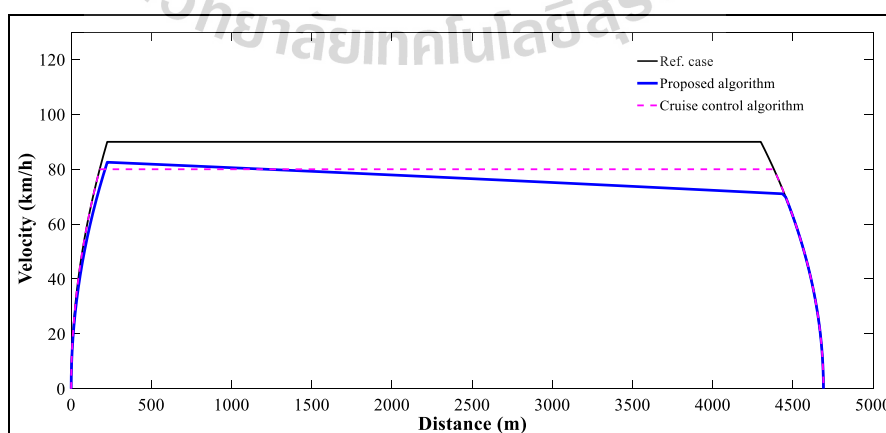


รูปที่ 5.3 การแบ่งวัฏจักรย่อยของเส้นทาง SUT091116

5.2 ผลการจำลองของการปรับปรุงรูปแบบการใช้ความเร็ว

ในหัวข้อนี้ดำเนินการเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีที่ผู้วิจัยนำเสนอ (Proposed algorithm) กับการขับที่แบบความเร็วคงที่ (Cruise control algorithm) ซึ่งเป็นรูปแบบการขับที่มีใช้ในยานยนต์ทั่วไป โดยใช้รูปแบบความเร็วอ้างอิง (เส้นกราฟสีดำที่บด ดังแสดงดังรูปที่ 5.4) ที่มีความเร็วสูงสุด 90 km/h ระยะทางการทดสอบ 4690.7 m ใช้เวลาในการขับขี่ 214 วินาที โดยการทดสอบกำหนดให้สร้างรูปแบบความเร็วที่ถึงที่หมายช้ากว่ากำหนดไม่เกิน 30 วินาที แล้วทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานและการใช้กำลังงานสูงสุดในการขับขี่ ซึ่งผลการทดสอบสามารถพิจารณาได้จากตารางที่

5.3



รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบรูปแบบความเร็วของขั้นตอนวิธีที่ผู้วิจัยนำเสนอกับรูปแบบความเร็วคงที่

ตารางที่ 5.3 ผลการจำลองเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีการหารูปแบบความเร็วที่เหมาะสม

ขั้นตอนวิธี	พลังงาน (kWh)	กำลังไฟฟ้าสูงสุด (kW)	ความเร็วเฉลี่ย (km/h)	ความเร็วสูงสุด (km/h)
รูปแบบความเร็วอ้างอิง	0.837	87.522	78.542	90.000
ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ	0.681	68.379	68.196	82.563
ขั้นตอนวิธีความเร็วคงที่	0.729	76.333	70.830	80.006

จากตารางที่ 5.3 พบว่าการใช้พลังงานของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอและขั้นตอนวิธีความเร็วคงที่ ลดลงเมื่อเทียบกับรูปแบบความเร็วอ้างอิง 18.345 % และ 12.589 % ตามลำดับ มีกำลังสูงสุดลดลง 21.872 % สำหรับขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ และลดลง 12.784 % สำหรับขั้นตอนวิธีความเร็วคงที่ เมื่อเทียบกับรูปแบบความเร็วอ้างอิง พบว่าขั้นตอนวิธีที่ผู้วิจัยนำเสนอใช้พลังงานในการขับเคลื่อนน้อยที่สุด และสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มากที่สุด สามารถสรุปได้ว่าขั้นตอนวิธีที่ผู้วิจัยนำเสนอจึงมีข้อได้เปรียบในการใช้พลังงานและกำลังงานมากกว่าขั้นตอนวิธีความเร็วคงที่ ซึ่งมีใช้ในยานยนต์ทั่วไป ดังนั้นขั้นตอนวิธีที่ผู้วิจัยนำเสนอจึงเหมาะสมกับการนำมาใช้ในการหารูปแบบความเร็วที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขการถึงที่หมายล่าช้ากว่ากำหนด

5.3 ผลการจำลองการใช้พลังงานบนเส้นทางอ้างอิงที่ 1

สำหรับเส้นทางอ้างอิงที่ 1 (UN ECE R. 101) มีการวนใช้วัฏจักรย่อยที่ 1 ถึง 3 ซ้ำ 4 รอบ ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งลักษณะของรูปแบบการใช้ความเร็วเป็นการใช้ความเร็วในเขตเมือง (Urban route) ส่วนวัฏจักรย่อยที่ 4 เป็นลักษณะการใช้ความเร็วในเส้นทางเขตนอกเมือง (Extra-urban route) ผลการหาค่าความเร่งตามขั้นตอนวิธีการหาความเร็วเมื่อถึงที่หมายล่าช้า 30 และ 60 วินาที แสดงดังตารางที่ 5.4 จากนั้นนำค่าความเร่งที่ได้จากตารางที่ 5.4 นำมาสร้างรูปแบบความเร็วของการขับขี่ตามขั้นตอนในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2 จากการจำลองการเคลื่อนที่จะได้ผลการจำลองการใช้พลังงานดังตารางที่ 5.5 ถึงตารางที่ 5.7 สำหรับเส้นทางอ้างอิงที่ 1 ทั้ง 6 กรณี และเงื่อนไขการถึงที่หมายล่าช้ากว่ากำหนดเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการจำลองจึงได้นำผลการจำลองมาเขียนเป็นกราฟเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 5.6 ถึงรูปที่ 5.8

ตารางที่ 5.4 ค่าความเร่งของวิถุจักรย่อยของเส้นทางอ้างอิงที่ 1

ข้อมูลเส้นทาง			เส้นทางอ้างอิง	ลำช้า 30 วินาที	ลำช้า 60 วินาที
เส้นทางใน เขตเมือง	วิถุจักรย่อยที่ 1	a_1 (m/s ²)	1.042	0.991	0.986
		a_2 (m/s ²)	0.000	-0.033	-0.080
	วิถุจักรย่อยที่ 2	a_1 (m/s ²)	0.787	0.770	0.752
		a_2 (m/s ²)	0.000	-0.035	-0.058
	วิถุจักรย่อยที่ 3	a_1 (m/s ²)	0.694	0.593	0.470
		a_2 (m/s ²)	0.000	-0.145	-0.140
เส้นทางใน เขตนอกเมือง	วิถุจักรย่อยที่ 4	a_1 (m/s ²)	0.694	0.480	0.408
		a_2 (m/s ²)	0.000	-0.080	-0.041

ตารางที่ 5.5 ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 1

กรณี	Eload (kWh)	Ech (kWh)	Enet (kWh)	Ppeak (kW)	Lithium- ion Batt. (kg)	Ultracapacitor (kg)	Total weight (kg)	WPT Position (m)
C1	1.827	0.000	1.827	46.596	300.000	0.000	300.000	-
C2	1.827	0.304	1.523	46.596	300.000	0.000	300.000	-
C3	1.827	0.622	1.205	46.596	300.000	0.000	300.000	4061.900
C4	1.602	0.000	1.602	42.003	42.000	0.000	42.000	-
C5	1.593	0.000	1.593	41.811	24.150	7.060	31.210	-
C6	1.592	0.420	1.167	41.791	22.200	7.900	30.100	4060.700

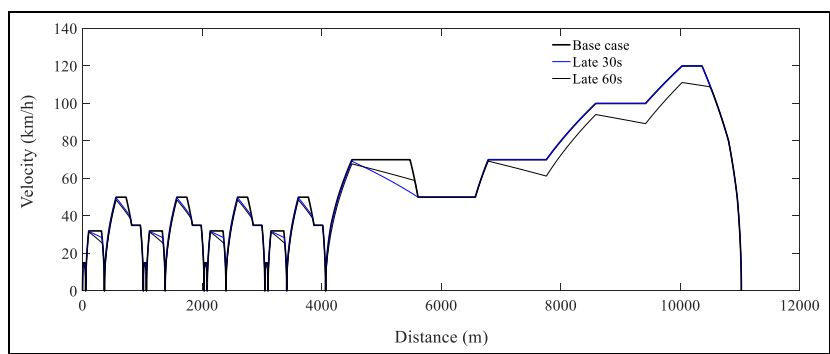
ตารางที่ 5.6 ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 เมื่อถึงที่หมายล่าช้า 30 วินาที

กรณี	Eload (kWh)	Ech (kWh)	Enet (kWh)	Ppeak (kW)	Lithium- ion Batt. (kg)	Ultracapacitor (kg)	Total weight (kg)	WPT Position (m)
C1	1.680	0.000	1.680	46.039	300.000	0.000	300.000	-
C2	1.680	0.230	1.450	46.039	300.000	0.000	300.000	-
C3	1.680	0.525	1.155	46.039	300.000	0.000	300.000	4060.700
C4	1.476	0.000	1.476	41.467	41.460	0.000	41.460	-
C5	1.464	0.000	1.464	41.192	14.360	11.540	25.900	-
C6	1.467	0.358	1.105	41.259	22.000	7.700	29.700	4060.700

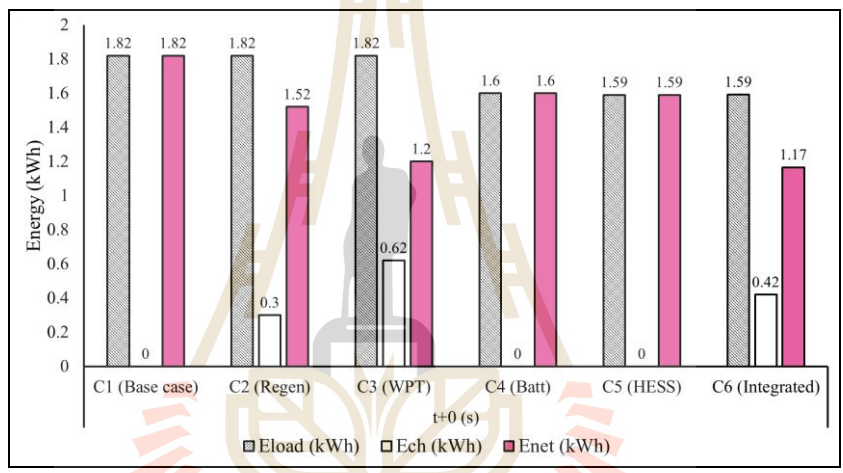
ตารางที่ 5.7 ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 เมื่อถึงที่หมายล่าช้า 60 วินาที

กรณี	Eload (kWh)	Ech (kWh)	Enet (kWh)	Ppeak (kW)	Lithium- ion Batt. (kg)	Ultracapacitor (kg)	Total weight (kg)	WPT Position (m)
C1	1.581	0.000	1.581	39.968	300.000	0.000	300.000	-
C2	1.581	0.205	1.377	39.968	300.000	0.000	300.000	-
C3	1.581	0.506	1.076	39.968	300.000	0.000	300.000	4052.600
C4	1.384	0.000	1.384	35.644	35.640	0.000	35.640	-
C5	1.375	0.000	1.375	35.431	14.080	8.540	22.620	-
C6	1.378	0.342	1.031	35.501	21.200	5.700	26.900	4060.700

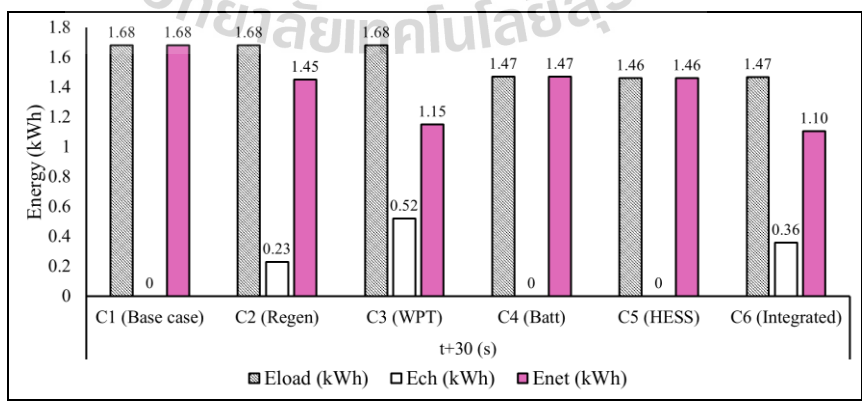
รูปที่ 5.5 แสดงรูปแบบความเร็วของเส้นทางอ้างอิง เปรียบเทียบกับรูปแบบความเร็วที่ถึงเป้าหมายช้ากว่ากำหนด 30 วินาที (เส้นสีน้ำเงิน) และล่าช้า 60 วินาที (เส้นสีดำเล็ก) ที่คำนวณตามขั้นตอนวิธีที่เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พบว่ารูปแบบความเร็วภายใต้เงื่อนไขการถึงเป้าหมายช้ากว่ากำหนด ใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำกว่ารูปแบบความเร็วอ้างอิงเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งเดียวกัน



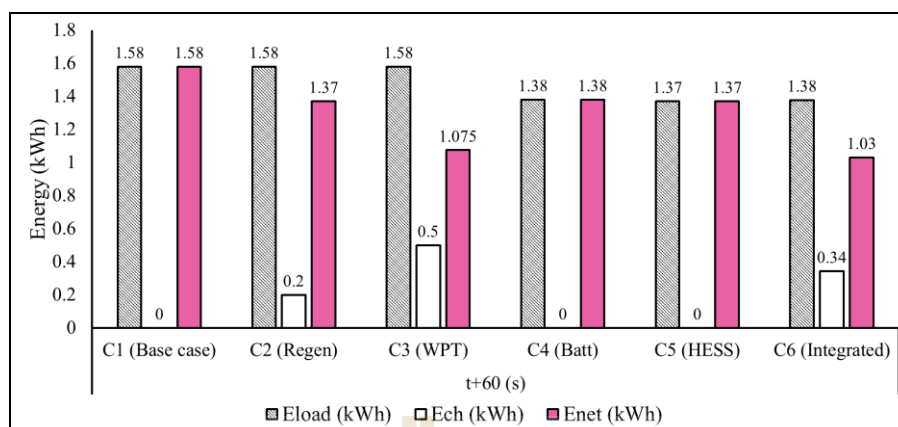
รูปที่ 5.5 รูปแบบการใช้ความเร็วของเส้นทางอ้างอิงที่ 1



รูปที่ 5.6 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 1

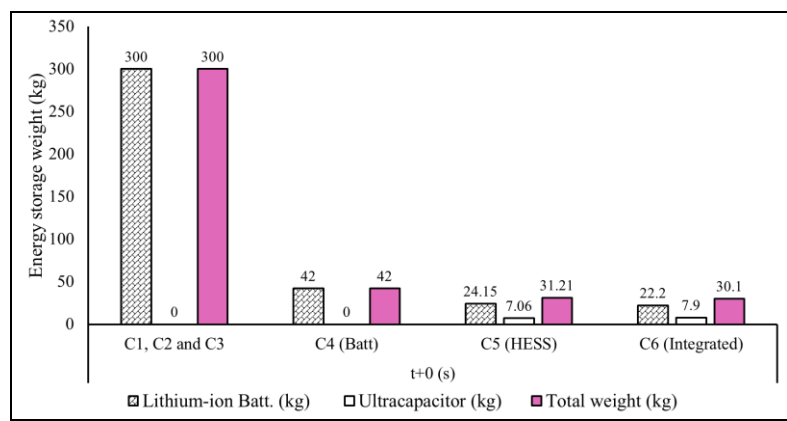


รูปที่ 5.7 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 เมื่อถึงที่หมายช้า 30 วินาที

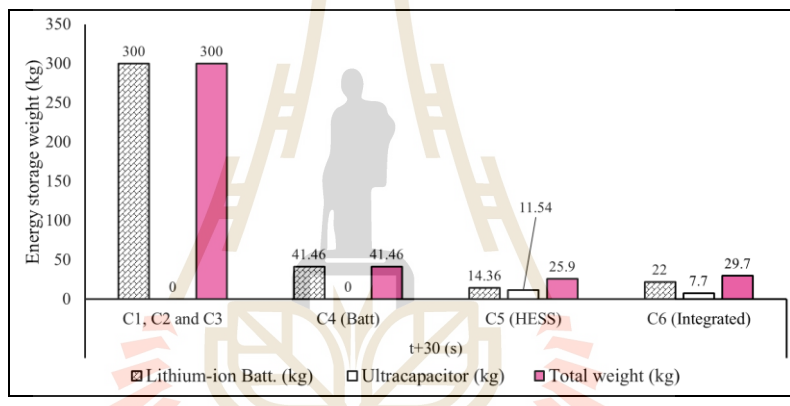


รูปที่ 5.8 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 เมื่อถึงที่หมายช้า 60 วินาที

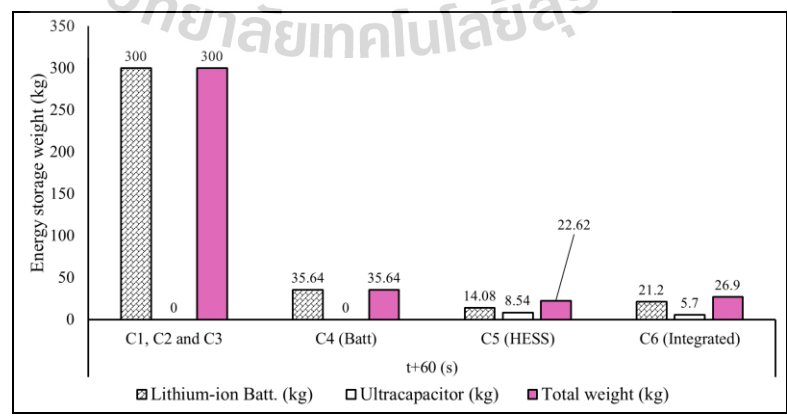
รูปที่ 5.6 รูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 เปรียบเทียบการใช้พลังงาน (Eload) พลังงานที่ประจู่สู่ระบบสะสมพลังงาน (Ech) และการใช้พลังงานสุทธิ (Enet) ทั้ง 6 กรณีศึกษา ในกรณีฐานและภายใต้เงื่อนไขการถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด 30 วินาที และ 60 วินาที ตามลำดับ โดยที่พลังงานที่ประจู่เข้าสู่ระบบสะสมพลังงานในกรณีศึกษาที่ 6 จะเป็นพลังงานจากการส่งกำลังแบบไร้สายและพลังงานคืนกลับจากการเบรกร่วมกัน เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละกรณีพบว่า กรณีศึกษาที่ 1 2 และ 3 มีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนเท่ากันและมีค่ามากกว่ากรณีอื่น สำหรับกรณีศึกษาที่มีการหาขนาดของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมคือ กรณีศึกษาที่ 4 5 และ 6 จะมีการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันและต่ำกว่า 3 กรณีแรกอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาการประจู่ไฟฟ้ากลับคืนสู่ระบบสะสมพลังงานพบว่า การประจู่ไฟฟ้าแบบไร้สาย สามารถประจู่ไฟฟ้ากลับสู่ระบบสะสมพลังงานได้มากกว่าการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรก ส่วนกรณีที่ใช้ระบบสะสมพลังงานแบบบูรณาการ การประจู่ไฟฟ้ากลับจะมีปริมาณพลังงานที่น้อยกว่า การประจู่ไฟฟ้าแบบไร้สาย แต่ก็ยังมีค่าการประจู่พลังงานกลับมากกว่า กรณีที่มีการจ่ายพลังคืนกลับจากการเบรกเพียงอย่างเดียว ส่วนกรณีที่มีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนน้อยที่สุดคือ กรณีศึกษาที่ 5 และกรณีที่มีการใช้พลังงานสุทธิที่ต่ำที่สุดคือกรณีศึกษาที่ 6 โดยมีแนวโน้มที่คล้ายกันทั้ง 3 เงื่อนไข



รูปที่ 5.9 น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 1

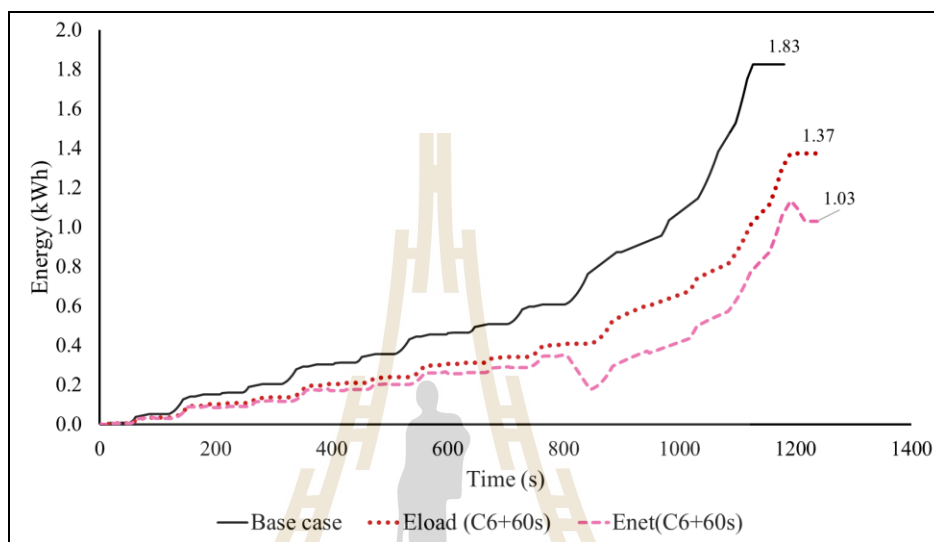


รูปที่ 5.10 น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 เมื่อถึงที่หมายช้า 30 วินาที

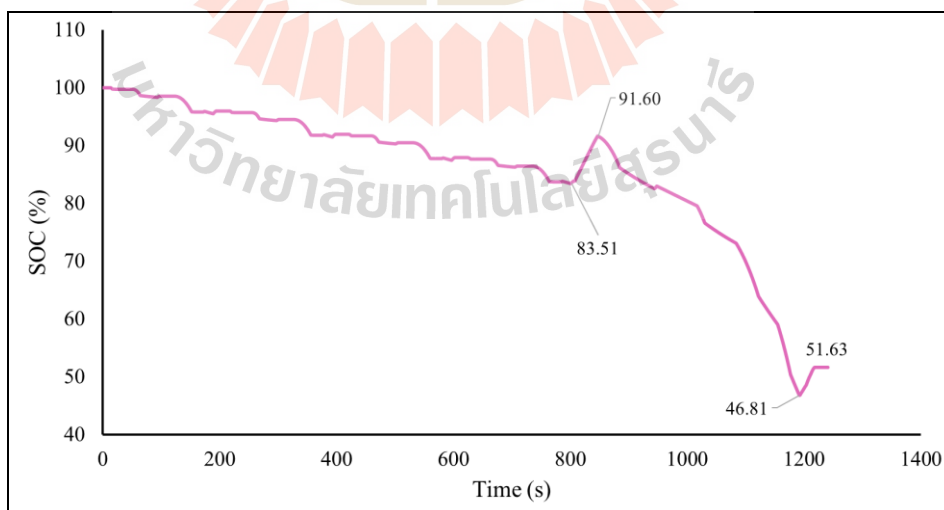


รูปที่ 5.11 น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 เมื่อถึงที่หมายช้า 60 วินาที

รูปที่ 5.9 รูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 เปรียบเทียบน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานในแต่ละกรณีศึกษา ในกรณีฐานและภายใต้เงื่อนไขการถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด 30 วินาที และ 60 วินาที ตามลำดับ พบว่ากรณีศึกษาที่ 5 และ 6 มีน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานที่ใกล้เคียงกัน แต่ในกรณีที่ 5 มีแนวโน้มที่ลดลงของน้ำหนักมากกว่า ภายใต้เงื่อนไขการถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด

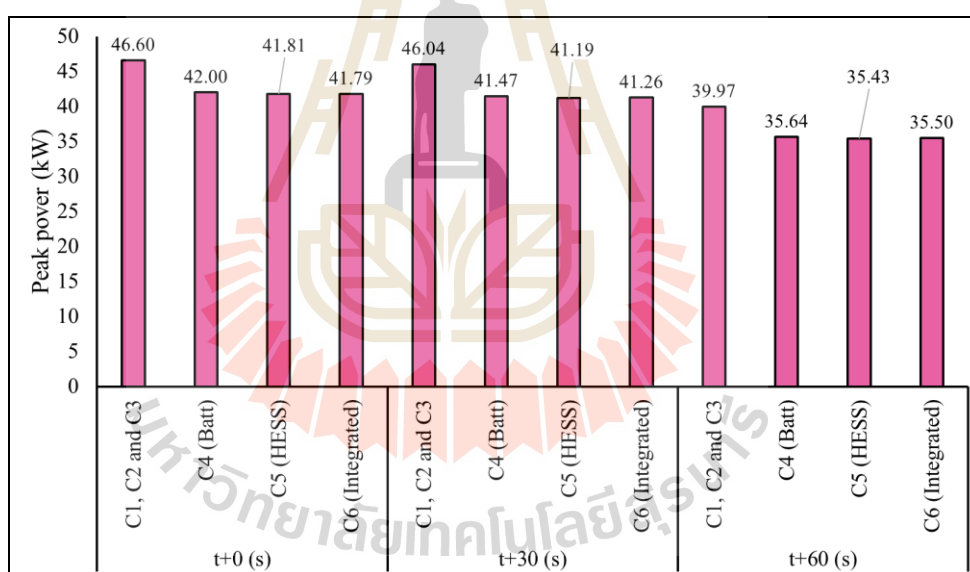


รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบการใช้พลังงาน และพลังงานสุดท้ายของเส้นทางอ้างอิงที่ 1



รูปที่ 5.13 การเปลี่ยนแปลงสถานะประจุของเส้นทางอ้างอิงที่ 1

รูปที่ 5.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของการใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 1 เมื่อเทียบกับเวลา โดยการใช้พลังงานที่เลือกมาเปรียบเทียบคือ ค่าการใช้พลังงานของกรณีฐาน (เส้นทึบสีดำ) การใช้พลังงานในการขับเคลื่อนของกรณีศึกษาที่ 6 เมื่อกำหนดให้ถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด 60 วินาที (เส้นประสีแดง) และการใช้พลังงานสุทธิ กรณีศึกษาที่ 6 เมื่อกำหนดให้ถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด 60 วินาที (เส้นประสีชมพู) สาเหตุที่เปรียบเทียบในกรณีดังกล่าวเพื่อทำการศึกษาในกรณีที่มีการใช้พลังงานสุทธิน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีฐาน พบว่ามีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนลดลงจาก 1.827 kWh เป็น 1.378 kWh หรือลดลง 25% เมื่อพิจารณาพลังงานที่ประจุเข้ามาในระบบสะสมพลังงานระหว่างการขับขี่ ทำให้การใช้พลังงานสุทธิมีค่า 1.031 kWh ถึงแม้ระบบสะสมพลังงานจะต้องจ่ายพลังงานเพื่อใช้ในการขับเคลื่อน มีค่า 1.378 kWh แต่การประจุพลังงานสู่ระบบสะสมพลังงานทำให้สถานะของระบบสะสมพลังงาน (State of charge, SOC) มีค่าเพิ่มขึ้น สามารถพิจารณาจากรูปที่ 5.13 ซึ่งส่งผลให้ช่วยยืดระยะเวลาในการขับขี่ให้มากขึ้น



รูปที่ 5.14 การใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเส้นทางอ้างอิงที่ 1

รูปที่ 5.14 แสดงการใช้กำลังสูงสุดในการขับเคลื่อน พบว่ารูปแบบการใช้ความเร็วที่กำหนดให้ถึงที่หมายช้ากว่ากำหนดมีค่าการใช้กำลังสูงสุดลดลง เมื่อเทียบกับกรณีฐาน และการถึงเป้าหมายล่าช้า 60 วินาที จะมีการใช้กำลังสูงสุดลดลงเมื่อเปรียบเทียบในกรณีศึกษาเดียวกัน โดยในกรณีที่มีการหาค่าน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมจะมีการใช้พลังงานสูงสุดที่ต่ำกว่ากรณีอื่น และมีค่าใกล้เคียงกัน

5.4 ผลการจำลองการใช้พลังงานบนเส้นทางอ้างอิงที่ 2

สำหรับเส้นทางอ้างอิงที่ 2 (NYCC) เส้นทาง NYCC มีการใช้ความเร็วต่ำ และมีการหยุดและเคลื่อนที่บ่อยครั้ง (Stop-and-Go Traffic) ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของการจับจีบในเขตเมือง (Urban route) ดังรูปที่ 5.15 ผลการหาค่าความเร่งตามขั้นตอนวิธีการหาค่ารูปแบบความเร็วเมื่อถึงที่หมายล่าช้า 30 และ 60 วินาที แสดงดังตารางที่ 5.8 จากนั้นนำค่าความเร่งที่ได้ นำมาสร้างรูปแบบความเร็วของการจับจีบ จากการจำลองการเคลื่อนที่ จะได้ผลการจำลองการใช้พลังงานดังตารางที่ 5.9 ถึงตารางที่ 5.11 สำหรับเส้นทางอ้างอิงที่ 1 ทั้ง 6 กรณี และเงื่อนไขการถึงที่หมายล่าช้ากว่ากำหนดเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการจำลองจึงได้นำผลการจำลองมาเขียนเป็นกราฟเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ได้ชัดเจน ดังแสดงดังรูปที่ 5.16 ถึงรูปที่ 5.18

ตารางที่ 5.8 ค่าความเร่งของวัฏจักรย่อยของเส้นทางอ้างอิงที่ 2

วัฏจักรย่อย	ความเร่ง (m/s ²)	กรณีฐาน	ล่าช้า 30 วินาที	ล่าช้า 60 วินาที
1	a ₁	1.25	0.63	0.45
	a ₂	0.00	-0.10	-0.11
2	a ₁	2.50	0.94	0.64
	a ₂	-0.04	-0.11	-0.11
3	a ₁	2.10	0.97	0.65
	a ₂	-0.13	-0.13	-0.12
4	a ₁	2.68	1.36	0.95
	a ₂	0.00	-0.15	-0.21
5	a ₁	1.12	0.57	0.38
	a ₂	-0.18	-0.10	-0.10
6	a ₁	2.24	1.28	0.97
	a ₂	0.00	-0.12	-0.11
7	a ₁	1.61	0.78	0.57
	a ₂	-0.27	-0.09	-0.10
8	a ₁	1.43	0.50	0.36
	a ₂	-0.22	-0.11	-0.10

ตารางที่ 5.8 ค่าความเร่งของวิถีจักรย้อยของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 (ต่อ)

วิถีจักรย้อย	ความเร่ง (m/s ²)	กรณีฐาน	ล่าช้า 30 วินาที	ล่าช้า 60 วินาที
9	a ₁	1.48	0.67	0.43
	a ₂	-0.13	-0.12	-0.11
10	a ₁	1.83	0.65	0.44
	a ₂	-0.13	-0.12	-0.12

ตารางที่ 5.9 ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 2

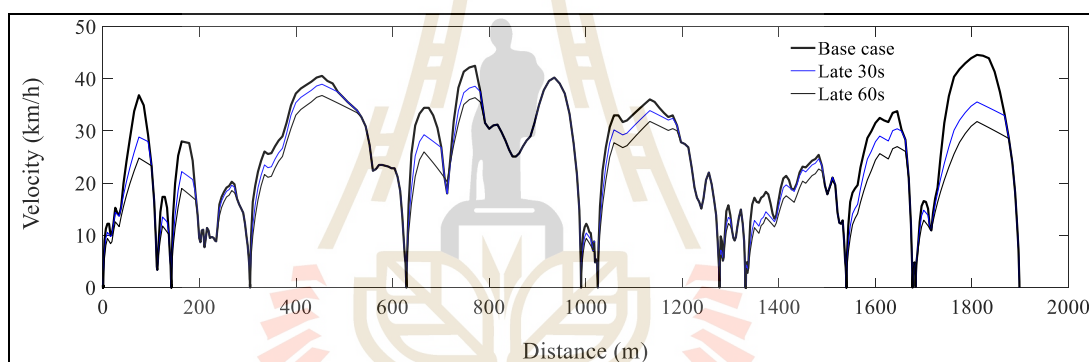
กรณี	Eload (kWh)	Ech (kWh)	Enet (kWh)	Ppeak (kW)	Lithium- ion Batt. (kg)	Ultracapacitor (kg)	Total weight (kg)	WPT Position (m)
C1	0.463	0.000	0.463	43.547	300.000	0.000	300.000	1325.100
C2	0.463	0.135	0.328	43.547	300.000	0.000	300.000	
C3	0.455	0.275	0.188	43.547	300.000	0.000	300.000	
C4	0.384	0.000	0.384	35.946	35.950	0.000	35.950	
C5	0.378	0.000	0.378	35.381	3.590	12.720	16.310	
C6	0.375	0.302	0.074	35.453	1.900	16.900	18.800	

ตารางที่ 5.10 ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 เมื่อถึงที่หมายล่าช้า 30 วินาที

กรณี	Eload (kWh)	Ech (kWh)	Enet (kWh)	Ppeak (kW)	Lithium- ion Batt. (kg)	Ultracapacitor (kg)	Total weight (kg)	WPT Position (m)
C1	0.354	0.000	0.354	27.961	300.000	0.000	300.000	1528.600
C2	0.354	0.090	0.264	27.961	300.000	0.000	300.000	
C3	0.349	0.265	0.089	27.961	300.000	0.000	300.000	
C4	0.290	0.000	0.290	22.884	22.880	0.000	22.880	
C5	0.287	0.000	0.287	22.666	2.710	8.290	11.000	
C6	0.289	0.253	0.036	23.227	22.200	19.400	41.600	

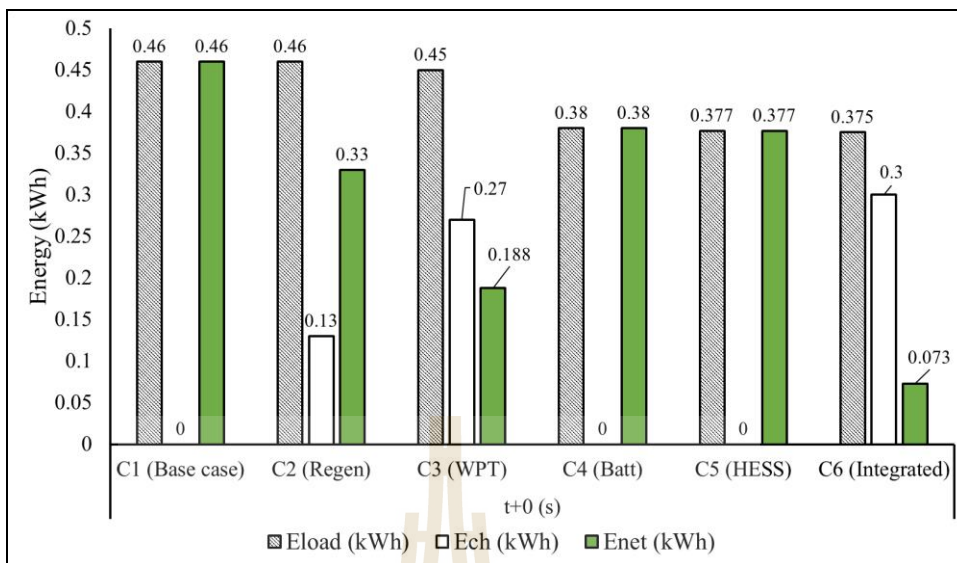
ตารางที่ 5.11 ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 เมื่อถึงที่หมายล่าช้า 60 วินาที

กรณี	Eload (kWh)	Ech (kWh)	Enet (kWh)	Ppeak (kW)	Lithium-ion Batt. (kg)	Ultracapacitor (kg)	Total weight (kg)	WPT Position (m)
C1	0.304	0.000	0.304	21.183	300.000	0.000	300.000	
C2	0.304	0.065	0.239	21.183	300.000	0.000	300.000	
C3	0.299	0.248	0.056	21.183	300.000	0.000	300.000	1535.500
C4	0.248	0.000	0.248	17.301	17.300	0.000	17.300	
C5	0.247	0.000	0.247	17.182	2.340	6.310	8.650	
C6	0.246	0.214	0.036	17.385	13.000	10.400	23.400	1532.700

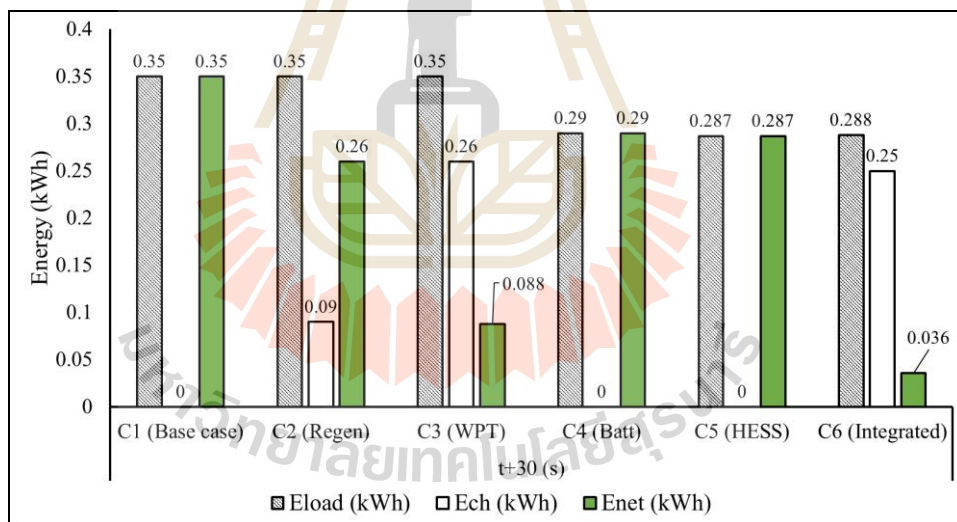


รูปที่ 5.15 รูปแบบการใช้ความเร็วของเส้นทางอ้างอิงที่ 2

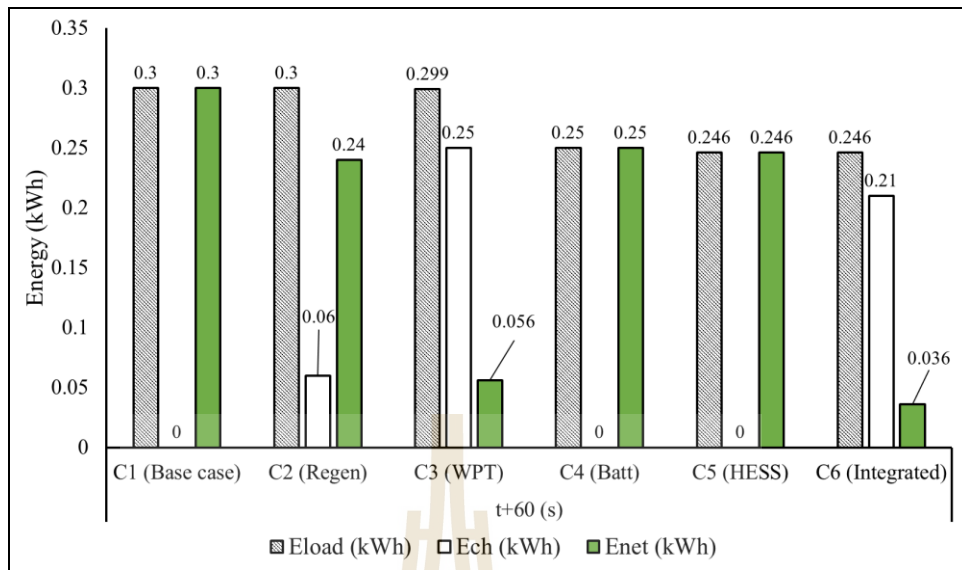
รูปที่ 5.15 แสดงรูปแบบความเร็วของเส้นทางอ้างอิง เปรียบเทียบกับรูปแบบความเร็วที่ถึงเป้าหมายช้ากว่ากำหนด 30 วินาที (เส้นสีน้ำเงิน) และล่าช้า 60 วินาที (เส้นสีดำเล็ก) ที่คำนวณตามขั้นตอนวิธีที่เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พบว่ารูปแบบความเร็วภายใต้เงื่อนไขการถึงเป้าหมายช้ากว่ากำหนด ใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำกว่ารูปแบบความเร็วอ้างอิงเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งเดียวกัน



รูปที่ 5.16 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 2

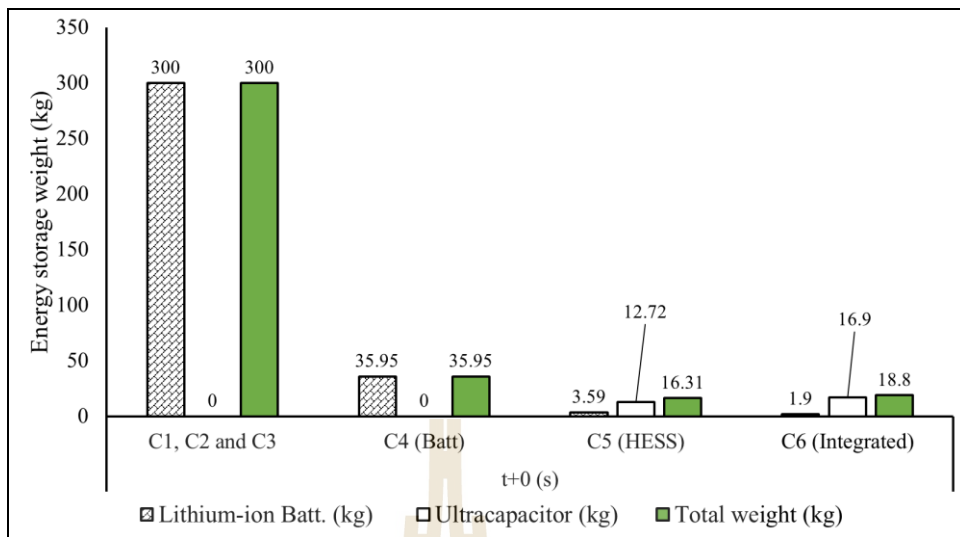


รูปที่ 5.17 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 เมื่อถึงที่หมายช้า 30 วินาที

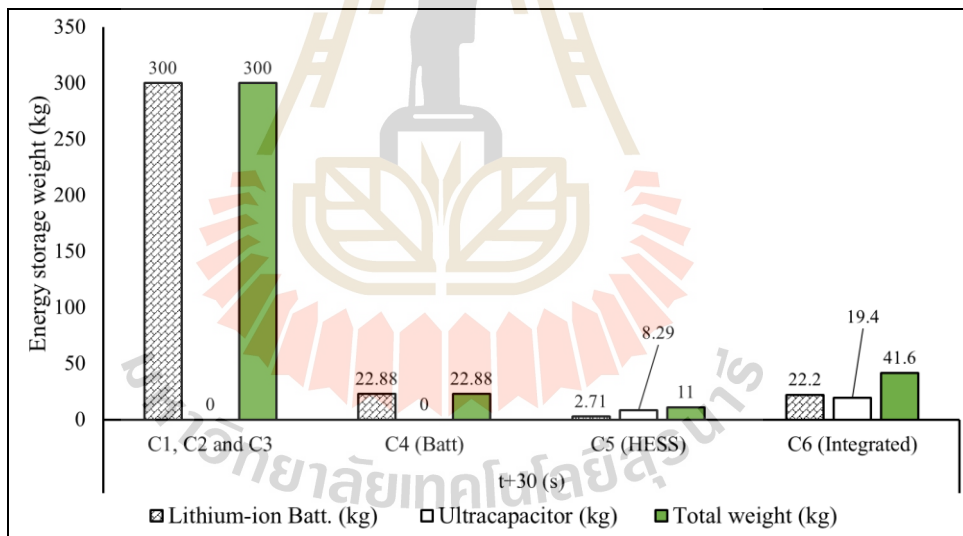


รูปที่ 5.18 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 เมื่อถึงที่หมายช้า 60 วินาที

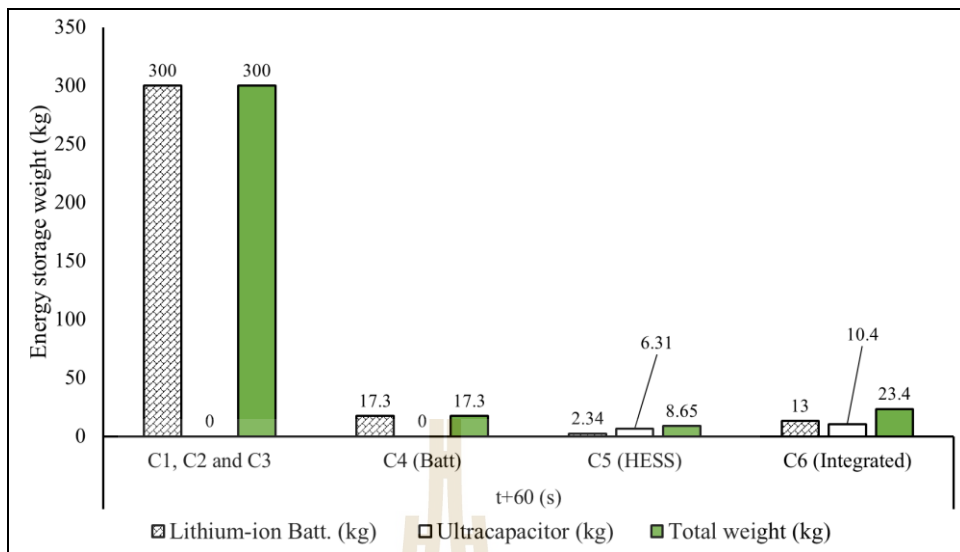
รูปที่ 5.16 รูปที่ 5.17 และรูปที่ 5.18 เปรียบเทียบการใช้พลังงาน (Eload) พลังงานที่ประจู่ระบบสะสมพลังงาน (Ech) และการใช้พลังงานสุทธิ (Enet) ทั้ง 6 กรณีศึกษา ในกรณีฐานและภายใต้เงื่อนไขการถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด 30 วินาที และ 60 วินาที ตามลำดับ โดยที่พลังงานที่ประจู่เข้าสู่ระบบสะสมพลังงานในกรณีศึกษาที่ 6 จะเป็นพลังงานจากการส่งกำลังแบบไร้สายและพลังงานคืนกลับจากการเบรกร่วมกัน เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละกรณีพบว่า กรณีศึกษาที่ 1 2 และ 3 มีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนเท่ากันและมีค่ามากกว่ากรณีอื่น สำหรับกรณีศึกษาที่มีการหาขนาดของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมคือ กรณีศึกษาที่ 4 5 และ 6 จะมีการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันและต่ำกว่า 3 กรณีแรกอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาการการประจู่ไฟฟ้ากลับคืนสู่ระบบสะสมพลังงานพบว่า การประจู่ไฟฟ้าแบบไร้สาย สามารถประจู่ไฟฟ้ากลับสู่ระบบสะสมพลังงานได้มากกว่าการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรคอย่างชัดเจน ส่วนกรณีที่ใช้ระบบสะสมพลังงานแบบบูรณาการ การประจู่ไฟฟ้ากลับจะมีปริมาณพลังงานที่ใกล้เคียงกับการประจู่ไฟฟ้าแบบไร้สาย ส่วนกรณีที่มีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนน้อยที่สุดคือ กรณีศึกษาที่ 5 และกรณีศึกษาที่ 6 มีค่าน้อยที่สุดเท่ากัน และกรณีที่มีการใช้พลังงานสุทธิที่ต่ำที่สุดคือกรณีศึกษาที่ 6 โดยมีแนวโน้มที่คล้ายกันทั้ง 3 เงื่อนไข



รูปที่ 5.19 น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 2

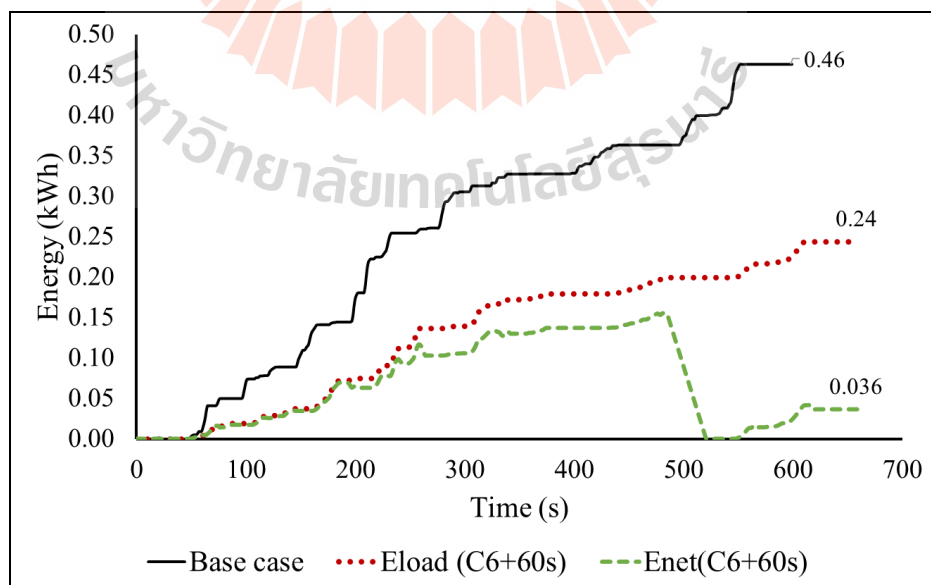


รูปที่ 5.20 น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 เมื่อถึงที่หมายช้า 30 วินาที

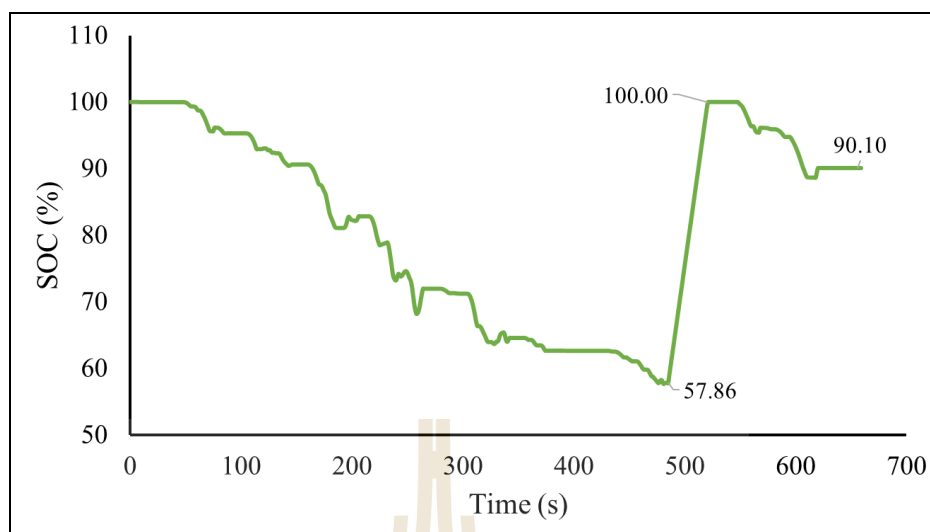


รูปที่ 5.21 น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 เมื่อถึงที่หมายช้า 60 วินาที

รูปที่ 5.19 รูปที่ 5.20 และรูปที่ 5.21 เปรียบเทียบน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานในแต่ละกรณีศึกษา ในกรณีฐานและภายใต้เงื่อนไขการถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด 30 วินาที และ 60 วินาที ตามลำดับ พบว่ากรณีศึกษาที่ 5 มีน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานที่ต่ำที่สุดและมีแนวโน้มที่ลดลงของน้ำหนักมากกว่า ภายใต้เงื่อนไขการถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด



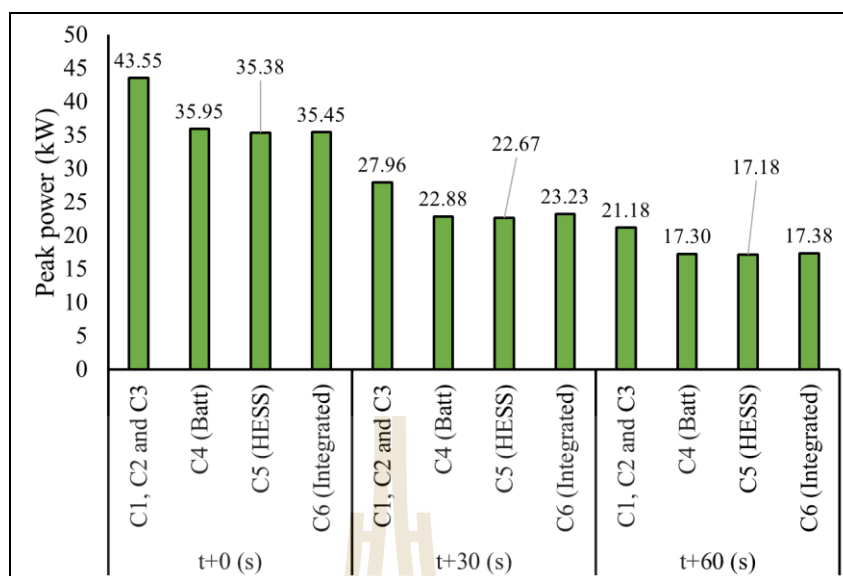
รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบการใช้พลังงาน และพลังงานสุทธิของเส้นทางอ้างอิงที่ 2



รูปที่ 5.23 การเปลี่ยนแปลงสถานะประจุของเส้นทางอ้างอิงที่ 2

รูปที่ 5.22 แสดงการเปลี่ยนแปลงของการใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 เมื่อเทียบกับเวลา โดยการใช้พลังงานที่เลือกมาเปรียบเทียบคือ ค่าการใช้พลังงานของกรณีฐาน (เส้นทึบสีดำ) การใช้พลังงานในการขับเคลื่อนของกรณีศึกษาที่ 6 เมื่อกำหนดให้ถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด 60 วินาที (เส้นประสีแดง) และการใช้พลังงานสุทธิ กรณีศึกษาที่ 6 เมื่อกำหนดให้ถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด 60 วินาที (เส้นประสีเขียว) สาเหตุที่เปรียบเทียบในกรณีดังกล่าวเพื่อศึกษาในกรณีที่มีการใช้พลังงานสุทธิน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีฐาน พบว่ามีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนลดลงจาก 0.463 kWh เป็น 0.246 kWh หรือลดลง 46.868 % เมื่อพิจารณาพลังงานที่ประจุเข้ามาในระบบสะสมพลังงานระหว่างการขับขี่ ทำให้การใช้พลังงานสุทธิมีค่า 0.036 kWh ถึงแม้ระบบสะสมพลังงานจะต้องจ่ายพลังงานเพื่อใช้ในการขับเคลื่อน มีค่า 0.246 kWh แต่การประจุพลังงานสู่ระบบสะสมพลังงานทำให้สถานะของระบบสะสมพลังงาน มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 100 % สามารถพิจารณาจากรูปที่ 5.23 ซึ่งส่งผลให้ช่วยยืดระยะเวลาในการขับขี่ให้มากขึ้นต่อจำนวนครั้งที่การประจุไฟฟ้าที่สถานี

รูปที่ 5.24 แสดงการใช้กำลังสูงสุดในการขับเคลื่อน พบว่ารูปแบบการใช้ความเร็วที่กำหนดให้ถึงที่หมายช้ากว่ากำหนดมีค่าการใช้กำลังสูงสุดลดลง เมื่อเทียบกับกรณีฐาน และการถึงเป้าหมายล่าช้า 60 วินาที จะมีการใช้กำลังสูงสุดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาเดียวกัน โดยในกรณีที่มีการหาค่าน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมจะมีการใช้พลังงานสูงสุดที่ต่ำกว่ากรณีอื่น และมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5.24 การใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเส้นทางอ้างอิงที่ 2

5.5 ผลการจำลองการใช้พลังงานบนเส้นทางอ้างอิงที่ 3

ผลการจำลองการใช้พลังงานบนเส้นทางเส้นทางอ้างอิงที่ 3 SUT091116 รอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีดังรูปที่ 5.25 และรูปที่ 5.26 ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของการขับขี่ในเขตเมืองที่มีการใช้ความเร็วไม่สูง มีจุดหยุดรถเพื่อรอรับผู้โดยสารที่ใช้เวลานาน ซึ่งมีจุดจอดรอผู้โดยสารที่ใช้เวลานานที่สุด 263 วินาที โดยทำการสร้างรูปแบบความเร็วจากการทดสอบการเดินรถของรถยนต์โดยสารไร้มลพิษของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือ PEA ZeBus ที่ทำการวิจัยและพัฒนาโดยทีมวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทำการทดสอบเดินรถไฟฟ้าโดยสารในเส้นทางถนนรอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แล้วเก็บข้อมูลการใช้พลังงานผ่านระบบ CAN (Control Area Network) และจากระบบบอกตำแหน่งด้วยดาวเทียม (GPS) เพื่อนำมาสร้างรูปแบบของการใช้ความเร็ว (Speed Profile) วัตถุประสงค์การขับขี่ใช้เส้นทางรอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี SUT091116 (ชื่อข้อมูลหมายถึงวันที่ทำการทดสอบ เช่น ทำการทดสอบวันที่ 09 เดือน พฤศจิกายน ปี ค.ศ. 2016)

ผลการหาค่าความเร่งตามขั้นตอนวิธีการหาค่ารูปแบบความเร็วเมื่อถึงที่หมายล่าช้า 30 และ 60 วินาที แสดงดังตารางที่ 5.12 จากนั้นนำค่าความเร่งที่ได้ นำมาสร้างรูปแบบความเร็วของการขับขี่จากการจำลองการเคลื่อนที่จะได้ผลการจำลองการใช้พลังงานดังตารางที่ 5.13 ถึงตารางที่ 5.15 สำหรับเส้นทางอ้างอิงที่ 1 ทั้ง 6 กรณี และเงื่อนไขการถึงที่หมายล่าช้ากว่ากำหนดเพื่อความสะดวก

ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการจำลองจึงได้นำผลการจำลองมาเขียนเป็นกราฟเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ได้ชัดเจน ดังแสดงดังรูปที่ 5.27 ถึงรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.25 เส้นทาง SUT091116 รอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 5.12 ค่าความเร่งของวัฏจักรย่อยของเส้นทางอ้างอิงที่ 3

วัฏจักรย่อย	ความเร่ง (m/s^2)	กรณีฐาน	ล่าช้า 30 วินาที	ล่าช้า 60 วินาที
1	a_1	1.43	1.24	1.03
	a_2	-0.04	-0.10	-0.10
2	a_1	1.73	1.01	0.73
	a_2	-0.39	-0.11	-0.15
3	a_1	1.46	1.07	0.59
	a_2	-0.09	-0.18	-0.16
4	a_1	2.44	2.29	1.62
	a_2	-0.11	-0.29	-0.32
5	a_1	1.68	0.66	0.44
	a_2	-0.10	-0.09	-0.08

ตารางที่ 5.12 ค่าความเร่งของวัตถุจักรย่อยของเส้นทางอ้างอิงที่ 3 (ต่อ)

วัตถุจักรย่อย	ความเร่ง (m/s ²)	กรณีฐาน	ล่าช้า 30 วินาที	ล่าช้า 60 วินาที
6	a ₁	2.55	1.64	1.04
	a ₂	-0.14	-0.11	-0.10
7	a ₁	2.45	1.58	1.47
	a ₂	-0.02	-0.13	-0.18
8	a ₁	2.10	1.74	1.73
	a ₂	-0.09	-0.03	-0.19
9	a ₁	1.24	0.74	0.53
	a ₂	-0.16	0.96	0.96
10	a ₁	1.65	0.71	1.65
	a ₂	-0.04	0.57	-0.11
11	a ₁	1.35	0.71	0.70
	a ₂	-0.13	-0.13	-0.12
12	a ₁	1.29	1.05	1.06
	a ₂	-0.04	-0.04	-0.07
13	a ₁	1.80	0.59	0.59
	a ₂	-0.03	1.75	1.02
14	a ₁	1.41	0.55	0.40
	a ₂	-0.12	0.00	-0.12

ตารางที่ 5.13 ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 3

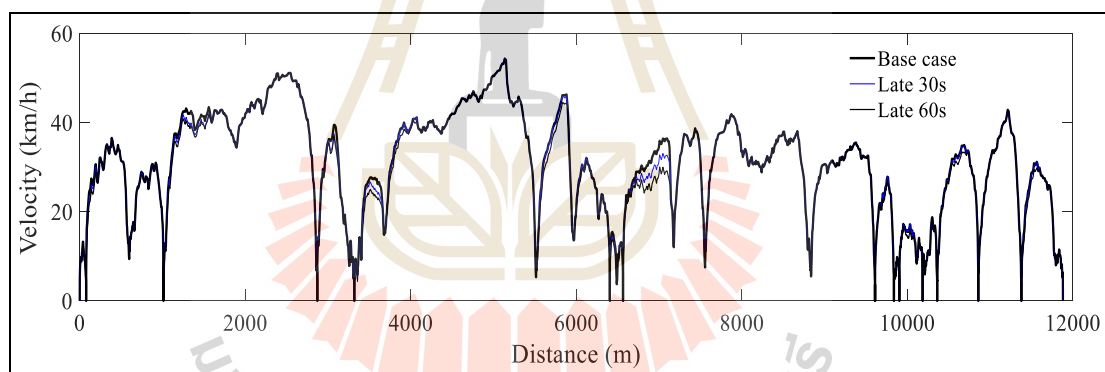
Case	Eload (kWh)	Ech (kWh)	Enet (kWh)	Ppeak (kW)	Lithium-ion Batt. (kg)	Ultracapacitor (kg)	Total weight (kg)	WPT Position (m)
C1	1.950	0.000	1.950	66.03	300.000	0.000	300.00	
C2	1.950	0.566	1.384	66.03	300.000	0.000	300.00	
C3	1.942	0.622	1.321	66.03	300.000	0.000	300.00	3302.40
C4	1.650	0.000	1.650	55.46	55.460	0.000	55.460	
C5	1.620	0.000	1.620	54.43	16.190	15.290	31.480	
C6	1.613	0.857	0.748	54.19	7.100	18.900	26.000	3299.70

ตารางที่ 5.14 ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 3 เมื่อถึงที่หมายล่าช้า 30 วินาที

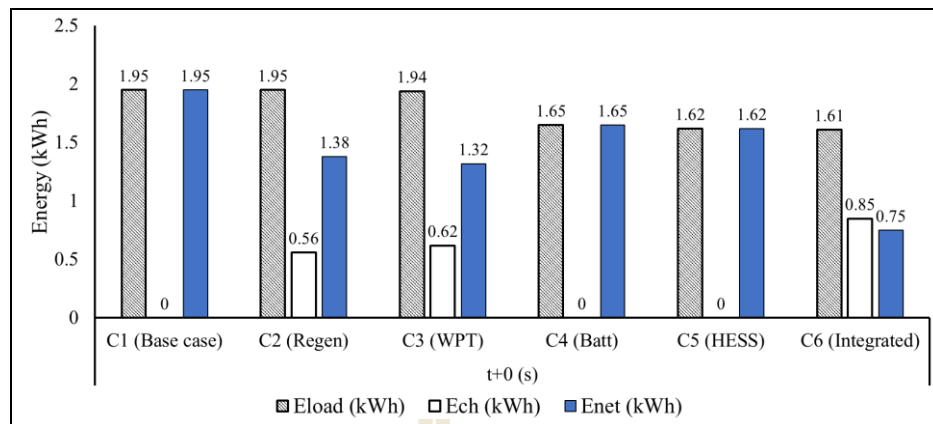
Case	Eload (kWh)	Ech (kWh)	Enet (kWh)	Ppeak (kW)	Lithium-ion Batt. (kg)	Ultracapacito r (kg)	Total weight (kg)	WPT Position (m)
C1	1.880	0.000	1.880	55.79	300.000	0.000	300.00	
C2	1.880	0.505	1.376	55.79	300.000	0.000	300.00	
C3	1.873	0.579	1.294	55.79	300.000	0.000	300.00	3313.00
C4	1.580	0.000	1.580	46.35	46.360	0.000	46.360	
C5	1.558	0.000	1.558	45.65	15.330	12.130	27.460	
C6	1.553	0.807	0.745	45.65	15.300	12.100	27.400	6393.00

ตารางที่ 5.15 ผลการจำลองของเส้นทางอ้างอิงที่ 3 เมื่อถึงที่หมายล่าช้า 60 วินาที

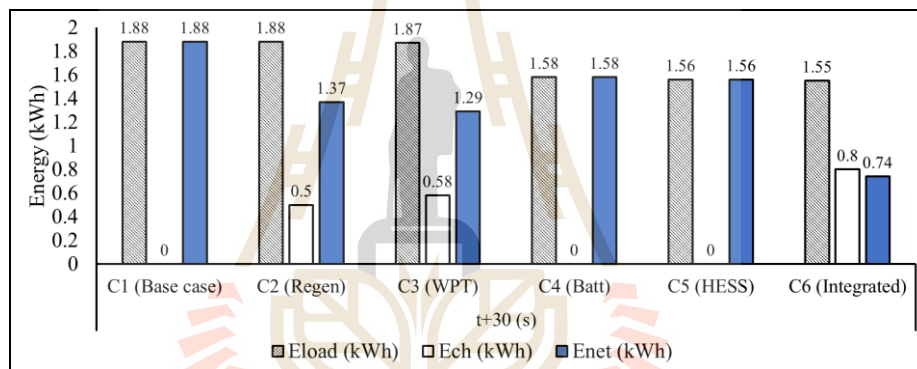
Case	Eload (kWh)	Ech (kWh)	Enet (kWh)	Ppeak (kW)	Lithium-ion Batt. (kg)	Ultracapitator (kg)	Total weight (kg)	WPT Position (m)
C1	1.847	0.000	1.847	60.99	300.000	0.000	300.00	
C2	1.847	0.492	1.355	60.99	300.000	0.000	300.00	
C3	1.840	0.569	1.271	60.99	300.000	0.000	300.00	3306.50
C4	1.557	0.000	1.557	51.07	51.070	0.000	51.070	
C5	1.532	0.000	1.532	50.20	15.060	14.060	29.120	
C6	1.531	0.801	0.730	50.23	16.700	13.400	30.100	6393.00



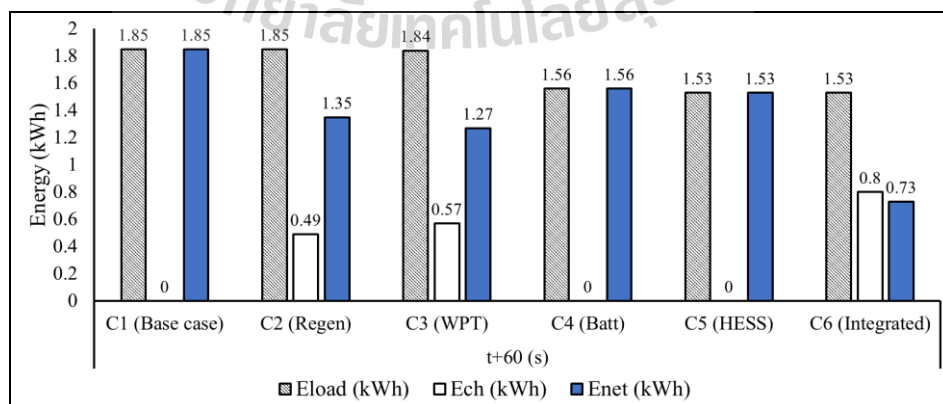
รูปที่ 5.26 รูปแบบการใช้ความเร็วของเส้นทางอ้างอิงที่ 3



รูปที่ 5.27 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 3

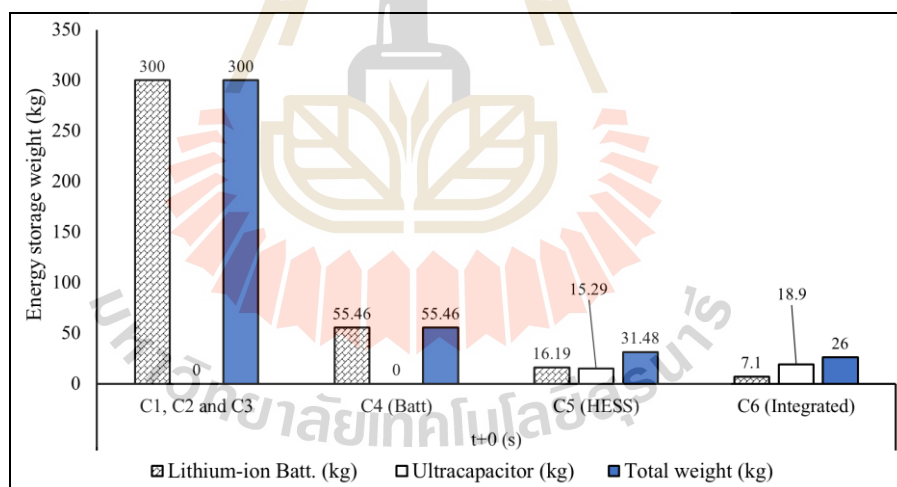


รูปที่ 5.28 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 3 เมื่อถึงที่หมายช้า 30 วินาที

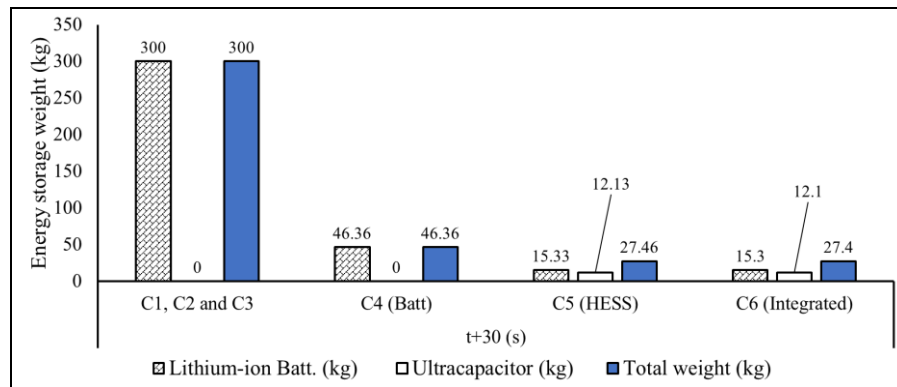


รูปที่ 5.29 การใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 3 เมื่อถึงที่หมายช้า 60 วินาที

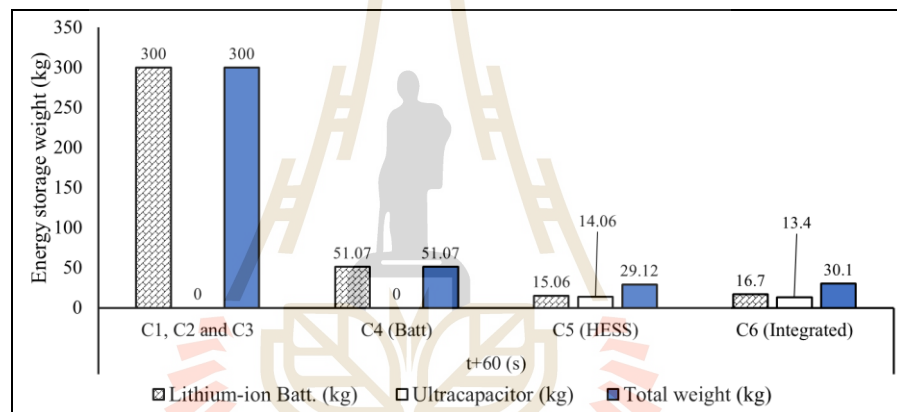
รูปที่ 5.27 รูปที่ 5.28 และรูปที่ 5.29 เปรียบเทียบการใช้พลังงาน (Eload) พลังงานที่ประจูดูระบบสะสมพลังงาน (Ech) และการใช้พลังงานสุทธิ (Enet) ทั้ง 6 กรณีศึกษา ในกรณีฐานและภายใต้เงื่อนไขการถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด 30 วินาที และ 60 วินาที ตามลำดับ โดยที่พลังงานที่ประจูดูระบบสะสมพลังงานในกรณีศึกษาที่ 6 จะเป็นพลังงานจากการส่งกำลังแบบไร้สายและพลังงานคืนกลับจากการเบรกร่วมกัน เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละกรณีพบว่า กรณีศึกษาที่ 1 2 และ 3 มีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนเท่ากันและมีค่ามากกว่ากรณีอื่น สำหรับกรณีศึกษาที่มีการหาขนาดของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมคือ กรณีศึกษาที่ 4 5 และ 6 จะมีการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันและต่ำกว่า 3 กรณีแรกอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาการการประจุไฟฟ้ากลับคืนสู่ระบบสะสมพลังงาน พบว่าการประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย และการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรค สามารถประจุพลังงานไฟฟ้ากลับสู่ระบบสะสมพลังงานได้ใกล้เคียงกันในทุกรูปแบบความเร็ว ส่วนกรณีที่ใช้ระบบสะสมพลังงานแบบบูรณาการ จะมีการประจุไฟฟ้ากลับที่มีปริมาณพลังงานมากกว่ากรณีอื่น ส่วนกรณีที่มีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนน้อยที่สุดคือ กรณีศึกษาที่ 5 และกรณีที่มีการใช้พลังงานสุทธิที่ต่ำที่สุดคือกรณีศึกษาที่ 6 โดยมีแนวโน้มที่คล้ายกันทั้ง 3 เงื่อนไข



รูปที่ 5.30 หน้าหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 3

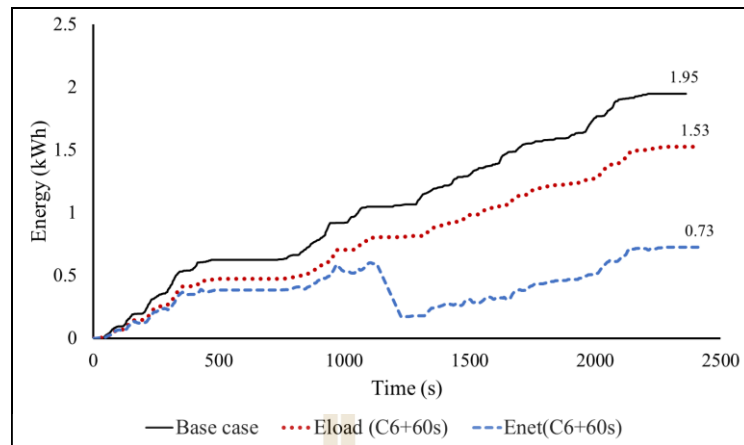


รูปที่ 5.31 น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 3 เมื่อถึงที่หมายช้า 30 วินาที

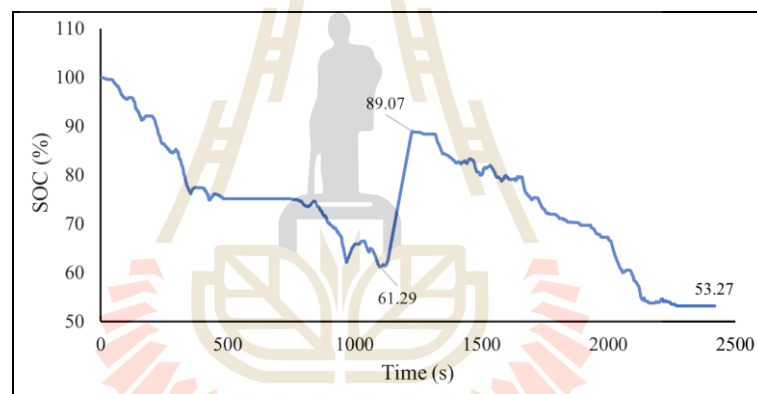


รูปที่ 5.32 น้ำหนักของระบบสะสมพลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 3 เมื่อถึงที่หมายช้า 60 วินาที

รูปที่ 5.30 รูปที่ 5.31 และรูปที่ 5.32 เปรียบเทียบน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานในแต่ละกรณีศึกษา ในกรณีฐานและภายใต้เงื่อนไขการถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด 30 วินาที และ 60 วินาที ตามลำดับ พบว่ากรณีศึกษาที่ 5 และ 6 มีน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานที่ต่ำที่สุดและมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยที่กรณีศึกษาที่ 5 มีแนวโน้มที่ลดลงของน้ำหนักมากกว่า ภายใต้เงื่อนไขการถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด



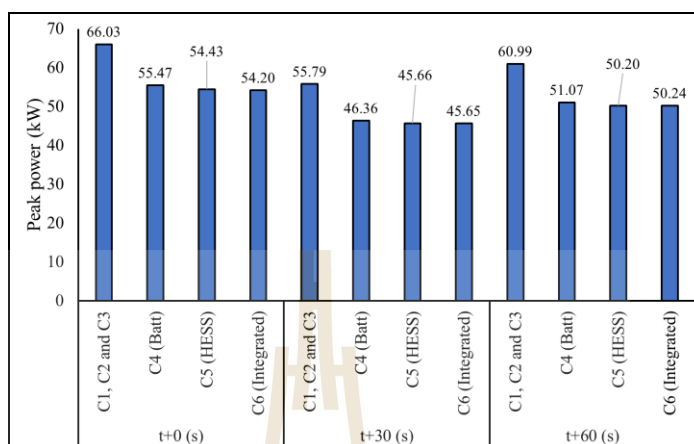
รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบการใช้พลังงาน และพลังงานสุทธิของเส้นทางอ้างอิงที่ 3



รูปที่ 5.34 การเปลี่ยนแปลงสถานะประจุของเส้นทางอ้างอิงที่ 3

รูปที่ 5.33 แสดงการเปลี่ยนแปลงของการใช้พลังงานของเส้นทางอ้างอิงที่ 2 เมื่อเทียบกับเวลา โดยการใช้พลังงานที่เลือกมาเปรียบเทียบคือ ค่าการใช้พลังงานของกรณีฐาน (เส้นทางสีดำ) การใช้พลังงานในการขับเคลื่อนของกรณีศึกษาที่ 6 เมื่อกำหนดให้ถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด 60 วินาที (เส้นประสีแดง) และการใช้พลังงานสุทธิ กรณีศึกษาที่ 6 เมื่อกำหนดให้ถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด 60 วินาที (เส้นประสีฟ้า) สาเหตุที่เปรียบเทียบในกรณีดังกล่าวเพื่อศึกษาในกรณีที่มีการใช้พลังงานสุทธิน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีฐาน พบว่ามีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนลดลงจาก 1.95 kWh เป็น 1.531 kWh หรือลดลง 21.487 % เมื่อพิจารณาพลังงานที่ประจุเข้ามาในระบบสะสมพลังงานระหว่างการขับขี่ ทำให้การใช้พลังงานสุทธิมีค่า 0.73 kWh ถึงแม้ระบบสะสมพลังงานจะต้องจ่ายพลังงานเพื่อใช้ในการขับเคลื่อน 1.531 kWh แต่การประจุพลังงานสู่ระบบสะสมพลังงานทำให้สถานะของ

ระบบสะสมพลังงาน มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 89.07 % สามารถพิจารณาจากรูปที่ 5.34 ซึ่งส่งผลให้ช่วยยืดระยะเวลาในการขับขี่ให้มากขึ้นต่อจำนวนครั้งที่การประจุไฟฟ้าที่สถานี



รูปที่ 5.35 การใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเส้นทางอ้างอิงที่ 3

รูปที่ 5.35 แสดงการใช้กำลังสูงสุดในการขับเคลื่อน พบว่ารูปแบบการใช้ความเร็วที่กำหนดให้ถึงที่หมายช้ากว่ากำหนดมีค่าการใช้กำลังสูงสุดลดลง เมื่อเทียบกับกรณีฐาน และการถึงเป้าหมายล่าช้า 60 วินาที จะมีการใช้กำลังสูงสุดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาเดียวกัน โดยในกรณีที่มีการหาค่าน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมจะมีการใช้พลังงานสูงสุดที่ต่ำกว่ากรณีอื่น และมีค่าใกล้เคียงกัน

5.6 สรุป

จากผลการทดสอบทั้ง 3 เส้นทางที่ใช้ทำการจำลองผล พบว่ามีแนวโน้มของผลการทดลองที่คล้ายกัน ซึ่งสามารถสรุปได้เบื้องต้นว่า ขั้นตอนวิธีการปรับรูปแบบความเร็วเมื่อกำหนดให้ถึงที่หมายล่าช้าสามารถลดการใช้พลังงานและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนลงได้อย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับกรณีฐาน เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาทั้ง 6 กรณี พบว่ากรณีที่มีการปรับปรุงน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานให้เหมาะสม คือ กรณี ที่ 4 5 และ 6 จะมีการใช้พลังงานต่ำกว่ากรณีอื่นอย่างชัดเจน โดยกรณีศึกษาที่ 5 จะมีการใช้พลังงานต่ำที่สุด ซึ่งมีความสอดคล้องกับน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานและกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการขับเคลื่อน สำหรับกรณีศึกษาที่ 6 มีการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกับกรณีศึกษาที่ 5 แต่การใช้พลังงานสุทธิที่ต่ำที่สุดซึ่งทำให้สามารถยืดระยะเวลาในการขับขี่ต่อการประจุไฟฟ้าได้

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อการใช้พลังงาน และกำลังในการขับเคลื่อนอย่างประหยัด โดยระบบการจัดการพลังงานแบบบูรณาการ รวมถึงการยึดระยะในการขับขี่ซึ่งถือเป็นจุดด้อยของยานยนต์ไฟฟ้า ที่มีระยะการขับขี่ที่จำกัดเมื่อเทียบกับยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการปรับรูปแบบความเร็วของเส้นทางตัวอย่าง 3 เส้นทางคือ UNECE R.101 NYCC และ SUT091116 ภายใต้เงื่อนไขการถึงเป้าหมายช้ากว่ากำหนดตามความต้องการของผู้ขับขี่ ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าช้ากว่ากำหนด 30 และ 60 วินาที โดยใช้รูปแบบของความเร็วเดิมเป็นขอบเขตของความเร็วสูงสุด หมายความว่ารูปแบบของความเร็วที่สร้างขึ้นใหม่จะไม่มีความเร็วเกินรูปแบบการใช้ความเร็วเดิม โดยที่ยังต้องมีรูปแบบความเร็วที่คล้ายรูปแบบความเร็วเดิมเพื่อให้สามารถใช้ในสภาพการจราจรแบบเปิดได้ จากผลการทดลองการดำเนินการปรับรูปแบบความเร็วที่เหมาะสมเมื่อถึงที่หมายล่าช้าสามารถลดพลังงาน และกำลังไฟฟ้าสูงสุดในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าได้ โดยขั้นตอนวิธีการปรับรูปแบบความเร็วที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้สามารถ ลดการใช้พลังงาน กำลังไฟฟ้าสูงสุด และถึงที่หมายใกล้เคียงกับเวลาที่กำหนด ได้ดีกว่าการใช้รูปแบบความเร็วคงที่ (Cruise control) ซึ่งเป็นรูปแบบความเร็วที่นิยมใช้ในยานยนต์ปัจจุบัน

ผลกระทบจากการปรับรูปแบบความเร็วส่งผลให้การคืนพลังงานกลับจากการเบรกมีค่าลดลง เป็นผลมาจากการใช้ความเร็วก่อนการเบรกที่ลดลง และส่งผลให้ระยะในการขับขี่สั้นลง จึงได้ทำการพิจารณาจำลองการติดตั้งระบบส่งกำลังแบบไร้สายที่เหมาะสมกับเส้นทางและรูปแบบความเร็วเข้าสู่ระบบ ผลจากการติดตั้งระบบส่งกำลังแบบไร้สาย ทำให้ระบบสะสมพลังงานมีสถานะประจุที่สูงขึ้นเมื่อสิ้นสุดการจำลอง แล้วดำเนินการหาขนาดของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมกับเส้นทางที่ใช้ในการขับขี่ โดยทำการเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างหาขนาดของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสม และการหาขนาดของระบบพลังงานที่เหมาะสมโดยรวมผลของการคืนพลังงานกลับจากการเบรก การประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย และการปรับรูปแบบความเร็วที่เหมาะสม ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เรียกระบบดังกล่าวว่าระบบการจัดการพลังงานแบบบูรณาการ

ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าน้ำหนักของระบบสะสมพลังงานที่ใช้การจัดการแบบบูรณาการมีน้ำหนักมากกว่ากรณีที่ใช้ระบบสะสมพลังงานอย่างเหมาะสมเล็กน้อย ซึ่งไม่ส่งผลให้การใช้

พลังงานและกำลังงานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุที่ระบบการจัดการแบบบูรณาการมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นในบางกรณีเนื่องมาจากต้องใช้ขนาดของระบบสะสมพลังงานที่เหมาะสมเพื่อการประจุพลังงานของระบบการประจุไฟฟ้าแบบไร้สายให้ได้การพลังงานสุทธิที่ต่ำที่สุด

ด้วยเหตุนี้การออกแบบยานยนต์ไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้ระบบการจัดการพลังงานแบบบูรณาการที่ได้พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถพิจารณาการใช้งานอุปกรณ์ที่เหมาะสมและมีความยืดหยุ่นได้ตามเส้นทางและรูปแบบความเร็วของเส้นทางที่ต้องการใช้งานเพื่อให้ใช้พลังงานในการขับเคลื่อนอย่างประหยัดและสามารถยืดระยะเวลาทางการขับขี่ได้เป็นอย่างดี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าประเภทอื่น และเส้นทางอื่นได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

การจำลองระบบสะสมพลังงานในงานวิจัยนี้อยู่ภายใต้สมมติฐานความจุของระบบสะสมพลังงานคงที่ ซึ่งสามารถใช้ค่าพลังงานและกำลังงานจำเพาะของแหล่งสะสมพลังงานในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ โดยสมมติฐานดังกล่าวเป็นที่ใช้อ้างอิงโดยทั่วไปในการออกแบบยานยนต์ไฟฟ้า และงานอุตสาหกรรม (S. Mohrehkesh and T. Nadeem, 2011) (A. Ashtari, E. Bibeau, S. Shahidinejad, and T. Molinski, 2012) แต่อย่างไรก็ตามผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ได้ทำการศึกษาและทดสอบ รวมถึงการหาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยใช้ค่าวัดและทดสอบจริง เพื่ออธิบายพฤติกรรมของระบบสะสมพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าได้สอดคล้องกับความเป็นจริงและหาค่าสถานะของประจุได้อย่างแม่นยำ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ในหัวข้อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายการอ้างอิง

- ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2554). การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- Andrea Davide, (2010). **Battery management systems for large lithium-ion battery packs.** Artech house Norwood, MA;
- Ahmad A., Alam M. S. and Chabaan R. (2018). A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles, in **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, vol. 4, no. 1, pp. 38-63, March 2018.
- Ahmad F., Alam M. S., and Asaad M. (2017). Developments in xEVs charging infrastructure and energy management system for smart microgrids including xEVs, *Sustain. Cities Soc.*, vol. 35, pp. 552–564, Sep. 2017.
- Ashtari A., Bibeau E., Shahidinejad S., and Molinski T. (2012). PEV charging profile prediction and analysis based on vehicle usage data, **IEEE Trans. Smart Grid**, vol. 3, no. 3, pp. 342–350, Mar. 2012.
- Azad Ahmed, Tarak Saha, Regan Zane and Zeljko Pantic. (2015). Design of Hybrid Energy Storage Systems for Wirelessly Charged Electric Vehicles, **In Proceedings of IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC Fall)**, Boston, MA, 6-9 Sept. 2015, pp. 1 – 5.
- Bolger J. G., Kirsten F. A., and Ng L. S. (1978). Inductive power coupling for an electric highway system, **In Proceedings of 28th IEEE Veh. Technol. Conf.**, Mar. 1978, pp. 137–144
- Budhia M., Boys J. T., Covic G. A., and Huang C.Y. (2013). Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems, **IEEE Trans. Ind. Electron.**, vol. 60, no. 1, pp. 318–328, Jan. 2013.
- Chao Y.-H. and Shieh J.J. (2012). Series-parallel loosely coupling power supply with primary-side control, **In Proceedings of IEEE 3rd Int. Conf. Sustain. Energy Technol. (ICSET)**, Sep. 2012, pp. 352–356.

- Chen W., Liu C., Lee C. H. T., and Shan Z. (2016). Cost-effectiveness comparison of coupler designs of wireless power transfer for electric vehicle dynamic charging, **Energies**, vol. 9, no. 11, p. 906, Nov. 2016.
- Chen Zhao, He Yin, Minfan Fu and Chengbin Ma. (2014). Analysis, control, and wireless charging of energy systems using ultracapacitors, **In Proceedings of IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)**, Florence, 17-19 Dec. 2014, pp. 1 – 8.
- Covic G. A., Boys J. T., Budhia M., and Huang C.Y. (2010). Electric vehicles—Personal transportation for the future, **World Electric. Vehicle J.**, vol. 4, pp. 693–704, Jun. 2010.
- Dashora H. K., Bertoluzzo M., and Buja G. (2015). Reflexive properties for different pick-up circuit topologies in a distributed IPT track **In Proceedings of IEEE Int. Conf. Ind. Informat. (INDIN)**, Jul. 2015, pp. 69–75.
- Dubey K. Gopal. (2001). **Fundamentals of Electrical Drives**, Second Edition, Alpha Science International Ltd. Harrow, U.K. 2001.
- Ehsani M., Gao, Y., Emadi, A. (2010). **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design.**, Power electronics and applications series (2nd). CRC press.
- Elbert P., Ebbesen S., and Guzzella L. (2013). Implementation of dynamic programming for n-dimensional optimal control problems with final state constraints. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 21(3), 924–931.
- Flores Carlos, Milanés Vicente, Pérez Joshué, González David, Nashashibi Fawzi. (2015). Optimal energy consumption algorithm based on speed reference generation for urban electric vehicles. **Proceedings of IV2015 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium**, Jun 2015, Seoul, South Korea. IEEE, pp.730 – 735.
- Hao P., Boriboonsomsin K., Wu G. and Barth M. J. (2017). Modal Activity-Based Stochastic Model for Estimating Vehicle Trajectories from Sparse Mobile Sensor Data, **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, vol. 18, no. 3, pp. 701-711, March 2017.
- Hiramatsu Toshiyuki, Xiaoliang Huang and Yoichi Hori. (2014). Capacity design of supercapacitor battery hybrid energy storage system with repetitive charging via

- Wireless Power Transfer., **In Proceedings of Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC)**, 16th International, 21-24 Sept, 2014, pp. 490 – 495.
- Huang Xiaoliang, Joao Marcus Abreu Curti and Hori Yoichi. (2013). Energy management strategy with optimized power interface for the battery supercapacitor hybrid system of Electric Vehicles, **In Proceedings of Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE**, Vienna, 10-13 Nov. 2013, pp. 4635 – 4640.
- Huh J., Lee S. W., Lee W. Y., Cho G. H., and Rim C. T. (2011). Narrowwidth inductive power transfer system for online electrical vehicles, **IEEE Trans. Power Electron.**, vol. 26, no. 12, pp. 3666–3679, Dec. 2011.
- Jang Y. J., Jeong S., and Lee M. S. (2016). Initial energy logistics cost analysis for stationary, quasi-dynamic, and dynamic wireless charging public transportation systems, **Energies**, vol. 9, no. 7, p. 483, 2016.
- Jang Y. J., Jeong S., and Lee M. S. (2016). Initial energy logistics cost analysis for stationary, quasi-dynamic, and dynamic wireless charging public transportation systems, **Energies**, vol. 9, no. 7, p. 483, 2016.
- Jang Y. J., Suh E. S. and J. Kim W. (2016). System Architecture and Mathematical Modelsof Electric Transit Bus System Utilizing Wireless Power Transfer Technology, **IEEE Systems Journal**, vol. 10, no. 2, pp. 495-506, June 2016.
- Karangia Rahul, Mehulsinh Jadeja, Chetankumar Upadhyay and Hina Chandwani. (2 0 1 3). Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System used in Electric Vehicle, **In Proceedings of International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)**, pp. 688 – 691, 10-12 April 2013.
- Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J. D., Fisher P. and Soljačić M. (2007). Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances, **Science**, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, 2007.
- Liu S. Li, Z., Zhao H., Zhu L., Shuai C., and Chen Z. (2016). Wireless power transfer by electric field resonance and its application in dynamic charging, **IEEE Trans. Ind. Electron.**, vol. 63, no. 10, pp. 6602–6612, Oct. 2016.

- Lukic S., and Pantic Z. (2013). Cutting the cord: Static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles, **IEEE Electric. Mag.**, vol. 1, no. 1, pp. 57–64, Sep. 2013.
- Maglaras L. A., Jiang J., Maglaras A., Topalis F. V., and Moschoyiannis S. (2015). Dynamic wireless charging of electric vehicles on the move with mobile energy disseminators, **Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.**, vol. 6, no. 6, pp. 239–251, 2015.
- Masrur, M.A. (2008). Penalty for fuel economy – system level perspectives on the reliability of hybrid electric vehicle during normal and graceful degradation operation. **IEEE Systems Journal**, 2 (4), 476-483; 2008.
- Mi Chris., Abul Masrur, M., Gao, David Wenzhong. (2011). **Hybrid Vehicles Principles and Applications with Practical Perspectives**, John Wiley & Sons, Ltd; Singapore.
- Mierlo J.V., Maggetto G., de Burgwal E.V., Gense R. (2004). Driving style and traffic measures-influence on vehicle emissions and fuel consumption, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, 218 (1) (2004), pp. 43-50
- Miller J. M., Onar O. C., and Chinthavali M. (2015). Primary-side power flow control of wireless power transfer for electric vehicle charging, **IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron.**, vol. 3, no. 1, pp. 147–162, Mar. 2015.
- Ming Tingyou, Weiwen Deng, Jian Wu and Qiao Zhang. (2014). A hierarchical energy management strategy for battery-supercapacitor hybrid energy storage system of electric vehicle, **In Proceedings of IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)**, Beijing, Aug. 31 2014-Sept. 3 2014, pp. 1 – 5.
- Mohamed A. A. S., Lashway C. R., and Mohammed O. (2017). Modeling and feasibility analysis of quasi-dynamic WPT system for EV applications,” **IEEE Trans. Transport. Electrific.**, vol. 3, no. 2, pp. 343–353, Jun. 2017.
- Mohrehkesh S. and Nadeem T. (2011). Toward a wireless charging for battery electric vehicles at traffic intersections, **In Proceedings of. 14th Int. IEEE Conf. Intell. Transp. Syst.**, 2011, pp. 113–118.

- Qiu C., K. Chau T., Liu C., and Chan C. C. (2013). Overview of wireless power transfer for electric vehicle charging, **In Proceedings of Electr. Veh. Symp. Exhib. (EVS)**, vol. 7. Apr. 2013, pp. 1–9.
- Rohkämper, S., Hellwig, M., Ritschel, W. (2017). Energy optimization for electric vehicles using dynamic programming, **In Proceedings of International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)**, Wolfenbuttel, pp. 1-5.
- Sadoun R., Rizoug N., Bartholomeüs P. and Barbedette B. (2011). Influence of the drive cycles on the sizing of hybrid storage system battery-supercapacitor supplying an electric vehicle, **In Proceedings of IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society**, Melbourne, VIC, 7-10 Nov. 2011, pp. 4106 – 4112.
- Saikong, W., Kulworawanichpong, T. (2017). Comparative Study of Energy Consumption for Electric Vehicles with Various On-board Energy Storage Systems. **Energy Procedia**, pp. 81–86.
- Sakamoto H., Harada K., Washimiya S., Takehara K., Matsuo Y., and Nakao F. (1999). Large air-gap coupler for inductive charger [for electric vehicles], **IEEE Trans. Mag.**, vol. 35, no. 5, pp. 3526–3528, Sep. 1999.
- Saleem, Muhammad., Desmaris, Vincent., Enoksson, Peter. (2016). Performance Enhancement of Carbon Nanomaterials for Supercapacitors. **Journal of Nanomaterials.**, pp.1-17.
- Sarang R. Soni, Chetan D. Upadhyay and Hina Chandwani. (2015). Analysis of battery-super capacitor based storage for electrical vehicle, **In Proceedings of International Conference on Energy Economics and Environment (ICEEE)**, Noida, 27-28 March 2015, pp. 1 – 7.
- Shinohara N. (2013). Wireless power transmission progress for electric vehicle in Japan, **In Proceedings of IEEE Radio Wireless Symp. (RWS)**, Jan. 2013, pp. 109–111
- Suh N. P. and Cho D. H., The On-Line Electric Vehicle. (2017). **Wireless Electric Ground Transportation Systems**. Springer, 2017, pp. 402.
- Sun T., Xie X., and Wang Z. (2013). **Wireless Power Transfer for Medical Microsystems**. New York, NY, USA: Springer,

- The United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2018). **UN Vehicle Regulations – 1958**, UN Regulation No. 101 - Rev.3, Dec 2018, [online] Available: <https://www.unece.org/?id=39146>
- U.S. Environmental Protection Agency, USEPA. (2016). **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2014.**, Final Report, EPA 430-R-16-002, April.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2018). **Dynamometer Drive Schedules**, [online] Available: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules#vehicleDDS>
- Van Keulen T., de Jager B., Foster D. and Steinbuch M. (2010). Velocity trajectory optimization in Hybrid Electric trucks, **Proceedings of the 2010 American Control Conference**, Baltimore, MD, 2010, pp. 5074-5079.
- Vatsala A., Ahmad M., Alam S., and Chaban R.C. (2017). Efficiency enhancement of wireless charging for electric vehicles through reduction of coil misalignment, **In Proceedings of IEEE Transp. Electric. Conf. Expo (ITEC)**, Jun. 2017, pp. 21–26
- Weißmann Andreas, Görges Daniel, Lin Xiaohai. (2017). Energy-Optimal Adaptive Cruise Control based on Model Predictive Control, **IFAC-Papers Online**, Volume 50, Issue 1, 2017, Pages 12563-12568.



ภาคผนวก ก

การทดสอบการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า และเครื่องยนต์สันดาปภายใน

ก.1 การทดสอบการเดินรถโดยสารไร้มลพิษบนถนนใช้งานจริง

ในระหว่างการศึกษาผู้วิจัยได้มีโอกาส ในการทำงานร่วมกับทีมวิจัยในการวิจัย สร้าง และ พัฒนารถไฟฟ้าโดยสารไร้มลพิษของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และได้พัฒนาระบบเก็บข้อมูลของยานยนต์ไฟฟ้าโดยละเอียด ทั้งระบบควบคุม ระบบสื่อสาร ระบบแจ้งเตือนเมื่อเกิดความผิดปกติ รวมถึง ข้อมูลการใช้พลังงาน ดังนั้นในภาคผนวกนี้จึงได้นำเอาผลการทดสอบการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า และยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

ก.1.1 รูปแบบการเดินรถในเขตเมือง

การทดสอบ วิเคราะห์และเปรียบเทียบการใช้พลังงานของรถโดยสารไร้มลพิษกับรถบัสที่ใช้น้ำมันภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เส้นทางวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ระยะทางวิ่ง 1 รอบ ประมาณ 13 km ผ่านสถานที่สำคัญ 7 แห่ง เริ่มต้นจากอาคารขนส่ง มทส. เทคโนโลยีธานี อาคารกาญจนาภิเษก หอดูดาว โรงพยาบาล มทส. ฟาร์มมหาวิทยาลัยและหอพักนักศึกษาแสดงดังรูปที่ ก.1 ซึ่งสามารถใช้แทนรูปแบบการเดินรถในเขตเมืองได้ ผู้โดยสารที่ใช้บริการส่วนใหญ่จะเป็นนักเรียนจากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัยที่เข้ามาเรียนที่เทคโนโลยีสุรนารี ภายใต้โครงการห้องเรียนวิทยาศาสตร์ (วมว.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้โดยสารเฉลี่ยต่อเที่ยว 10 คน โดยบรรยายการวิ่งทดสอบแสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.1 เส้นทางวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

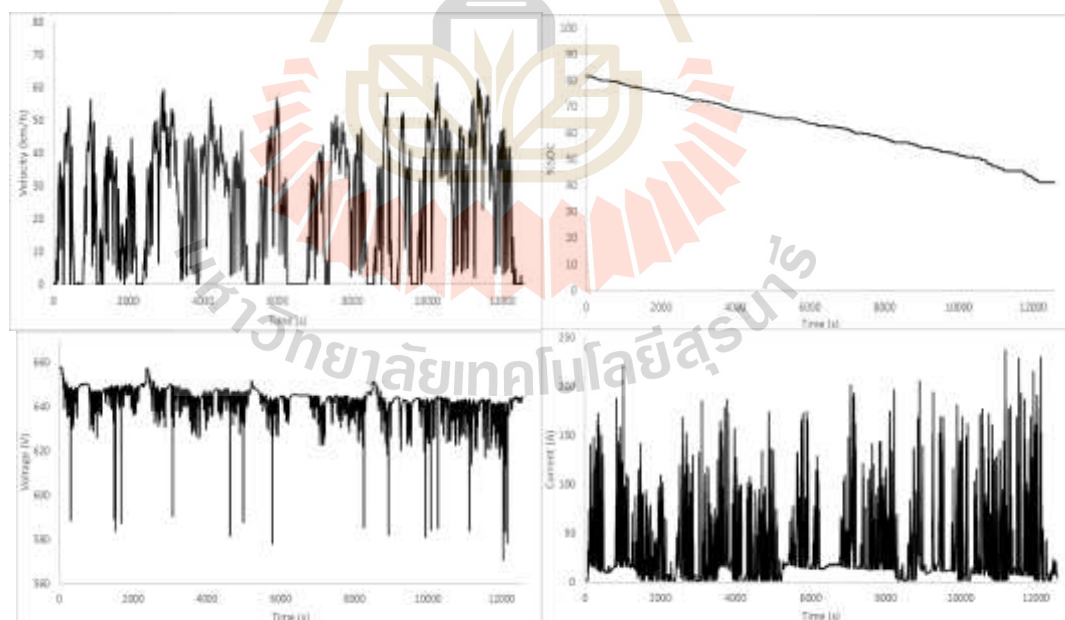


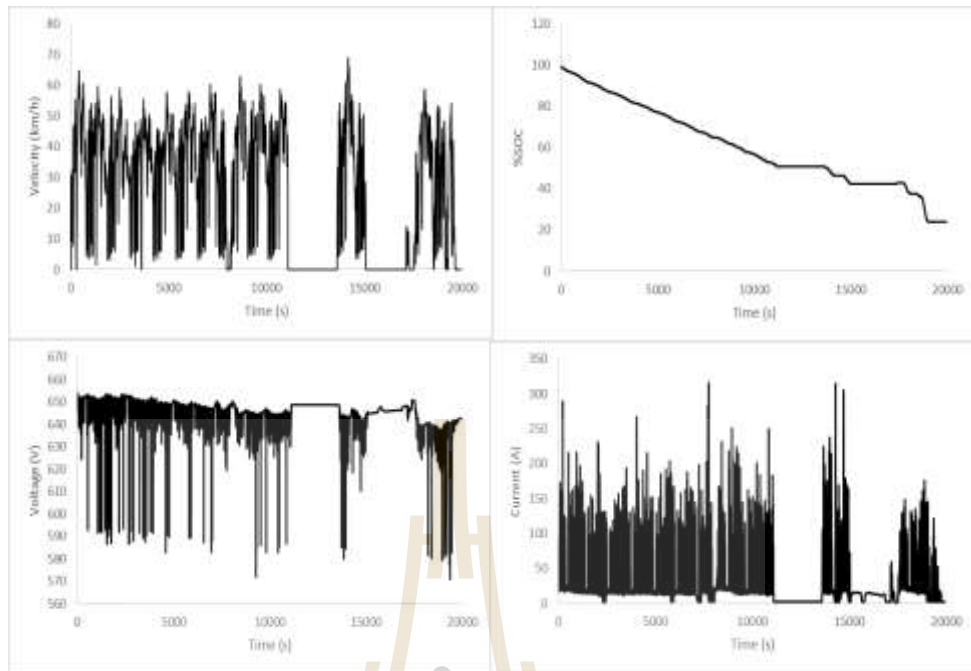
รูปที่ ก.2 บรรยากาศการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ทดสอบวิ่งรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นเวลา 1 เดือน ตั้งแต่วันที่ 9 พฤศจิกายน 2559 ถึงวันที่ 8 ธันวาคม 2559 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไฟฟ้าในรูปแบบการเดินรถในเขตเมืองภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงดังตารางที่ ก.1 และผลของความเร็ว %SOC แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ของการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในช่วงวันต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ ก.3-ก.10

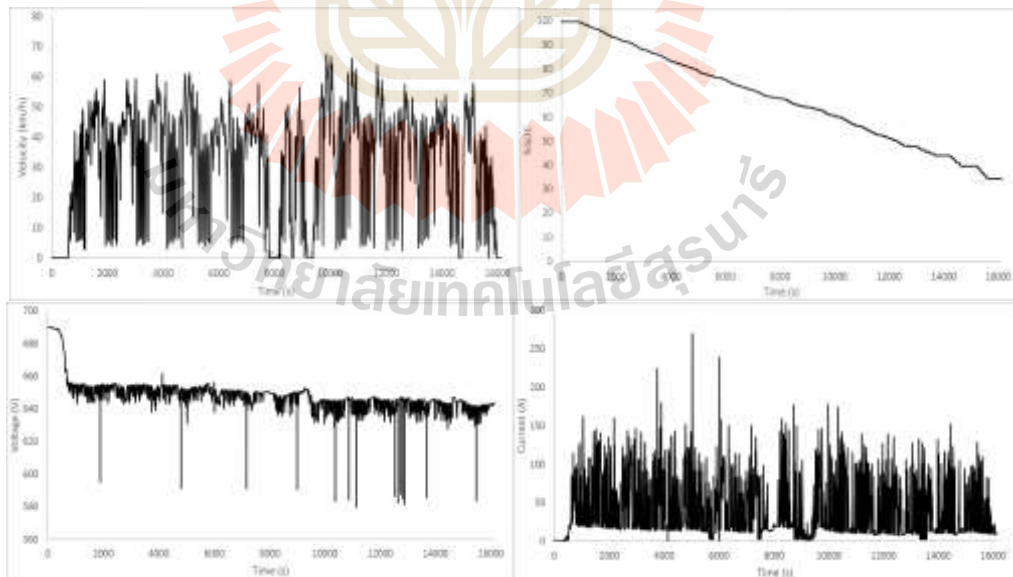
ตารางที่ ก.1 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไฟฟ้าในรูปแบบการเดินรถในเขตเมือง

วันที่	% SOC เริ่มต้น	% SOC สิ้นสุด	ค่าการใช้ พลังงาน (kWh)	ระยะทาง (km)	การใช้พลังงาน ต่อระยะทาง (kWh/km)	ความเร็ว เฉลี่ย (km/h)	ความเร็ว สูงสุด (km/h)
09-11/11/2559	81.60	41.20	79.184	88.262	0.897	25.262	62.442
14-15/11/2559	99.20	24.00	147.392	145.000	1.016	26.186	69.039
15-16/11/2559	100.00	34.40	128.576	143.809	0.894	32.694	67.487
16-17/11/2559	98.00	25.60	141.904	153.770	0.923	32.771	76.344
18/11/59	43.60	26.40	33.712	55.409	0.608	34.215	61.683
18-21/11/2559	99.60	28.80	138.768	134.807	1.029	30.171	71.933
06/12/59	60.00	22.80	72.912	83.645	0.872	34.612	67.129
07-08/12/2559	99.60	53.20	90.944	205.530	0.442	35.731	79.705
รวม			833.392	1010.23	0.825		

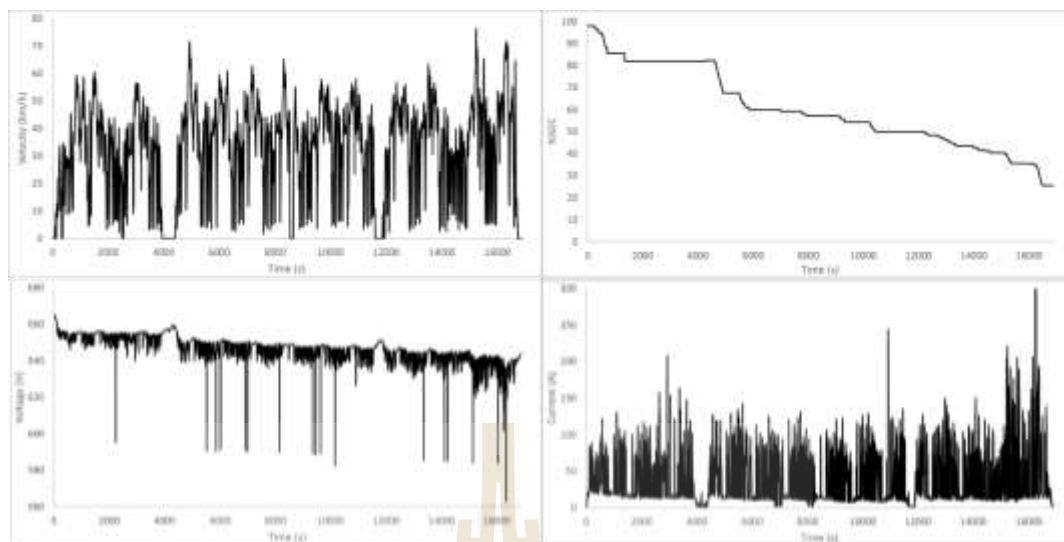
รูปที่ ก.3 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
วันที่ 9-11/11/2559



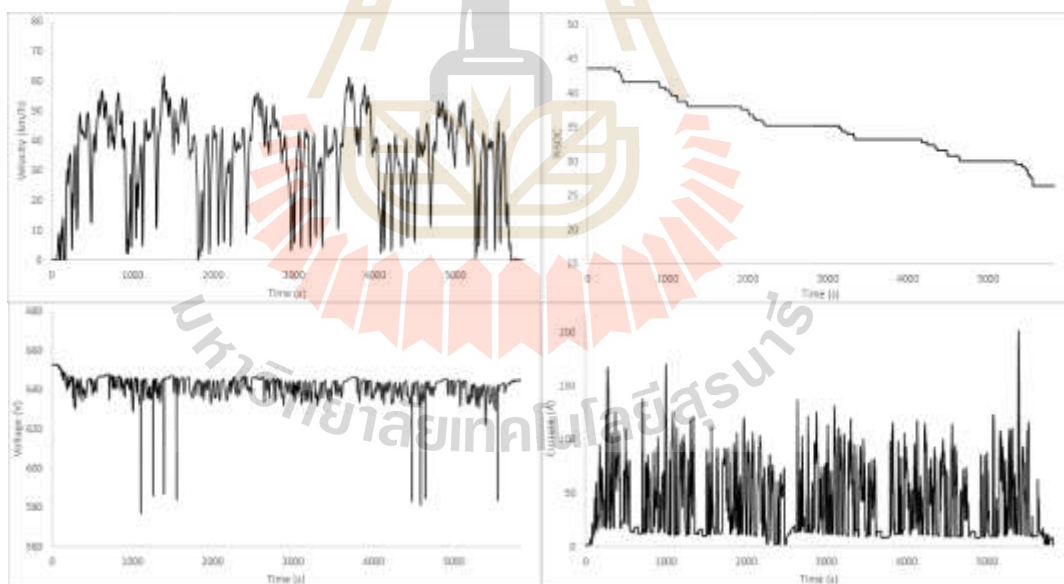
รูปที่ ก.4 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
วันที่ 14-15/11/2559



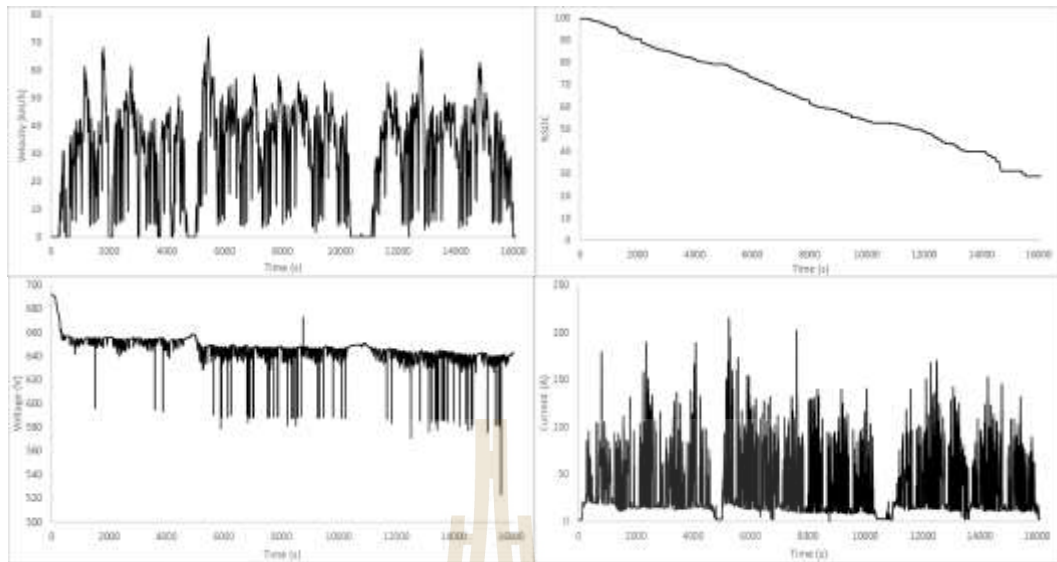
รูปที่ ก.5 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
วันที่ 15-16/11/2559



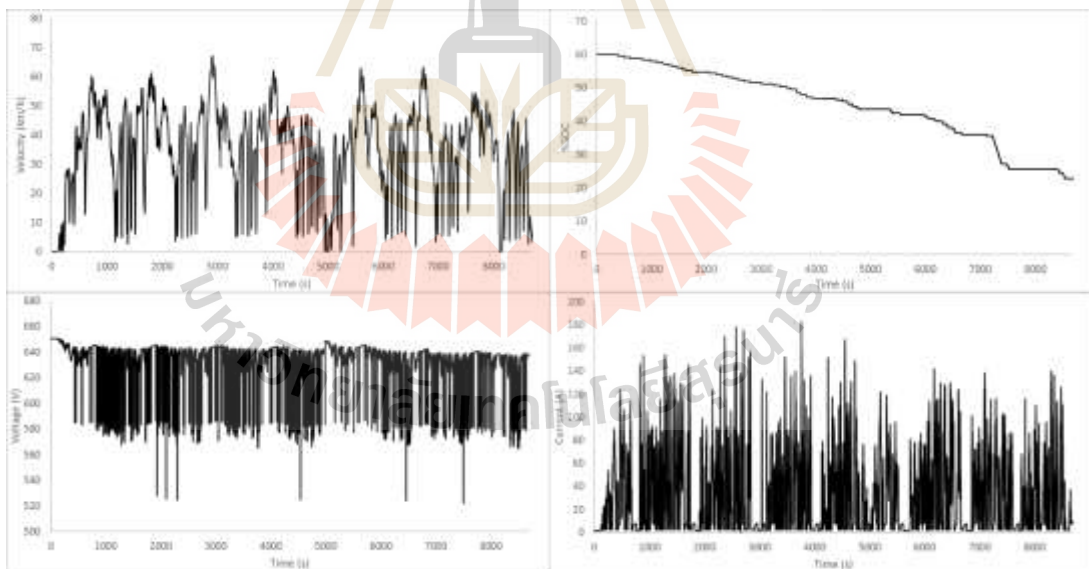
รูปที่ ก.6 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้คนขับภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
วันที่ 16-17/11/2559



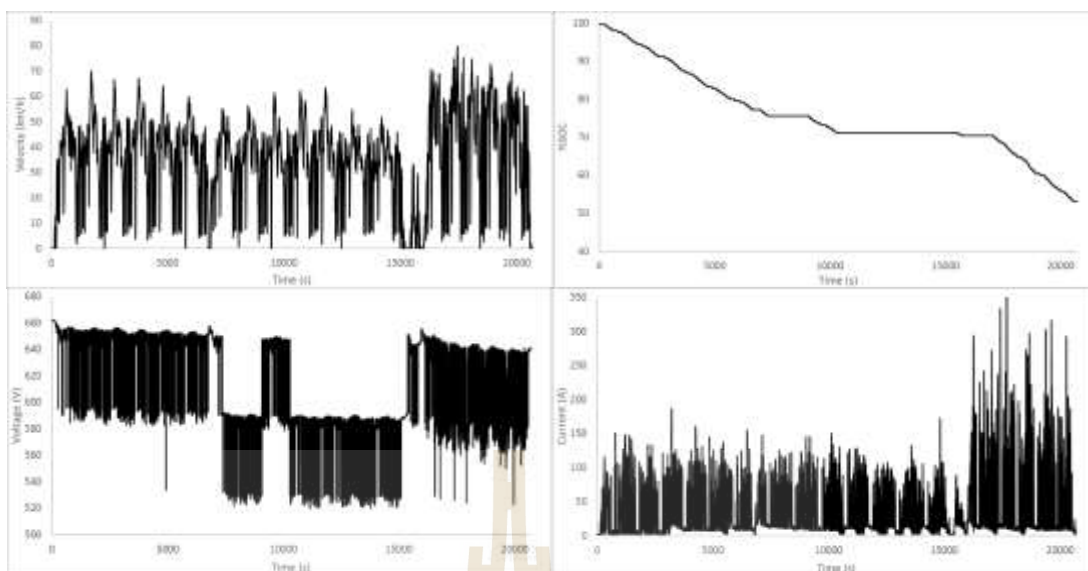
รูปที่ ก.7 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้คนขับภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
วันที่ 18/11/2559



รูปที่ ก.8 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้คนขับภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
วันที่ 18-21/11/2559



รูปที่ ก.9 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้คนขับภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
วันที่ 6/12/2559

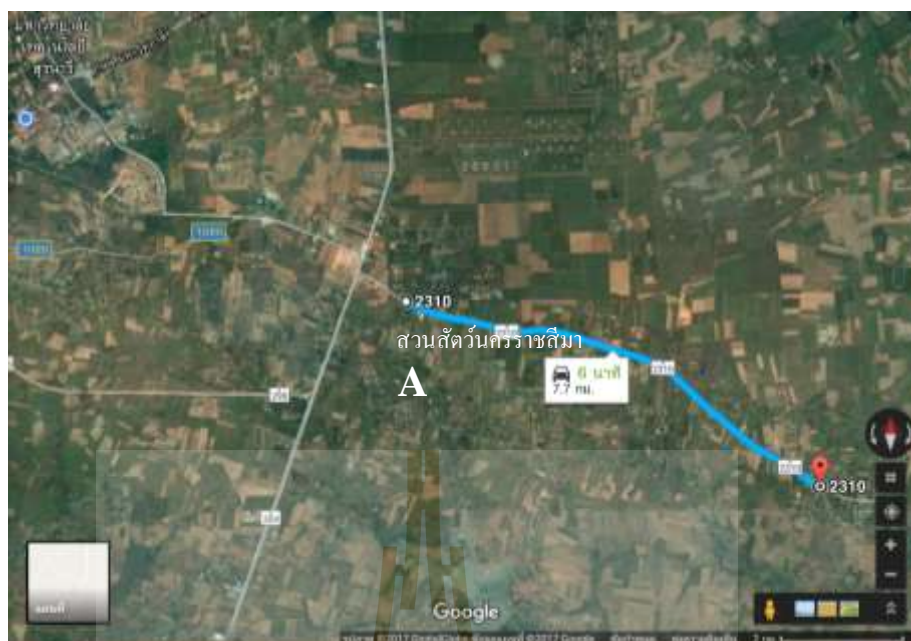


รูปที่ ก.10 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
วันที่ 7-8/12/2559

จากการทดสอบวิ่งรถโดยสารไร้มลพิษภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นเวลา 1 เดือน ตั้งแต่วันที่ 9 พฤศจิกายน 2559 ถึงวันที่ 8 ธันวาคม 2559 แสดงดังตารางที่ 6.1 พบว่าความเร็วเฉลี่ยที่รถวิ่งได้ต่อรอบการประจุแบตเตอรี่มีค่ามากกว่า 19 km/h ตามมาตรฐาน ซึ่งสามารถใช้แทนรูปแบบการเดินรถในเขตเมืองได้ การใช้พลังงานต่อระยะทางเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.825 kWh/km ภายใต้ระยะทางทดสอบ 1010.231 km ใช้พลังงานไฟฟ้าไปทั้งสิ้น 833.392 kWh จากพิกัดความจุแบตเตอรี่ 196 kWh กำหนดพิกัด SOC ใช้งานอยู่ที่ 20-100% ทำให้สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ได้ 156.8 kWh ดังนั้นจากการใช้พลังงานต่อระยะทางเฉลี่ย 0.825 kWh/km รถโดยสารไร้มลพิษของ กฟภ. สามารถวิ่งได้ระยะทางประมาณ $156.8/0.825$ เท่ากับ 190 km ต่อการประจุแบตเตอรี่เต็ม 1 ครั้ง

ก.1.2 รูปแบบการเดินรถในเขตนอกเมือง

การทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษในรูปแบบการเดินรถในเขตนอกเมืองจะทดสอบวิ่งโดยให้ความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 62 km/h ตามมาตรฐาน แต่เนื่องจากคณะวิจัยได้ทำการทดลองวิ่งเส้นทางภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีอยู่หลายครั้งในหลายเส้นทาง ความเร็วเฉลี่ยที่รถสามารถวิ่งได้ไม่ถึงเกณฑ์ตามมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ ดังนั้นทางคณะวิจัยจึงเปลี่ยนเส้นทางไปทดสอบวิ่งในเส้นทางนอกมหาวิทยาลัยฯ โดยใช้เส้นทางวิ่งบนถนนสาย 2310 จากหน้าสวนสัตว์นครราชสีมา (จุด A) ไปยังจุด B ระยะทางประมาณ 7.7 km ดังรูปที่ ก.11



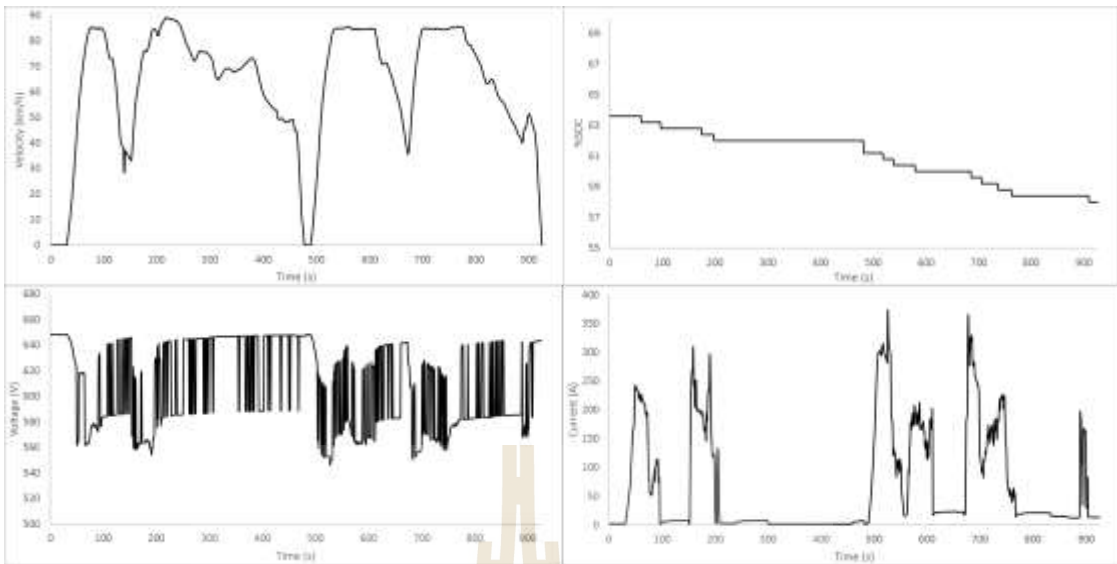
รูปที่ ก.11 เส้นทางวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษในรูปแบบการเดินทางในเขตนอกเมือง

เนื่องจากการทดสอบในรูปแบบการเดินทางในเขตนอกเมืองนี้ต้องทดสอบภายนอกมหาวิทยาลัย และต้องทำความเร็วค่อนข้างสูง ทางคณะวิจัยเป็นห่วงเรื่องความปลอดภัย ดังนั้นการทดสอบจึงจำกัดแค่ 2 รอบ ในกรณีบรรดามีผู้โดยสารและไม่มีผู้โดยสาร ผลการวิ่งทดสอบแสดงดังตารางที่ ก.2 และผลของความเร็ว %SOC แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ของการวิ่งทดสอบ แสดงดังรูปที่ ก.12 และ ก.13

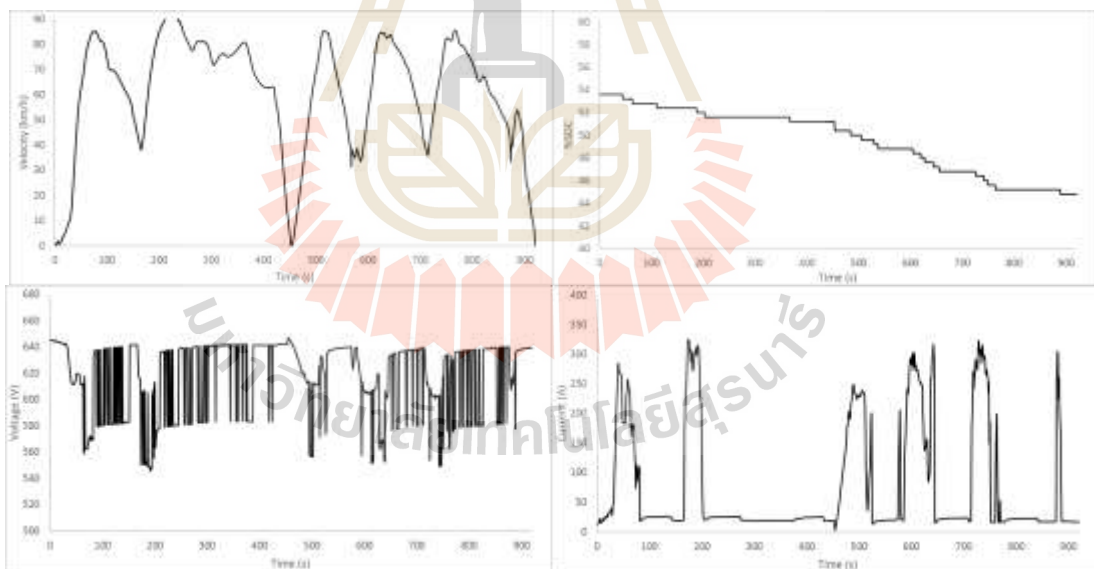
ตารางที่ ก.2 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้มลพิษในรูปแบบการเดินทางในเขตนอกเมือง

เส้นทางไป-กลับ	% SOC เริ่มต้น	% SOC สิ้นสุด	ค่าการใช้พลังงาน (kWh)	การใช้พลังงานต่อระยะทาง (km)	การใช้พลังงานต่อระยะทาง (kWh/km)	ความเร็วเฉลี่ย (km/h)	ความเร็วสูงสุด (km/h)
A – B (ไม่มีผู้โดยสาร)	63.60	58.00	10.976	16.188	0.678	62.94	89.05
A – B (มีผู้โดยสาร*)	53.60	44.80	17.248	15.731	1.096	61.56	90.66

หมายเหตุ * จำนวนผู้โดยสาร 30 คน น้ำหนักรวม 1,971 kg



รูปที่ ก.12 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้คนขับในรูปแบบการเดินรถในเขตนอกเมือง
แบบไม่มีผู้โดยสารวันที่ 03/02/2560



รูปที่ ก.13 ผลการวิ่งทดสอบรถโดยสารไร้คนขับในรูปแบบการเดินรถในเขตนอกเมือง
แบบมีผู้โดยสารวันที่ 03/02/2560

จากการทดสอบวิ่งรถโดยสารไร้มลพิษในรูปแบบการเดินรถในเขตนอกเมืองวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2560 แสดงดังตารางที่ 6.2 พบว่าความเร็วเฉลี่ยที่รถวิ่งได้ต่อรอบการประจุแบตเตอรี่มีค่าประมาณ 62 km/h ตามมาตรฐาน ซึ่งสามารถใช้แทนรูปแบบการเดินรถในเขตนอกเมืองได้ กรณีไม่มีผู้โดยสาร การใช้พลังงานต่อระยะทางเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.678 kWh/km ภายใต้ระยะทางทดสอบ 16.188 km ใช้พลังงานไฟฟ้าไปทั้งสิ้น 10.976 kWh จากพิกัดความจุแบตเตอรี่ 196 kWh กำหนดพิกัด SOC ใช้งานอยู่ที่ 20-100% ทำให้สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ได้ 156.8 kWh ดังนั้นจากการใช้พลังงานต่อระยะทางเฉลี่ย 0.678 kWh/km รถโดยสารไร้มลพิษของ กฟภ. สามารถวิ่งได้ระยะทางประมาณ $156.8/0.678$ เท่ากับ 231.3 km ต่อการประจุแบตเตอรี่เต็ม 1 ครั้ง ส่วนกรณีมีผู้โดยสารทำให้น้ำหนักโดยรวมเพิ่มขึ้นอีก 1,971 kg การใช้พลังงานต่อระยะทางเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.096 kWh/km ภายใต้ระยะทางทดสอบ 16.188 km ซึ่งจากการคำนวณรถโดยสารไร้มลพิษสามารถวิ่งได้ระยะทางประมาณ $156.8/1.096$ เท่ากับ 143.1 km ต่อการประจุแบตเตอรี่เต็ม 1 ครั้ง

ก.2 การทดสอบเดินรถโดยสารประเภทพลังงานเชื้อเพลิงเพื่อการเปรียบเทียบ

การดำเนินการทดสอบเดินรถโดยสารประเภทพลังงานเชื้อเพลิงเพื่อการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการใช้พลังงานบนเส้นทางเดียวกันตามการทดสอบรถโดยสารไฟฟ้าในหัวข้อที่ผ่านมา การทดสอบนี้ใช้รถปีบทอง ซึ่งเป็นรถโดยสารขนาด 46 ที่นั่ง ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังรูปที่ ก.14 ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ตารางที่ ก.3 และข้อมูลความเร็วและความสูงของการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ ก.15-ก.26

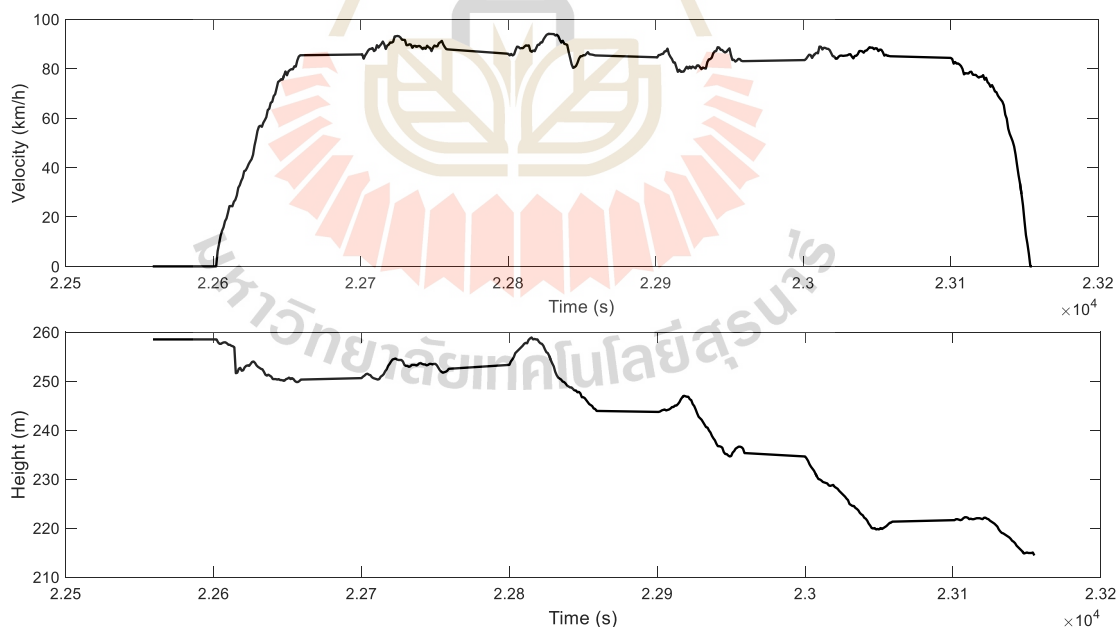


รูปที่ ก.14 รถปีบทองของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

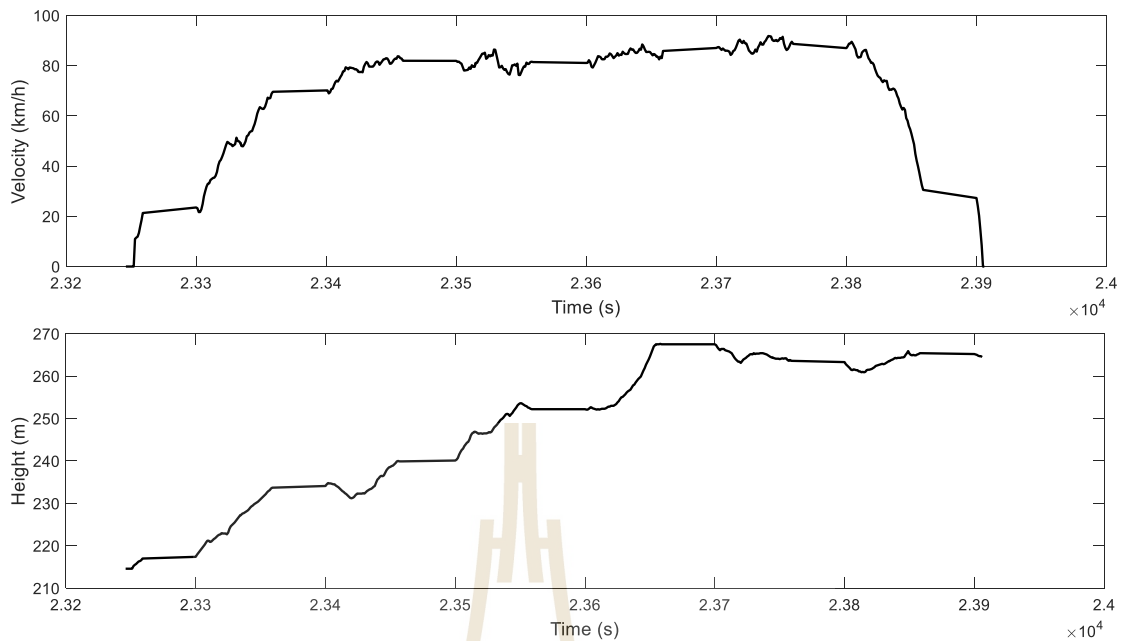
ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบการใช้น้ำมันของรถปีบทอง วันที่ 5 มิถุนายน 2560

เส้นทาง	เวลาเริ่ม (น.)	ระยะเวลา ทดสอบ (นาที)	ความเร็ว เฉลี่ย (km/h)	ระยะทาง (km)	สิ้นเปลือง น้ำมัน (ลิตร)	อัตราการ สิ้นเปลือง น้ำมัน (ลิตร/กม.)
นอกเมืองมี ผู้โดยสาร*	09.26	13	71.2	14.9	5.3	0.36
นอกเมืองไม่มี ผู้โดยสาร	10.34	16	74.3	14.9	4.2	0.28
ในเมืองมี ผู้โดยสาร*	09.50	20	38.3	11.5	4.6	0.40
ในเมืองไม่มี ผู้โดยสาร	11.01	19	37.6	11.5	3.7	0.36

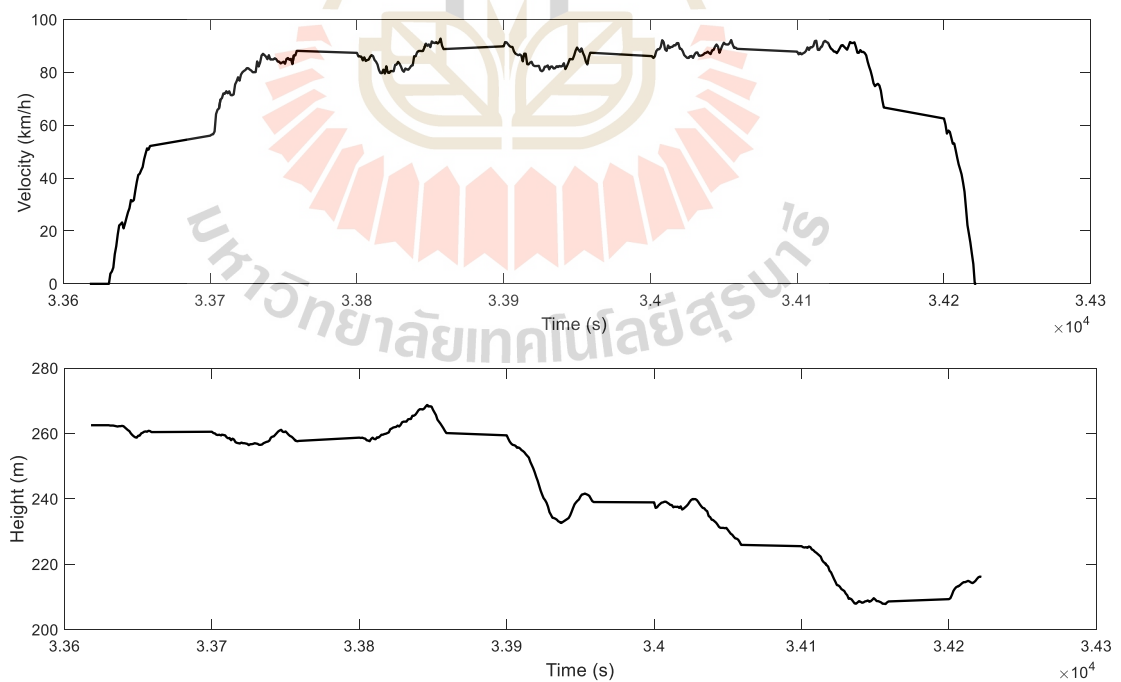
หมายเหตุ * จำนวนผู้โดยสาร 28 คน น้ำหนักรวม 1,885 kg



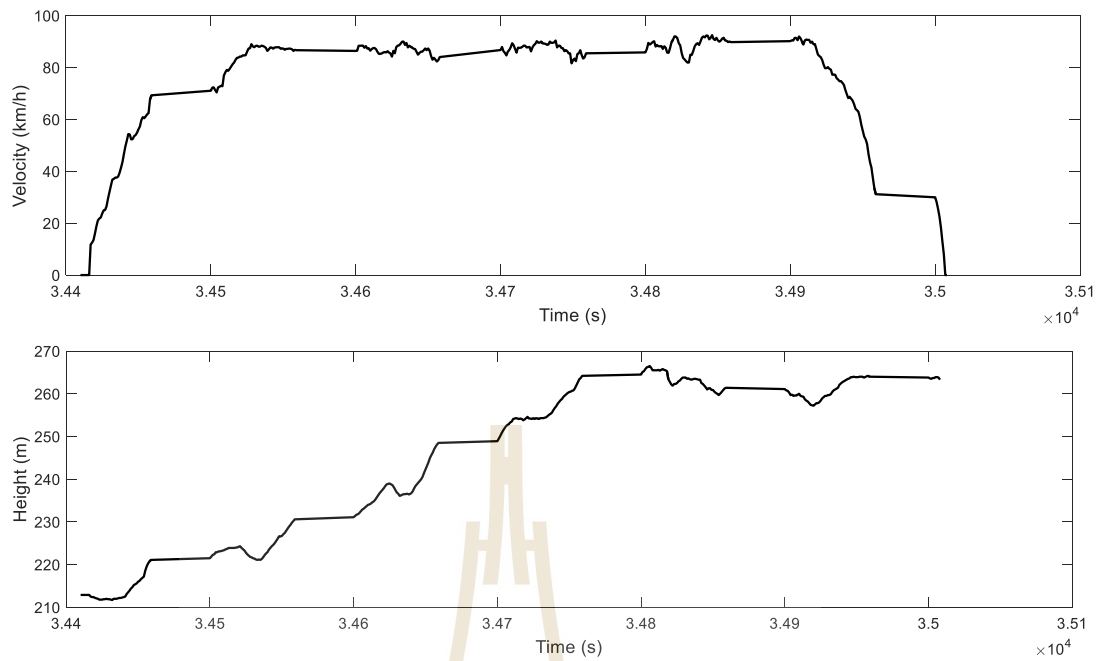
รูปที่ ก.15 ผลการเก็บข้อมูลความเร็วและความสูงของการเดินรถเชื้อเพลิงเส้นทางนอกเมือง
แบบมีผู้โดยสาร



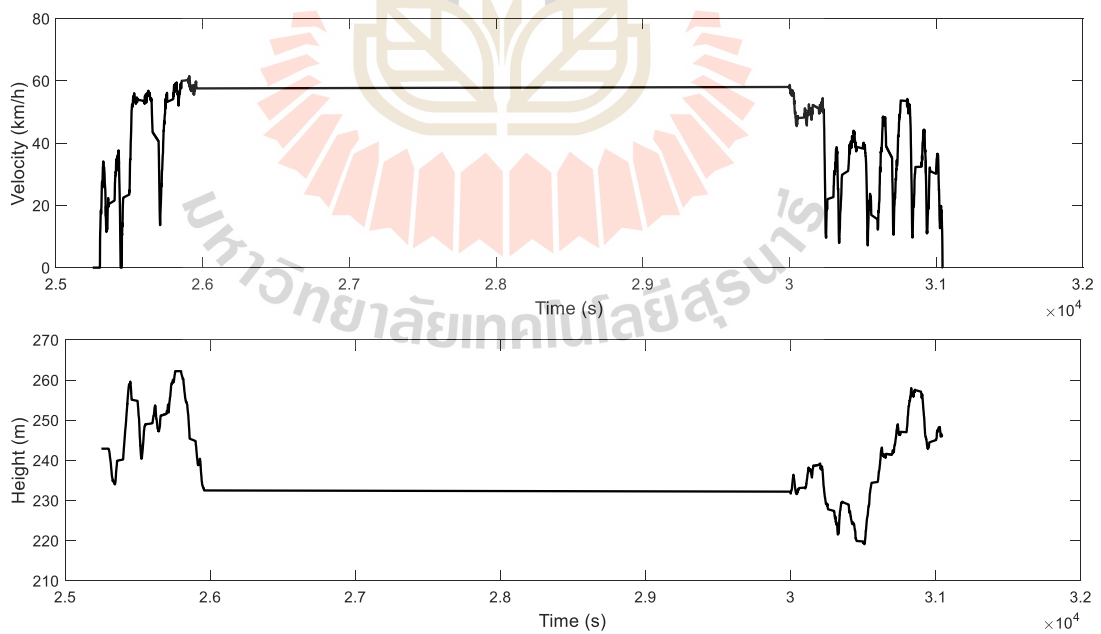
รูปที่ ก.16 ผลการเก็บข้อมูลความเร็วและความสูงของการเดินรถเชื้อเพลิงเส้นทางนอกเมือง
แบบมีผู้โดยสาร (ขากลับ)



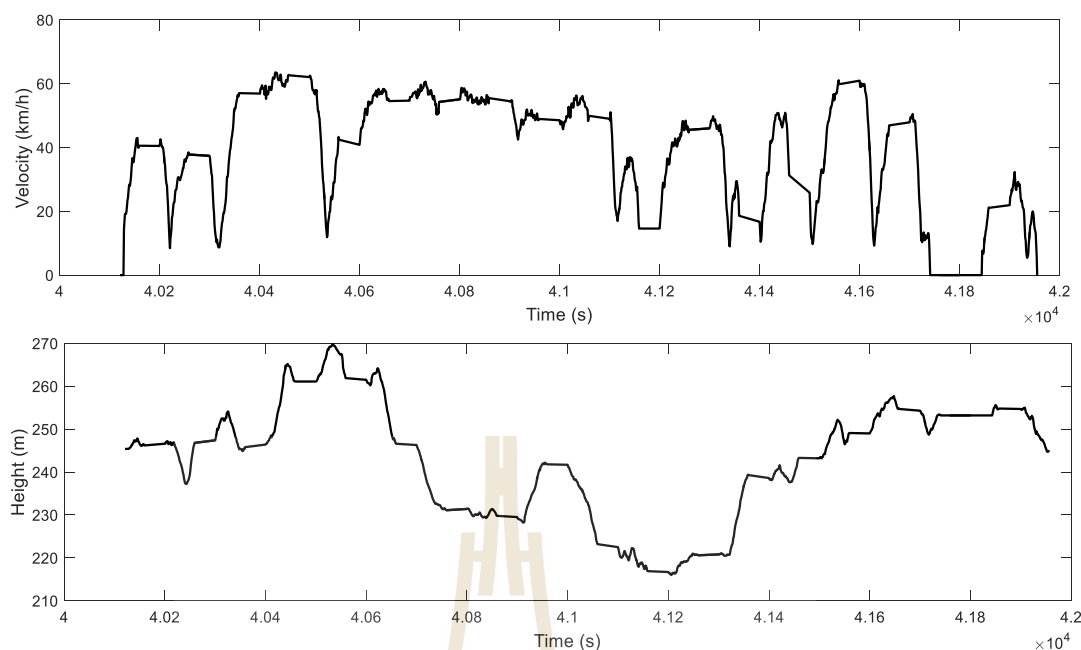
รูปที่ ก.17 ผลการเก็บข้อมูลความเร็วและความสูงของการเดินรถเชื้อเพลิงเส้นทางนอกเมือง
แบบไม่มีผู้โดยสาร (ขาไป)



รูปที่ ก.18 ผลการเก็บข้อมูลความเร็วและความสูงของการเดินรถเชื้อเพลิงเส้นทางนอกเมือง
แบบไม่มีผู้โดยสาร (ขากลับ)



รูปที่ ก.19 ผลการเก็บข้อมูลความเร็วและความสูงของการเดินรถเชื้อเพลิงเส้นทางในเมือง
แบบมีผู้โดยสาร

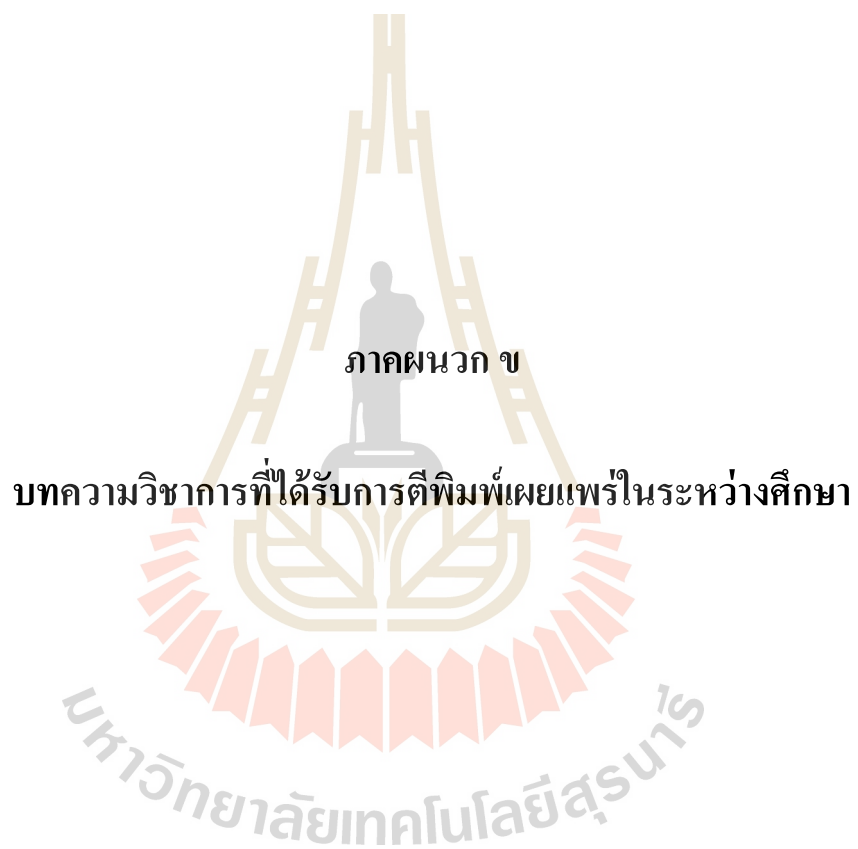


รูปที่ ก.20 ผลการเก็บข้อมูลความเร็วและความสูงของการเดินรถเชื้อเพลิงเส้นทางในเมือง
แบบไม่มีผู้โดยสาร

จากข้อมูลการทดสอบรถโดยสารไฟฟ้าและรถโดยสารพลังงานเชื้อเพลิงบนเส้นทางรถเดินรถเดียวกัน ปริมาณผู้โดยสาร และระยะทางเดียวกัน สามารถเปรียบเทียบค่าความสิ้นเปลืองเมื่อคิดเป็นจำนวนเงินตามตารางที่ ก.4 แล้วพบว่า รถโดยสารไฟฟ้ามีความประหยัดพลังงาน และค่าใช้จ่ายจากการทดสอบทั้งการวิ่งในเมืองและนอกเมืองมากกว่า 2 เท่า เมื่อการคำนวณใช้อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ 4.5 บาทต่อหน่วย และค่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดดีเซล 24.59 บาทต่อลิตร

ตารางที่ ก.4 ผลการเปรียบเทียบอัตราสิ้นเปลือง

เส้นทางรถเดินรถ	รถปีบทอง		รถ PEA-ZeBus	
	ลิตร/กม.	บาท/กม.	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/กม.	บาท/กม.
นอกเมืองมีผู้โดยสาร	0.36	8.75	1.096	4.93
นอกเมืองไม่มีผู้โดยสาร	0.28	6.93	0.678	3.05
ในเมืองมีผู้โดยสาร	0.40	9.84	1.029	4.63
ในเมืองไม่มีผู้โดยสาร	0.32	7.91	0.608	2.74



ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Waiard Saikong & Thanatchai Kulworawanichpong (2014). **Voltage Stability Assessment in DC Railways with Minimum Headway Consideration**, The SIJ Transactions on Computer Networks & Communication Engineering (CNCE), The Standard International Journals (The SIJ), Vol. 2, No. 3, Pp. 25-30.

Waiard Saikong, Chaiyut Sumpavakup and Thanatchai Kulworawanichpong (2019). **SOC Estimation for Traction Battery Pack of Electric Vehicles with Battery Degradation Tracking**, International Journal of Intelligent Engineering and Systems, Vol.12, No.4, 2019, Pp. 81-89.

Waiard Saikong, Chaiyut Sumpavakup and Thanatchai Kulworawanichpong (2019). **Velocity Trajectory Optimization with Time Management in Electric Vehicles**, International Journal of Intelligent Engineering and Systems, Vol.12, No.4, 2019, Pp. 223-232.

Saikong, W., Kulworawanichpong, T. (2017). **Comparative Study of Energy Consumption for Electric Vehicles with Various On-board Energy Storage Systems**. Energy Procedia 2017, 138, 81–86.

Voltage Stability Assessment in DC Railways with Minimum Headway Consideration

Waiard Saikong* & Thanatchai Kulworawanichpong**

*Department, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima, THAILAND 30000. E-Mail: waiards7(at)gmail(dot)com

**School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima, THAILAND 30000. E-Mail: Thanatchai(at)gmail(dot)com

Abstract—Voltage stability assessment is a crucial tool for headway planning in railway system operation. The use of appropriate minimum headway is an important factor that gives the metro system running fast and efficient while the system must have strong voltage stability. In view of the seriousness of this problem, the effective measure of voltage stability assessment should be taken for analyse the effect of train headway in DC railways. This paper describes the impact of minimum headway on voltage collapse of DC mass transit systems. This assessment is based on eigen-value sensitivity analysis of two voltage level systems. The smallest eigen-value is chosen to measure the stability margin of the DC railway mass transit system. As a result, the minimum headway of 3 minutes caused the voltage collapse of the 800 V test system while the 1.5 kV test system is still strong. The simulation result of all case shows that the 1500 V test system is stronger than 800 V.

Keywords—DC Railway, Minimum Headway, Smallest Eigen-Value, Voltage Collapse, Voltage Stability.

I. INTRODUCTION

VOLTAGE instability is a phenomenon which often contributes to the development of power system disturbances. While increasing load power, node voltage decreases dramatically. As a result, voltage collapses with all consequences resulting from it. The problem of voltage stability concerns the whole power systems in both AC and DC sides, although it usually has a large involvement in one critical side of the power system. IEEE defines voltage collapse as the process by which voltage instability leads to loss of voltage in a significant part of the power system [IEEE/CIGRE Joint Task Force Report, 2004]. In DC power systems, analysis of DC voltage collapse differs from that of AC power systems in which reactive power plays the key role of impact to the AC voltage stability. In-DC where the reactive power disappears there must be another approach to pin out the point of voltage collapse. Nowadays, in some countries especially in Asia there is a need for mass transit railways to mobilize their people within metropolitan area [Haque, 2003]. Due to sudden and frequent changes hungrily in power consumption of metro DC railway substation, the relation between train traffic operation and the voltage collapse must be carefully studied.

System analysis within the DC traction power system is vital to the design and operation of an electrified DC railway [Hill, 1994]. The DC traction-power simulators usually

include modelling of the track geometry and traction-system characteristics and permit multi-train operations. By solving the DC power network equations, the simulators give details of electrical interactions among trains at specific time steps over a long span of time and under different traffic conditions. All moving loads in the DC railway power feeding system are assumed to be fixed in position at a specific time given. However, in the real world, the running trains change their position at every second. Hence, a full hour operation of train services is required to investigate the effect of minimum headway on the DC voltage stability.

This paper organizes a total of six sections. Next section, Section 2, illustrates DC railway power supply systems. Section 3 gives the brief of traction performance and train movement simulation. Section 4 presents the eigen-value sensitivity analysis to find the point of voltage collapses in DC railway power systems. Section 5 is the section describing simulation results and discussion. Conclusion remark is in the last section, Section six.

II. DC RAILWAY POWER FLOW CALCULATION

A DC mass transit railway power system is a typical 3rd-rail conductor system. It is complicated as described in figure 1 for its conductor arrangement. To formulate power flow equations, transmission lines and other network components

requires sufficiently accurate modeling. Analysis of DC railway power supply systems is simple and typically based on only nodal analysis [Goodman, 1997]. However, in more accurate model of the DC mass transit system, trains operating in powering mode draw a huge amount of power from the traction substation. It is reasonable to characterize the motoring train as a constant power model. Therefore, the DC railway power feeding systems are non-linear [Lee & Han, 2012; Saikong & Kulworawanichpong, 2014]. There are some simplifications of the DC power network as summarized in figure 2. This equivalent circuit is adequate to calculate voltages across trains and terminal voltage of the substations.

In this paper, only DC power flow methods based on the nodal analysis is determined. According to the Newton-Raphson method [Chong & Zak, 2001; Kulworawanichpong, 2010], the current mismatch equations of node n can be shown in (1) (2) describes the system matrix of the nodal analysis for the DC railway system [Hong, 2007]. It notes that the generator current mentioned above is the currents supplied by the supply sources at the substations which are constant, $J1S$ and $J2S$. The load current is the current drawn by the powering train. It can be expressed mathematically as summarized in (3).

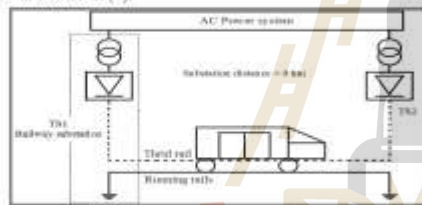


Figure 1: Simplified Railway System Interface

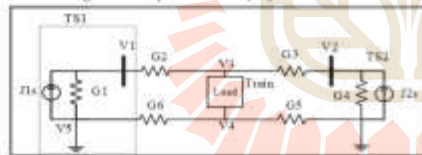


Figure 2: Norton Equivalent Circuit

$$I_{in} - I_{Lo} = \sum_{n=1}^2 G_n (V_i - V_j) \quad (1)$$

Where

I_{G1} is the generator current of node 1

I_{L1} is the load current of node 1

G_n is the conductance between node r and node j

$$\begin{bmatrix} G1+G2 & 0 & -G2 & 0 \\ 0 & G3+G4 & -G3 & 0 \\ -G2 & -G3 & G2+G3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G5+G6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ P1 \\ P2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1s \\ J2s \\ -I_{L1} \\ -I_{L2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$I_{L1} = \frac{P_{train}}{V_1 - V_2} \quad (3)$$

Where P_{train} is the power consumed by the powering train.

III. TRACTION PERFORMANCE CALCULATION

The powering train modelling used the train power consumption from tractive effort force-speed characteristic for propulsion shown in figure.3. The power train consumption by tractive force multiplying with velocity is described in (4).

$$P_{train} = F_t \cdot v \quad (4)$$

Where

P_{train} is train's power consumption

v is train's velocity

F_t is train's tractive effort

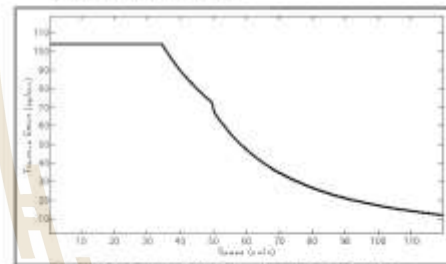


Figure 3: Tractive Effort Characteristic for Propulsion

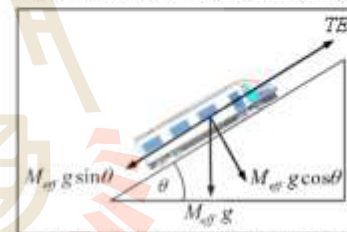


Figure 4: Free-Body Diagram of a Train on a Gradient

Suppose that a train of mass M_{eff} is on a slope making an angle θ to the horizontal as shown in figure 4, where M_{eff} is the effective mass. The train motion is opposed by various forces, e.g. aerodynamic drag, track gradient force, etc. By applying Newton's second law, the train movement equation is expressed in (5), where a is the train acceleration [The Electric Railway Handbook Editorial Committee, 2007].

$$TE - F_{drag} - F_{res} = M_{eff} \cdot a \quad (5)$$

The aerodynamic drag is difficult to predict from calculations, however based on measurements from run-down tests where the natural deceleration of a train on straight, level track on a windless day is measured the drag force can be characterized. Different operators have their own favourite equation to fit the train resistance. The Davis in (6) as is commonly used.

$$F_{drag} = a + bv + cv^2 \quad (6)$$

Where a , b and c are drag-force coefficients and v is the train speed. It is common to use different values for open or tunnel situations [Goodman, 1997; Profillidis, 2006]. To push a heavy train up slopes requires substantial force. The gradient force can be approximated by using (7)

$$F_{grad} = M_{tr} g \sin \theta \quad (7)$$

The friction force is calculated using train resistance [Kulworawanichpong, 2010], show in (8).

$$R_t = R_r + (R_g + R_c + R_b) \quad (8)$$

Where

- R_r is Total of Train resistance (N)
- R_g is Rail Resistance (N)
- R_c is Gradient Resistance
- R_c is Curve Resistance
- R_b is Tunnel Resistance

The rail train resistance is calculated in (9).

$$R_r = (f_o + f_a)W + f_d V^2 \quad (9)$$

Where

- V is train's speed (km/h)
- W is Train mass (ton)
- f_o, f_a are rolling resistance coefficients
- f_d is an aerodynamic drag coefficient

IV. EIGEN-VALUE SENSITIVITY ANALYSIS

The eigen analysis is an approach to measure proximity of Jacobian singularity at loadability limits [Kundur, 1994; Cutsem & Vournas, 1998]. Eigen-value decomposition can be expressed in terms of eigen-values and eigenvectors as

$$A = W \Sigma V^T \quad (10)$$

Where V and W are matrices whose columns are the right and left eigenvector respectively, while Σ is a diagonal matrix whose entries are the eigen-values σ_i ($i=1, \dots, n$) of A . The eigenvectors are such that

$$A v_{\sigma_i} = \sigma_i v_{\sigma_i} \quad (11)$$

$$w_{\sigma_i}^T A = \sigma_i w_{\sigma_i}^T \quad (12)$$

For a singular Jacobian matrix, the smallest eigen-value is zero as follows.

$$A v_{\sigma_i} = 0 \quad (13)$$

$$w_{\sigma_i}^T A = 0 \quad (14)$$

In this paper the smallest eigen-values analysis is provided for study of voltage stability. The network constraints represented by equation (1) may be expressed in following form

$$[AJ] = [J_{PV}] \Delta V \quad (15)$$

Where ΔI incremental change in node current, ΔV is incremental change in node voltage magnitude and $[J_{PV}]$ is the Jacobian matrix. The power flow equations are solved using the Newton-Raphson technique [Pai, 2006; Ajarapu, 2006]. The magnitude of the eigen-values of the Jacobian matrix in equation (15) can provide a relative measure of proximity to instability.

V. SIMULATION RESULTS

This section aims to present the simulation results of different headways and different voltage level to exhibit voltage stability of DC metro railway systems. The test is a DC railway system of 9-km line route having three passenger stops with equal 3-km passenger station spacing. Figure 5 shows the train speed trajectory. Figure 6, 7 and 8 show the sum of train power consumption for this test.

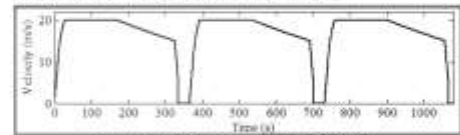


Figure 5: Train Speed Trajectory of the Test

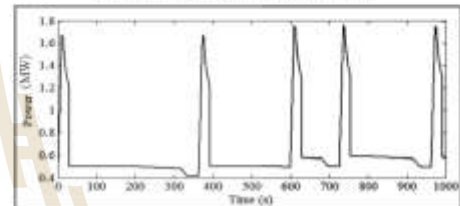


Figure 6: The Sum of Train Power Consumption for 10-Minute Headway

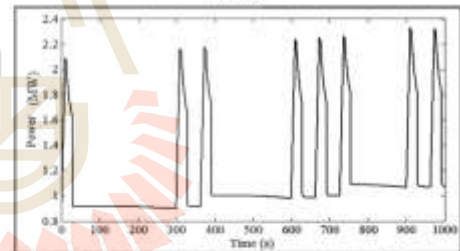


Figure 7: The Sum of Train Power Consumption for 5-Minute Headway

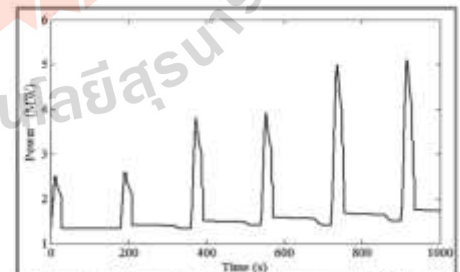


Figure 8: The Sum of Train Power Consumption for 3-Minute Headway

The test is divided into three test case scenarios according to three different headways and two different voltage level test systems. The first test case scenario is the 10-minute headway. The train travel graph generated according to the 10-minute headway is shown in figure 9. To measure the voltage stability of this test case scenario, the smallest eigen-values are computed and collected with respect to time. Figure 10 and 11 show the smallest eigen-value at each time step during the train service of 800 V and 1.5 kV test systems. The minimum smallest eigen-value of this test is 310.43 for 800 V test system and 158.40 for 1.5 kV test systems respectively. This exhibits that the first test case scenario is in the safety zone and the voltage collapse does not occur. The voltage magnitude of the substation terminal 1 of both voltage level test systems are shown in figure 12 and 13 respectively.

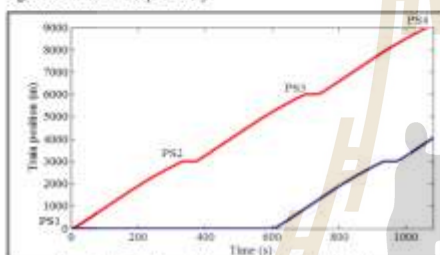


Figure 9: Train Travel Graph for 10-Minute Headway

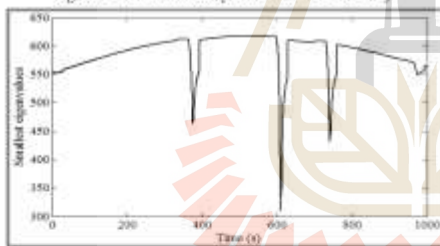


Figure 10: Smallest Eigen-Value of 800 V System for 10-Minute Headway

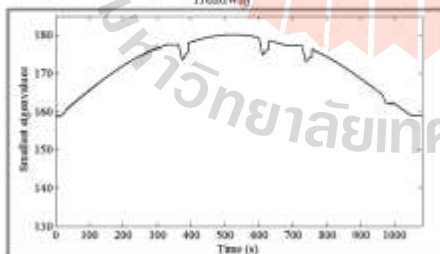


Figure 11: Smallest Eigen-Value of 1.5 kV System for 10-Minute Headway

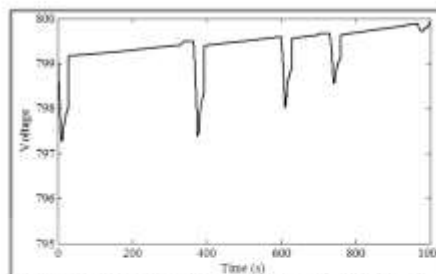


Figure 12: Voltage of 800 V Test System at the Substation Terminal 1 for 10-Minute Headway

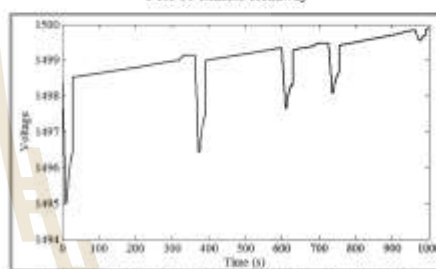


Figure 13: Voltage of 1.5 kV Test System at the Substation Terminal 1 for 10-Minute Headway

The second test case scenario is the 5-minute headway. The train travel graph generated according to the 5-minute headway is shown in figure 14. To measure the voltage stability of this test case scenario, the smallest eigen-values are computed and collected with respect to time. Figure 15 and 16 show the smallest eigen-value at each time step during the train service. The minimum smallest eigen-value of this test is 8.71 for 800 V test system and 158.80 for 1.5 kV test systems respectively. This exhibits that the second test case scenario is still in the safety zone and the voltage collapse does not occur. The voltage magnitude of the substation terminal 1 for this test case scenario is shown in figure 17 and 18.

The third test case scenario (the last case) is the 3-minute headway. The train travel graph generated according to the 3-minute headway is shown in figure 19. To measure the voltage stability of this test case scenario, the smallest eigen-values are computed and collected with respect to time. Figure 20 and 21 show the smallest eigen-value at each time step during the train service. The minimum smallest eigen-value of 800 V test system is 0. This indicates that the last test case scenario is unstable and the voltage collapse does occur, while the minimum smallest eigen-value of 1.5 kV test system is 148.85 that mean the case scenario of 1.5 kV test system is still in the safety zone and the voltage collapse does not occur. The voltage magnitude of the substation terminal 1 for this test case scenario is shown in figure 22 and 23.

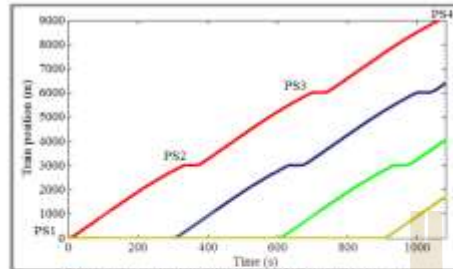


Figure 14: Train Travel Graph for 5-Minute Headway

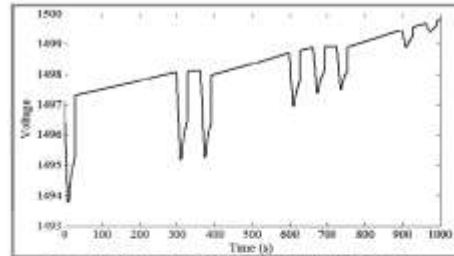


Figure 18: Voltage of 1.5 kV Test System at the Substation Terminal 1 for 5-Minute Headway

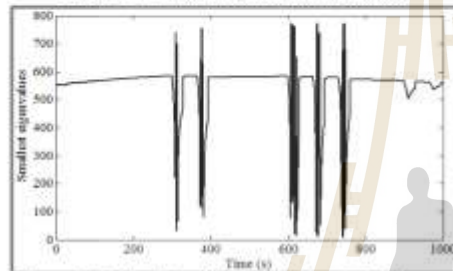


Figure 15: Smallest Eigen-Value of 800 V System for 5-Minute Headway

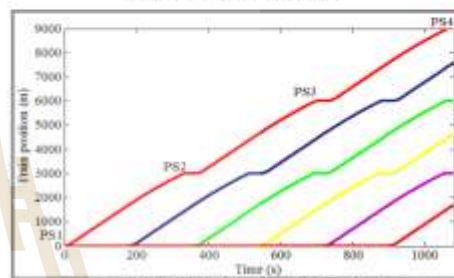


Figure 19: Train Travel Graph for 3-Minute Headway

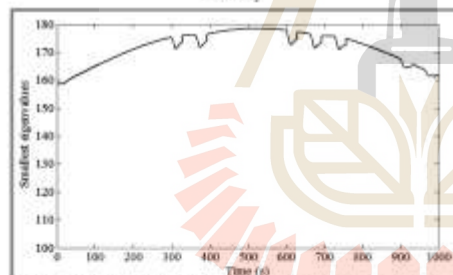


Figure 16: Smallest Eigen-Value of 1.5 kV System for 5-Minute Headway

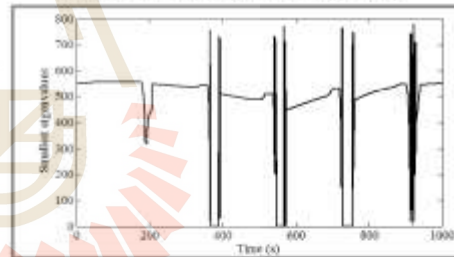


Figure 20: Smallest Eigen-Value of 800 V System for 3-Minute Headway

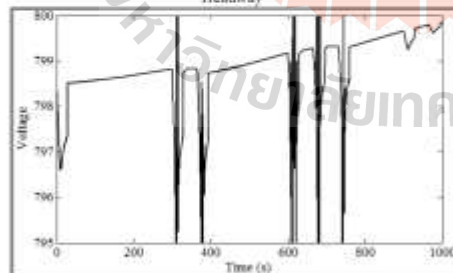


Figure 17: Voltage of 800 V Test System at the Substation Terminal 1 for 5-Minute Headway

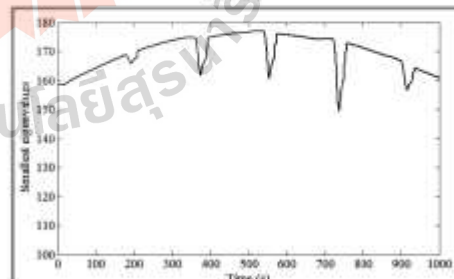


Figure 21: Smallest Eigen-Value of 1.5 kV System for 3-Minute Headway

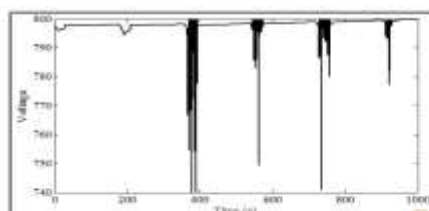


Figure 22: Voltage of 800 V Test System at the Substation Terminal I for 3-Minute Headway

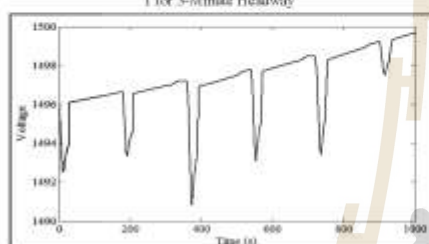


Figure 23: Voltage of 1.5 kV Test System at the Substation Terminal I for 3-Minute Headway

VI. CONCLUSION

This paper describes the method of smallest eigen-value to measure voltage stability of DC metro railway power systems. The eigen-value calculation is based on the Newton-Raphson iterative method to formulate Jacobian matrices. The smallest eigen-value as mentioned is the eigen-value of these Jacobian matrices. A DC metro railway system of 9-km line route having three passenger stops with equal 3-km passenger station spacing is employed for test. According to the simulation results, as smallest eigen-values, voltage stability is reduced when the headway decline. As a result of all test case scenarios, the trends in all cases are similar but the 1500 V test system is stronger than 800 V and the minimum headway of 800 V test system for 3 minutes is the case that causes the system voltage collapse. Because of the power loss in high voltage system is less than the low voltage when used same load.

ACKNOWLEDGMENT

We would like to express our sincere gratitude to the Energy Planning and Policy Office (EPPO), Ministry of Energy, Thailand, through the research grant given to Waiward Saikong and Thanatchai Kulworawanchpong.

REFERENCES

- [1] P. Kundur (1994), "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Book Company, New York.
- [2] R.J. Hill (1994), "Electric Railway Traction – Part 3 Traction Power Supplies", *Power Engineering Journal*, Pp. 275–286.

- [3] C.J. Goodman (1997), "Train Performance and Simulation", *Fourth Focallon School on Electric Traction Systems*, EE Power Division.
- [4] T.V. Cutsem & C. Vournas (1998), "Voltage Stability of Electric Power Systems", *Kluwer*.
- [5] E.K.P. Chong & S.H. Zak (2001), "An Introduction to Optimization", *John Wiley & Sons, Inc.*, Second Edition.
- [6] M.H. Haque (2003), "Novel Method of Assessing Voltage Stability of a Power System using Stability Boundary in P-Q Plane", *Electric Power Systems Research*, Vol. 64.
- [7] IEEE/CIGRE Joint Task Force Report (2004), "Definition and Classification of Power System Stability", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 2.
- [8] M.A. Pii (2006), "Computer Techniques in Power System Analysis", *Tata Mc-Graw-Hill*, Second Edition.
- [9] V.A. Profillidis (2006), "Railway Management and Engineering", *Archgate Publishing Limited*, Third Edition.
- [10] V. Ajajumpu (2006), "Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control", *Springer Science*.
- [11] D. Hong (2007), "Development of a Mathematical Model of a Train in the Energy Point of View", *International Conference on Control, Automation and Systems*, COEX, Seoul, Korea.
- [12] The Electric Railway Handbook Editorial Committee (2007), "The Electric Railway Handbook", *Corona Publishing Co. Ltd.*
- [13] T. Kulworawanchpong (2010), "Simplified Newton-Raphson Power Flow Solution", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 32, Pp. 551–558.
- [14] S. Lee & S. Han (2012), "The Study of Train Power Energy Saver Control System on High Speed Tilting Train", *International Conference on Control, Automation and Systems*, ICC, Jeju Island, Korea.
- [15] W. Saikong & T. Kulworawanchpong (2014), "The Effect of Train Headway on Voltage Stability in DC Railways", *International Symposium on Fundamental and Applied Sciences*, Tokyo, Japan.



Waiward Saikong, He received B.Eng. and M.Eng. in Electrical Engineering from Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand in 2006 and 2011, respectively. In 2013, he joined the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, as a Ph.D. student. His current research interests include a power system analysis, optimization techniques, stability, electric railway and power system simulation.



Thanatchai Kulworawanchpong, He is an associate professor of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. He received B.Eng. with first-class honour in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand (1997), M.Eng. in Electrical Engineering from Chulalongkorn University, Thailand (1999), and Ph.D. in Electronic and Electrical Engineering from the University of Birmingham, United Kingdom (2003). Fields of research interest include a broad range of electrical power systems; railway electrification, traction system and electric vehicle, power electronic, electrical drives and control, optimization and artificial intelligent techniques. He has joined the school since June 1998 and is currently a leader in Electric Transportation Research and Electrical Power System, Suranaree University of Technology, to supervise and co-supervise over 15 postgraduate students.



SOC Estimation for Traction Battery Pack of Electric Vehicles with Battery Degradation Tracking

Waiard Saikong¹ Chaiyut Sumpavakup² Thanatchai Kulworawanichpong^{1*}

¹*School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*

²*Research Centre for Combustion Technology and Alternative Energy – CTAE
College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok,
Bangkok 10800, Thailand*

* Corresponding author's Email: thanatchai@gmail.com

Abstract: In the electric vehicle industry, a good estimation of a traction battery pack or the state of charge (SOC) is crucial as it reflects how far a vehicle travel before recharging. As the battery degrades, its behavior and the associated parameters such as internal resistance, capacity and SOC-OCV (open circuit voltage) mapping changes. Thus, a battery model has to take into account the changes in the battery parameters for it to be accurate throughout the battery lifetime. For such a model to be computational intensive, it requires powerful processors. With limited calculation performance processors found in vehicles, the model fidelity is normally compromised. In this paper, two battery models are used to accurately estimate traction battery SOC. The Ohmic resistance model is used to sense changes in battery internal resistance, when the change is significant, the resistor-capacitor (RC) model is used to update the battery SOC-OCV curve which is used to estimate the battery initial SOC. Hence, the coulomb counting method is used to update the battery SOC. The real operational battery data from PEA Ze-Bus (Zero-Emission bus of the Provincial Electricity Authority of Thailand) are used in this study. The proposed algorithm used to test the state of charge of the battery has been verified and illustrates the error of SOC estimation at 3.31%, less than the unadaptable model.

Keywords: Electric vehicle, Traction battery pack modelling, Battery parameter estimation, Online parameter tracking, SOC estimation algorithm.

1. Introduction

Nowadays, electric vehicles are gaining in popularity due to environmental and fuel security concerns [1-4]. Lithium-ion based battery is currently an energy storage device that features properties to meet requirements for electric vehicles, specifically, high energy and power densities, high coulombic efficiency, and low cycle cost. To describe the behavior of a traction battery, a variety of battery models have been proposed in the field of research in the past decade [5-10]. For equivalent circuit battery model, as the model becomes more complex (more components added into it) the fidelity of the model tends to increase, this can be appropriate for simulation works. However, when the model has to

be implemented to an embedded system for practical use, a challenge usually arises due to limited calculation performance of the hardware [11]. Thus, for a battery model to be implemented on limited performance calculation hardware for real time parameter estimation, its fidelity is always compromised.

A battery model that is accurate and reliable throughout the battery lifetime is very important in electric vehicles (EVs), to accurately estimate and update battery parameters responding to a unique EV intermittent load, a function of route and driving profiles. Electric vehicles users may find themselves stranded along the road just because the estimated battery state of charge (SOC) was far above the actual SOC. Generally, manufacturers acquire parameters of a battery cell by charge and discharge impulse

Received: January 16, 2019

82

testing, cell capacity is acquired by various levels of constant current discharging under given temperature [6].

Despite a practical EV load being far from the constant current, battery cells are connected in series and/or parallel depending on the application and controlled by a battery management system (BMS). Parameters of an entire EV battery system may not be accurately reflected by a single battery cell. Moreover, when a battery has been cycled a number of times over the course, its behavior and consequently its parameters will change. Obviously then, it is necessary to update or recalculate the battery parameters throughout its lifetime, in order to accurately estimate a crucial parameter or the SOC. Battery SOC reflects how much energy is in the battery and consequently how far a vehicle can go before recharging [12].

Battery SOC cannot be measured directly, the well-known methods in current research used to estimate SOC are the coulomb counting technique and SOC-OCV correlation (the hysteresis curve), which is normally scaled up from a battery cell level. Battery pack SOC depends on various factors such as self-discharge, charge and discharge current rate, number of charging cycle and the BMS parameter configuration [13, 14]. In this paper a novel SOC estimation method is proposed using only two measured parameters, current and voltage. The proposed method uses two battery equivalent circuits, the ohmic resistance equivalent circuit and resistor-capacitor (RC) equivalent circuit. Using the battery current and terminal voltage, the ohmic resistance equivalent circuit model estimates battery internal resistance and tracks its changes, once the change in estimated, internal resistance will then be significant, a request is sent to the RC equivalent circuit to update the SOC-OCV curve. The up to date SOC-OCV curve is used to estimate battery's initial SOC. Data from PEA Ze-Bus (Zero-Emission bus of the Provincial Electricity Authority of Thailand) are applied in this study. Prior to the selection of using the RC model to update SOC-OCV curve, a comparison between ohmic resistance model and RC model are done to establish the fidelity of the RC model.

The rest of the paper is organized as followed, the battery parameter estimation is presented in Section 2. Section 3 presents specifications of the test vehicle, field data, and proposed algorithm. The results and discussion are then presented in Section 4. Finally, the conclusion is presented in Section 5.

2. Battery parameter estimation

2.1 Ohmic resistance battery model

The ohmic resistance battery model [14] as shown in Fig. 1, can be used to roughly estimate the battery's internal resistance (R_0) and open circuit voltage (OCV) given terminal voltage (V_T) and terminal current (I_T) which can be directly measured. The parameters for using in battery modelling are shown in Table 1.

From the equivalent circuit in Fig. 1, Eqs. (1) – (3) are developed.

$$V_{OC} - I_T R_0 = V_T \quad (1)$$

From a system of linear equations,

$$A_k \hat{x}_k = b_k \quad (2)$$

Table 1. Battery modelling parameters

Notation	Definition
V_{OC}	Open circuit voltage
R_0	Internal resistance
V_T	Terminal voltage
I_T	Terminal current
A	State matrix (for eq.7)
B	Input matrix (for eq.7)
C	Output matrix (for eq.8)
D	Feedforward matrix (for eq.8)
$OCV(SOC)$	Open circuit voltage as a function of state of charge
C_1	Capacitance of RC model
R_1	Resistance of RC model
k	The experimental data are collected up to time k
N, n	Natural number
T	Sampling period
I	Identity matrix
SOC_{OCV}	SOC is estimated by the SOC-OCV curve
SOC_{Ah}	SOC is estimated by the coulomb counting technique
A_d	State matrix in discretized form
B_d	Input matrix in discretized form

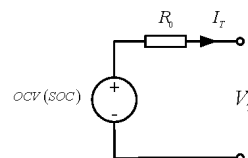


Figure.1 Battery ohmic resistance model

Received: January 16, 2019

83

Eq. (1) can be written in the form of Eq. (2)

$$\text{then, } \begin{bmatrix} 1 & -I_{T,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{OC} \\ R_0 \end{bmatrix} = V_{T,k} \quad (3)$$

Open circuit voltage (V_{OC}) and R_0 are then estimated by recursive least-square estimation (RLSE). Since the Eq. (3) is not computational intensive, V_{OC} and R_0 estimation can be done in real-time. The RLSE algorithm adds a new correction term and recalculates V_{OC} and R_0 based on new data. Consequently, this algorithm is appropriate to track changes in parameters over a time application condition. The load current ($I_{T,k}$) and the battery terminal voltage ($V_{T,k}$) are acquired from real-time measurement. Eq. (2) is then modified as shown in Eq. (4) when the new data arrives.

$$A_{k+1} \hat{x}_{k+1} \approx b_{k+1}, \quad (4)$$

where,

$$A_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & -I_{T,k} \\ 1 & -I_{T,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_k \\ a_{k+1}^T \end{bmatrix}$$

$$\hat{x}_{k+1} = \begin{bmatrix} V_{OC,k+1} \\ R_{0,k+1} \end{bmatrix}, \quad b_{k+1} = \begin{bmatrix} V_{T,k} \\ V_{T,k+1} \end{bmatrix}$$

the least-squares error is applied to the new data as presented in Eq. (5).

$$\hat{x}_{k+1} = [A_{k+1}^T \ A_{k+1}]^{-1} A_{k+1}^T b_{k+1}, \quad (5)$$

with, $G_{k+1} = [A_{k+1}^T \ A_{k+1}]^{-1}$

Which uses the recursive form from the reference that can be written as shown in Eq. (6) [15-16].

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + G_{k+1} a_{k+1} (V_{T,k+1} - a_{k+1}^T \hat{x}_k), \quad (6)$$

2.2 RC circuit model

The resistor-capacitor (R-C) battery model [6, 17] shown in Fig. 2 adds a resistor in parallel with a capacitor to the ohmic model in Fig. 1 to capture the polarization effect of lithium-ion battery [18].

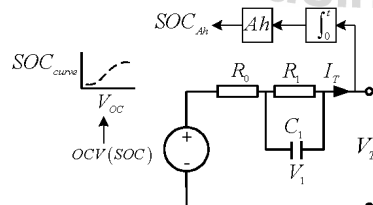


Figure.2 RC equivalent circuit model

From Fig. 2, state space equation can be written as follows.

$$\dot{x} = Ax + BI_T, \quad (7)$$

$$V = Cx + DI_T, \quad (8)$$

where, $\dot{V}_1 = \frac{-V_1}{C_1 R_1} + \frac{I_T}{C_1}$, $V = -I_T R_0 - V_1$,

and $V = V_T - V_{OC}$

The discretization formula is applied to the continuous-time state Eqs. (7) and (8) with the sampling period T to decrease the calculation time [15] when using offline. The SQP (sequential quadratic programming) heuristic process algorithm, can be illustrated according to the following Eq. (9). The state of charge is calculated based on the current integration as described in Fig. 2.

$$x[n + 1] = A_d x[n] + B_d I_T[n] \quad (9)$$

where the discretized matrices are

$$A_d = I + AT\Psi$$

$$B_d = \Psi TB$$

where,

$$\Psi \cong I + \frac{-T}{2R_1 C_1} \times \dots$$

$$\left\{ I + \frac{-T}{3R_1 C_1} \left\{ I + \dots + \frac{-T}{(N-1)R_1 C_1} \left(I + \frac{-T}{NR_1 C_1} \right) \dots \right\} \right\}$$

for $N > 1$, where N is a natural number

3. Test vehicle, field data and proposed method

To accurately estimate the battery SOC, a battery model may be improved and corrected by adding more parameters [2,7,19-20]. Adding more parameters increases the complexity of the model. On the other hand, the battery modelling using battery pack data are more accurate than those using cell data, as the battery pack includes electrical topology and BMS effects. Using BMS, the SOC always depends on the weakest cell in the battery system.

3.1 Test vehicle

A provincial electricity authority electric zero

Received: January 16, 2019

84

Table 2. PEA-Zebus Technical Data

Specific data	Information	
<i>Size and weight</i>		
Dimension (w × l × h) (m)	2.55 × 12 × 2.96	
Tare mass (kg)	12,400	
<i>Traction motor</i>		
Motor technology	2 asynchronous hub motors, 3 phases	
Rated voltage (V)	650	
Motor power (kW)	Max.	2 × 125
	Cont.	2 × 60
Output torque max. (Nm)	2 × 10,500	
<i>Battery System</i>		
Battery type	Lithium-ion	
Battery capacity (kWh)	196 (320 Ah)	
Rated voltage (V)	650	
Max. current discharge (A)	350	
<i>Performance</i>		
Passenger seat	43	
Climbing ability (%)	26.8	
Max. speed (km/h)	90	
Max. range (km)	150 (with full load and air-condition)	



Figure 3 PEA-Zebus running test

emission bus (PEA-Zebus), developed by Suranaree University of Technology (SUT), Thailand is used as a test vehicle as shown in Fig. 3. The specifications of the bus are as given in Table 2.

3.2 Field data collection

The overview of the test and data collection procedure is shown in Fig. 4. The bus was driven for 1,000 km around the Suranaree University of Technology (SUT) route as shown in Fig. 5 and Data set 1 was collected during the first 143.8 km test drive and Data set 2 was collected during the last 159.1 km test drive, both starting with a fully charged battery

(100% SOC). Data set 3 was collected during a 16.17 km test drive on an extra-urban route after the bus had been in use (driven) for a certain amount of time. The initial battery's SOC for Data set 3 is to be estimated as aforementioned and then the SOC is to be updated using coulomb counting. The total time and amp-hour (Ah) consumption for Data set 3 is 925 seconds and 17.23 Ah, respectively. The energy needed to recharge the battery to be fully charged will be used to validate the initial SOC estimation for Data set 3. For all the Data sets, they were recorded after every 1 second via CAN (Control Area Network) bus as shown in Fig. 6. A one-second sampling time is considered suitable for the Battery Management System [14].

Three data sets were collected, Data set 1 and Data set 2 comprises of battery terminal voltage, battery discharge current and battery SOC as shown in Fig. 7 and 8 respectively, while Data set 3 comprises of only battery terminal voltage and battery discharge current, while the battery SOC is to be estimated. For Data set 1 and Data set 2, the battery's initial SOC is 100%, and the final SOC is 34.4 % and 28.8% respectively. The SOC data is updated by Coulomb (amp-hour) Counting.

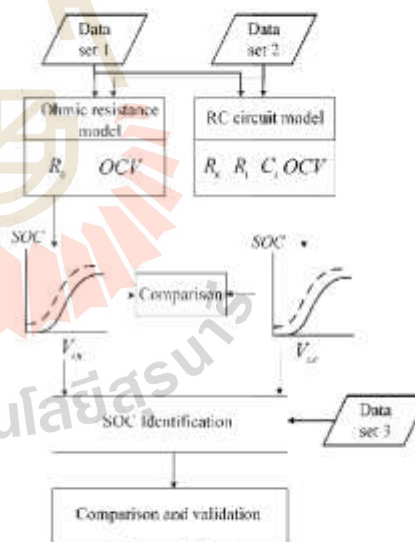


Figure 4 Test procedure



Figure.5 Test route for Data set 1 and Data set 2

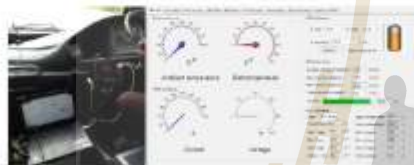


Figure.6 Data measuring and logging via CAN bus

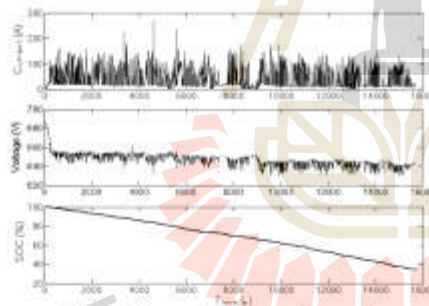


Figure.7 Measured parameters, Data set 1

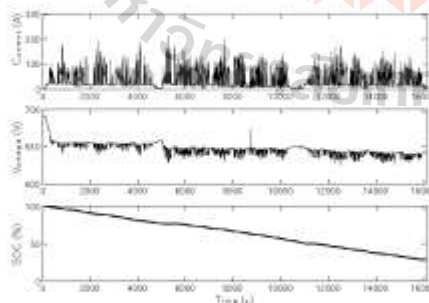


Figure.8 Measured parameters, Data set 2

Open circuit voltage polynomial curve fitting is done for ohmic resistance model and RC circuit model; The polynomial functions for Data set 1 (ohmic resistance model), Data set 1 (RC circuit model), Data set 2 (ohmic resistance model) and Data set 2 (RC circuit model) are presented as shown in Eqs. (10) – (13), respectively. The curves are then used to estimate the initial battery SOC.

$$SOC_{Ohm,data1} = -1.26 \times 10^{-4}(V_{oc}^4) + 0.34(V_{oc}^3) - \dots - 3.48 \times 10^2(V_{oc}^2) + 1.57 \times 10^5(V_{oc}) - \dots - 2.67 \times 10^7 \quad (10)$$

$$SOC_{RC,data1} = 4.34 \times 10^{-9}(V_{oc}^4) - 1.14(V_{oc}^3) - \dots - 1.13 \times 10^2(V_{oc}^2) - 4.97 \times 10^3(V_{oc}) - \dots - 8.91 \times 10^7 \quad (11)$$

$$SOC_{Ohm,data2} = -1.18 \times 10^{-4}(V_{oc}^4) + 0.32(V_{oc}^3) - \dots - 3.27 \times 10^2(V_{oc}^2) + 1.48 \times 10^5(V_{oc}) - \dots - 2.5 \times 10^7 \quad (12)$$

$$SOC_{RC,data2} = 3.88 \times 10^{-2}(V_{oc}^3) - 7.79(V_{oc}^2) - \dots - 5.21 \times 10^4(V_{oc}) - 1.16 \times 10^6 \quad (13)$$

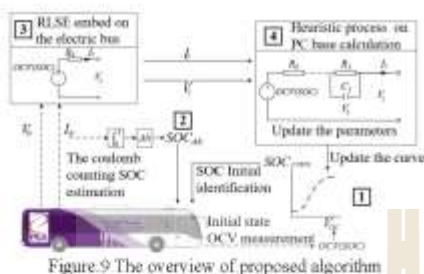
3.3 Proposed SOC estimation algorithm

The proposed method uses two battery equivalent circuit models; the ohmic resistance equivalent circuit model and RC equivalent circuit model as shown in Fig. 1 and Fig. 2 respectively. The RC equivalent circuit model has higher accuracy than the ohmic resistance equivalent circuit model which can be seen from the estimated battery terminal voltage from the two models compared to the actual measurement. Thus, the RC equivalent circuit model is used to update the SOC-OCV curve while the ohmic resistance equivalent circuit model is used to track changes in battery internal resistance. Data set 1 and Data set 2 are used to identify battery parameters and the SOC-OCV curve. The RLSE algorithm is used online (real-time) with the Ohmic Resistance Model to track the ohmic resistance. The high accuracy RC equivalent circuit model uses the SQP heuristic process to update the SOC-OCV curve offline.

Using the battery current and terminal voltage, the ohmic resistance equivalent circuit model estimates the battery internal resistance and tracks its changes as shown in third stage of Fig. 9, once the change in the estimated internal resistance is significant, a request is sent to the high accuracy RC equivalent circuit to update the SOC-OCV curve as shown in the fourth stage in Fig. 9. The SOC-OCV curve is updated offline using the battery terminal voltage and

Received: January 16, 2019

86



current data of the latest discharging cycle. The up-to-date SOC-OCV curve is used to estimate the battery's initial SOC as shown in the first stage of Fig. 9.

First, before any load is connected to the traction battery, the traction battery SOC is estimated by a directly measured voltage from the battery terminals using the SOC-OCV curve as shown in first stage. Since no load is connected beforehand, the initial measured voltage is the OCV. Using the SOC-OCV relationship in the primary stage, this eliminates the need to add for a compensated term for a self-discharge effect in the battery model. Therefore, the unknown parameters of the model are reduced. At the next stage in the algorithm processes. After the load is connected. The coulomb counting method is used to update the battery SOC by continuously integrating battery discharge currents dictated by the bus's intermittent load as shown in the second stage. The final SOC coulomb counting is then stored and estimated, where the initial battery SOC is validated by energy, needed to fully charge the battery. After that, using the battery current and terminal voltage, the ohmic resistance equivalent circuit model estimates the battery internal resistance and tracks its changes as shown in third stage, once the change in the estimated internal resistance is significant, a request is sent to the high accuracy RC equivalent circuit to update the SOC-OCV curve as shown in the fourth stage. Finally, The SOC-OCV curve is updated offline using the battery terminal voltage and current data of the latest discharging cycle. The up-to-date SOC-OCV curve is used to estimate the battery's initial SOC as shown in the first stage.

4. Results and discussion

The comparison between the estimated battery pack terminal voltage from two battery models (ohmic resistance model and RC model) and the actual battery pack voltage is presented in this section. This is done to demonstrate the accuracy of the RC battery model. The estimated battery pack SOC uses

the proposed method which has been presented and validated.

4.1 Battery models comparison

Battery pack terminal voltage from the two battery models are compared with the actual field measured voltage in Fig. 10, Fig. 11, and Fig. 12 using Data set 1, Data set 2, and Data set 3, respectively. All figures illustrate the same pattern; the battery terminal voltage decreases slightly with time. However, as it can be seen clearly, the estimated battery terminal voltage from the ohmic resistance model does not match with the measured voltage especially at the beginning of the test and when the voltage suddenly changes. In contrast, the estimated battery terminal voltage from the RC equivalent circuit model matches with the measured voltage throughout the test period. As presented in Table 3, the mean square error (MSE) from all RC equivalent circuit model is smaller than that of the ohmic resistance equivalent circuit model. Therefore, the RC equivalent circuit model has a higher accuracy than the ohmic resistance model and this is the reason it was used to update SOC-OCV solution as aforementioned.

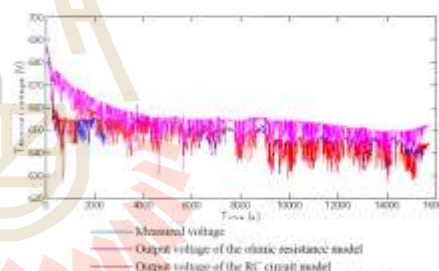


Figure 10 Battery terminal voltage comparison from Data set 1

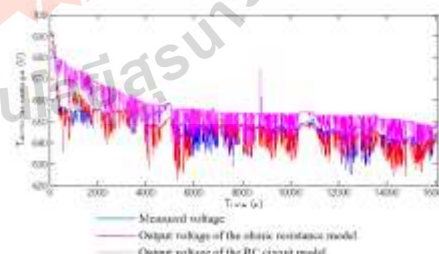


Figure 11 Battery terminal voltage comparison from Data set 2

Received: January 16, 2019

87

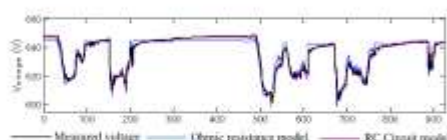


Figure 12 Battery terminal voltage comparison from Data set 3

Table 3. Estimated parameters for all data sets

Data set	Model	Estimated parameter				MSE
		R_o	OCV	R_i	C_i	
1	ohmic	0.09	650.63	-	-	64.07
	RC	0.08	644.57	0.069	149.83	10.13
2	ohmic	0.12	650.90	-	-	83.26
	RC	0.08	642.75	0.068	149.09	12.60
3	ohmic	0.13	645.09	-	-	11.62
	RC	0.10	647.34	0.059	438.61	03.73

4.2 SOC estimation and validation

From Data set 3 in Fig. 13, The voltage and current presented, are measured directly. The initial SOC is estimated using SOC-OCV curve and then the SOC is updated using coulomb counting as presented. During the current (discharge current) inrush, due to the vehicle acceleration or hill climbing, the battery's terminal voltage falls dramatically and the Amps-hour (Ah) count increases considerably. When the current drops sharply to a steady low current state, the voltage rapidly rises and then gradually increases with hysteresis voltage, the Ah count slightly increases.

Fig. 14 shows the estimated battery parameters using ohmic resistance model and RC model. Similarly to Data set 1 and Data set 2, the estimated R_o using ohmic resistance model has minimal fluctuation at the beginning and decreases to a stable value which is around 0.127 Ohms. The RC equivalent circuit model gives only one ohmic resistance which is 0.401 Ohms (R_i and C_i of the RC equivalent circuit model are shown in the Table 3). The OCV from both models are fairly constant.

As mentioned previously, the initial SOC is estimated using directly initial measured battery terminal voltage (no loads voltage) and the SOC-OCV curve. From Data set 3, the initial no load voltage (open circuit voltage) was 648.08 V. This voltage is substituted in the up-to-date polynomial curve fitting to estimate the initial SOC, and in this case the initial SOC was 56.70 %. Knowing the battery capacity (320 Ah) and having established the initial SOC, coulomb method is used to update the SOC, in this case the final SOC was 51.31 % as presented in Table 4 (The RC model of Data 2 or the

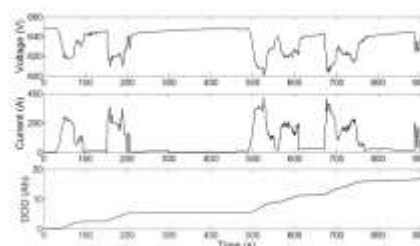


Figure 13 Data set 3 from proposed algorithm

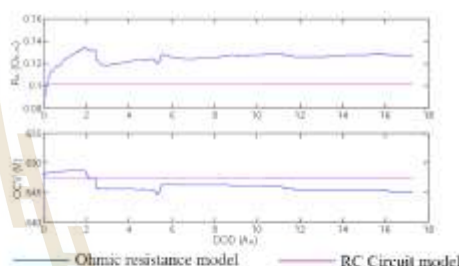


Figure 14 Battery pack estimated parameters from Data set 3

Table 4. Estimated SOC

Data set	Model	Estimated initial SOC using Data set 3 (%)	Estimated final SOC using Data set 3 (%)	Error (%)
1	Ohmic	3.43	N/A	N/A
	RC	50.65	45.26	9.36
2	Ohmic	N/A	N/A	N/A
	Purposed algorithm	56.70	51.31	3.31

proposed algorithm), the coulomb count was 17.23 Ah. The Amps hours needed to fully charge the battery pack is used to validate the final estimated battery SOC, thus indirectly validating the initial estimated SOC. In this case the Ah needed to fully charge the battery pack was 145.2Ah (recorded from battery charger), the estimation of SOC error is also presented in Table 4.

In order to comprehend the estimation of SOC, if Data set 1 and the ohmic resistance model were to be used to create a SOC-OCV curve and estimate an initial battery pack SOC, whereas Table 4 also presents the estimated SOC and percentage error using Data set 1, and ohmic resistance model. By using Data set 1 and ohmic resistance model, the initial battery pack SOC (3.43 %) is estimated by using Eq. (10), resulting in the final SOC as negative considered as an invalid result. For Data set 2, the

Received: January 16, 2019

88

initial SOC from the ohmic resistance model is negative, estimated using Eq. (12). Thus, both the initial and final SOC are invalid. Using Data set 1 and RC model, initial SOC is estimated using Eq. (11). The initial SOC, final SOC and mean square error are 50.65 %, 45.26 % and 9.36 %, respectively. The error is higher than that from Data set 2.

5. Conclusion

An accurate battery pack state of charge (SOC) estimation is crucial for an electric vehicle as it reflects how long a vehicle can travel before recharging. Battery parameters change as a battery degrades and a battery model is required to take the changes into account for accuracy throughout battery lifetime. Such model is computational intensive, with limited processing performance hardware found in vehicles. A battery model's fidelity is usually compromised. This paper provides research on the use of two battery models in order to accurately estimate traction battery SOC. The ohmic resistance model is used to track changes in battery internal resistance, when the change is significant a request is sent to update battery SOC-OCV curve using resistor-capacitor (RC) model. The up-to-date SOC-OCV curve is used to estimate battery initial SOC. Hence, coulomb counting is used to update the SOC. Using the provided field data from the PEA Ze-Bus (Zero-Emission bus of the Provincial Electricity Authority of Thailand) In conclusion, the proposed model is validated, since the SOC estimation error was less significant (3.31%). It is also evident that the RC model has higher accuracy than the ohmic resistance model, and latest Data set provides a more accurate SOC-OCV curve than the prior data. Hence, resulting in the reason the proposed algorithm can be applied to update the SOC-OCV curve to reduce the state of charge estimation error.

For future research, the proposed algorithm will implement on embedded hardware in the electric bus. After that, further research will also focus on investigating the difference between the highly intermittent load of the urban route and using the highly constant velocity of the extra-urban route that effects on battery pack capacity and SOC identification.

References

- [1] J. Shen, S. Dusmez, and A. Khaligh, "An advanced electro-thermal cycle-lifetime estimation model for LiFePO₄ batteries", In: *Proc. of IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*, pp.1-6, 2013.
- [2] Z. Zhang, "Modeling a lithium-ion battery based on a threshold model", In: *Proc. of Int. Conf. Advanced Mechatronic Systems*, pp.301-305, 2015.
- [3] H. Miyamoto, M. Morimoto, and K. Morita, "On-line SOC Estimation of Battery for Wireless Tram Car. In: *Proc. of 7th Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems*, pp.1624-1627, 2007.
- [4] W. Saikong and T. Kulworawanichpong, "Comparative Study of Energy Consumption for Electric Vehicles with Various On-board Energy Storage Systems", *Energy Procedia*, Vol.138, pp.81-86, 2017.
- [5] A. Ramamurthy, S. Notani, and S. Bhattacharya, "Advanced lithium ion battery modeling and power stage integration technique", In: *Proc. of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp.1485-1492, 2010.
- [6] T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri, and R. Jackey, "High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells", In: *Proc. of IEEE International Electric Vehicle Conference*, pp.1-8, 2012.
- [7] R. Jackey, M. Saginaw, P. Sanghvi, J. Gazzarri, T. Huria, and M. Ceraolo, *Battery Model Parameter Estimation Using a Layered Technique: An Example Using a Lithium Iron Phosphate Cell*, SAE Technical Paper 2013-01-1547, 2013.
- [8] D. Danilov and PHL. Notten, "Adaptive Battery Management Systems for the new generation of Electrical Vehicles", In: *Proc. of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp.317-320, 2009.
- [9] DD. Patel, S. Sharma, and ZM. Salameh, "Electric vehicle grade lithium polymer battery model using PSCAD", In: *Proc. of IEEE PES General Meeting Conference and Exposition*, pp.1-5, 2014.
- [10] B. Xu, A. Oudalov, A. Ulbig, G. Andersson, and D. Kirschen, "Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.9, No.2, pp.1131-1140, 2018.
- [11] J. Gazzarri, N. Shrivastava, R. Jackey, and C. Borghesani, "Battery Pack Modeling, Simulation, and Deployment on a Multicore Real Time Target", *SAE International Journal of Aerospace*, Vol.7, No.2, pp.207-213, 2014.
- [12] J. Wu, C. Zhang, and Z. Chen, "A novel lithium-ion battery model for state of charge estimation under dynamic currents", In: *Proc. of 4th Int. Conf. Electric Power and Energy Conversion*

Received: January 16, 2019

89

- Systems*, Sharjah, United Arab Emirates, pp.1-6, 2015.
- [13] S. Zechang, W. Xuezhe, and D. Haifeng, "Battery management systems in the China-made "Start" series FCHVs", In: *Proc. of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp.1-6, 2008.
- [14] D. Andrea, *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Artech house Norwood, MA, 2010.
- [15] WY. Yang, WW. Cao, TS. Chung, and J. Morris, *Applied numerical methods using MATLAB*. John Wiley & Sons Inc. Publication, New Jersey, 2015.
- [16] EKP. Ching and SH. Zak, *An introduction to optimization second edition*, John Wiley & Sons Inc. Publication, Canada, 2001.
- [17] J. Jaguemont, L. Boulon, and Y. Dubé, "Characterization and Modeling of a Hybrid-Electric-Vehicle Lithium-Ion Battery Pack at Low Temperatures", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.65, No.1, pp.1-14, 2016.
- [18] N. Watrin, R. Roche, H. Ostermann, B. Blunier, and A. Miraoui, "Multiphysical Lithium-Based Battery Model for Use in State-of-Charge Determination", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.61, No.8, pp.3420-3429, 2012.
- [19] T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri, and R. Jackey, *Simplified Extended Kalman Filter Observer for SOC Estimation of Commercial Power-Oriented LFP Lithium Battery Cells*, SAE Technical Paper 2013-01-1544, 2013.
- [20] H. Rahimi-Eichi, B. Balagopal, MY. Chow, and TJ. Yeo, "Sensitivity analysis of lithium-ion battery model to battery parameters", In: *Proc. of 39th Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Society*, pp.6794-6799, 2013.



Velocity Trajectory Optimization with Time Management in Electric Vehicles

Waiard Saikong¹ Chaiyut Sumpavakup² Thanatchai Kulworawanichpong^{1*}

¹*School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*

²*Research Centre for Combustion Technology and Alternative Energy – CTAE,
College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800,
Thailand*

* Corresponding author's Email: thanatchai@gmail.com

Abstract: An electric vehicle is one of the crucial technologies for transportation of passengers and goods to reduce the consumption of fossil fuel which is the main factor of air pollution. Currently, energy and power density of batteries are low when compared to fossil fuel, having an effect that electric vehicles have limited driving range. As a result, simulating velocity trajectory for optimal energy consumption for electric vehicle is necessary. This paper introduced the algorithm to determine optimal velocity trajectory or velocity profile to consume the least energy in the required cycle with the condition that the optimal velocity had to be similar to the profile of the reference velocity or the original velocity so that it was capable of driving in the traffic circumstance of the sample cycles. To find the optimal velocity with the least energy consumption, the simple vehicle model and mathematic approach to simulate optimal vehicle trajectory by particles swarm optimization (PSO) were used in this study. The route used in the study were divided into elementary driving cycles. The algorithm will simulate the acceleration and create the optimal velocity trajectory of each segment to find the trajectory that consumed the least energy regarding the condition of driving time determined by user. The result of the simulation found that the algorithm reduced the consumption of energy and maximum electric power with significance. That were 13.44% and 14.225% respectively when the electric vehicle was determined to arrive at the destination by 1 minute late.

Keywords: Electric vehicles simulation, Vehicle trajectory, Energy consumption, Optimization.

1. Introduction

Nowadays, fossil fuel is still the main fuel in transportation to freely transport goods and passengers for economic and social development. Generally, the world consumption of fuel is approximately 85 million barrels per day and 60% is used in transportation. All round the world, there are approximately 800 million private cars [1] and the number is increasing. In 2009, China is the biggest manufacturer and the biggest car market of the world leaving USA behind by manufacturing 13.79 million cars in the year and the trend of the supply and demand is rapidly rising every year. The aforementioned report indicates that transportation also has demand to consume more fuel which is limited resource. There will also be pollution

emission from combustion leading to change of atmosphere and pollution in city [2] which are critical environmental problems. To solve the problem, it is suggested to use energy from other source or use energies from various sources for sustainable consumption. Additionally, there must be the least possible emission of pollution. The use of electric energy is the most flexible since it can be obtained from many power sources without emission to cause air pollution. However, the energy and power density of batteries are low when compared to fossil fuel [3] leading to the fact that electric car has limited driving range. Moreover, the rate of electrical power supply to traction motor is limited. Higher electrical power supply than the capacity of the batteries brings about exceeding heat and later leading to problem of safety [4]. As a result, batteries in present electric vehicle has to be unnecessarily big since it has to supply high

Received: February 19, 2019

224

electrical peak power. Therefore, simulation of optimal energy and power for electric vehicle is significant.

In general, vehicle trajectory model of each route is the unique driving characteristic which includes factors affecting movement profile such as traffic, types of vehicle, and the legal speed limit of each route. As a result, changing velocity trajectory model to simulate optimal rate must depend on traffic environment which was categorized into 2 types: open environment and closed environment [5]. Open environment is the traffic considerably affected by external factors such as heavy traffic on public road which has an effect on the velocity trajectory by other vehicles sharing the same road, traffic signs, and pedestrians. The adjustment to optimal velocity trajectory for application to authentic circumstance is difficult or impossible at all. Closed environment, on the other hand, is the studied traffic environment which is affected by only few external factors such as pathway in parks, pathway in zoos, streets in universities where driving is in closed area, and public road or highway with light traffic which can be considered a driving condition in closed environment. The adjustment of driving profile to save energy and apply to the studied can possibly be implemented in such environment.

There are several studies proposing electric vehicle driving by simulating energy saving velocity trajectory to increase driving range. For example, [6] presented an approach to plan an optimal velocity trajectory to simulate the velocity trajectory employing simple vehicle model and dynamic programming algorithm. The driving route was divided to equal segments of 10 m. each. The algorithm simulated optimal velocity of each sections to find the point of minimum power usage regarding State of Charge: SOC and driving time. Additionally, [7] the simulation saved energy by reusing kinetic energy and potential energy by storing back to batteries when brake or drive downhill and then bringing the stored power to be used as driving energy. The result of the study revealed energy saving by 5% when compared to cruise controller with constant velocity set point. Furthermore, [8,9] used probabilistic model to estimate the vehicle velocity trajectories by examining all possible sequences of modal activities (e.g., acceleration, deceleration, cruising, and idling) between consecutive data points from sparse position and vehicle velocity measurements. This model requires real-time traffic data from smartphones or cellular network to optimize powertrain operation strategy and vehicle speed trajectory [10].

In this paper, a new algorithm is proposed to simulate velocity trajectory of driving so that electric vehicles consumed optimum energy under the condition of the driving time determined by a driver. The simulated velocity trajectory was similar to original trajectory so that the newly simulated velocity was applicable to authentic use and applicable under the condition of the original traffic environment, both of open traffic environment or closed traffic environment. When the driver determined the time to reach the destination slower or spend more time to drive, the algorithm calculated optimal velocity trajectory by particles swarm optimization: PSO [11-14] for saving energy consumption and reached the destination by the appointed time. The simulation used the original velocity to be the upper bound velocity limit. This formulation was to compare consumption of energy and power when the driver determined to reach the destination by 30 seconds and 60 seconds late.

2. Mathematical model and optimization formulation

This part was to explain application of mathematic model to explain electrical vehicle movement to find power and energy consumption. After that examined acceleration with least energy consumption under the condition of the proposed vehicle trajectory. From Newton's second law of motion, the dynamic equation of vehicle movement is expressed by Eq. (1). The driving power was equal to the resistance power plus the dynamic power of acceleration of the vehicle as shown in Eq. (3) and Fig. 1 showing force acting on the vehicle.

$$F_t - F_{rr} - F_{ad} - F_{rg} = M_v \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

From the equation of power [1],

$$P_e = F_t \times V \quad (2)$$

Eq. (1) and (2) can be written in the form of Eq. (3)

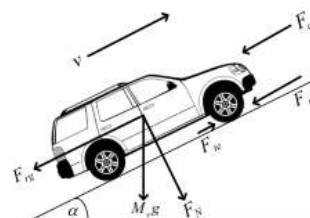


Figure.1 Free-body diagram of a vehicle on a gradient

$$P_e = \frac{v}{\eta_t} (F_{rr} + F_{ad} + F_{rg} + M_v \delta \frac{dv}{dt}) \quad (3)$$

Suppose that a vehicle's velocity is V , a vehicle of mass M_v is on a slope making an angle α to the horizontal as shown in Fig. 1, the vehicle motion is opposed by various forces, e.g. aerodynamic drag (F_{ad}), gradient force (F_{rg}), and rolling resistance force (F_{rr}) [1,15]. a is an acceleration and is called δ rotational inertia factor [3]. The power loss in transmission, motor drive losses including power losses in the electric are represented by the efficiency as shown in the table 1. The Eq. (3) can be written as Eq. (4).

$$P_e = \frac{v}{1000\eta_t} \left(M_v g f_r \cos\alpha + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 \dots + M g f_r \sin\alpha + M_v \delta \frac{dv}{dt} \right) \quad (4)$$

Electric vehicle energy consumption in kilowatt unit (kW) can be calculated by integration of the power consumption and can be expressed as Eq. (5), [3]

$$E_e = \int_{t_0}^{t_{final}} P_e dt \quad (5)$$

where E_e is the net energy consumption from batteries.

In order to optimise energy consumption using the particles swarm optimization (PSO). The objective function and constrain are shown in Eq. (6),

$$\begin{aligned} \text{Min } f(E_e) &= \text{Min}(E_0 - E_e(a_1, a_2)) \quad (6) \\ \text{Subject to: } &0 \leq a_1 \leq a_{ref_max1} \\ &a_{ref_max_br} \leq a_2 \leq a_{ref_max2} \\ &(t_1 + t_2 + \dots + t_n) \leq t_{final} \\ &t_{final} = t_{ref} + t_{late} \end{aligned}$$

where E_0 is the initial energy in an energy storage system, a_1 and a_2 are acceleration parameters that are used in the algorithm in methodology section. $a_{ref_max_br}$ is a deceleration parameter that is used in braking period, a_{ref_max1} is a maximum acceleration parameter of the reference route that is used in acceleration period and a_{ref_max2} is a maximum acceleration (or deceleration) parameter of the reference route that is used in constant velocity and coasting period. $(t_1+t_2+\dots+t_n)$ are the driving time in elementary cycles, t_{final} is the overall driving time, t_{ref} is the driving time of the reference route and t_{late} is the late time constraint as driver input. An optimization process has acceptable tolerance of less than 10^{-6} .

Table 1 Parameters used for simulation

Parameters	Symbol	Unit	Value
Vehicle Mass	M_v	kg	1500
Rolling resist. coefficient	f_r	-	0.010
Aerodynamic drag coefficient	C_D	-	0.300
Front area	A	m ²	2.200
Air density	ρ_a	kg/m ³	1.1455
Gravitational acceleration	g	m/s ²	9.810
Vehicle's velocity	V	m/s	-
Rotational inertia factor	δ	-	1.084
Efficiency	η_t	-	0.960
Net energy consumption	E_e	kWh	-
Initial energy in an energy storage	E_0	kWh	-
Vehicle acceleration	$\frac{dv}{dt}$ or a	m/s ²	-

3. Simulation verification

Mathematical model must be undergone investigation and verification to verify whether the simulation and the result of the simulation was reliable. This section was to compare the result of the simulation from the previously mentioned mathematical model. It was calculation using an iterative process and electric vehicle simulation for energy management and design: EVSED which is developed to compare the results with reliable academic document [3]. The comparison of traction energy, basic data of electric vehicle used in the simulation as shown in Table 1, and data of routes and driving cycles. The comparison was made with 4 routes which were LA92, US06 and New York City Cycle (NYCC) which were the standard route in the simulation [16]. The routes parameters were shown in Table 2 and velocity trajectory and time of driving cycle were presented in Fig. 2 to 5 respectively and the results of the simulation were compared in Table 3. The last route was the field data measurement by collecting energy consumption rate from CAN (Control Area Network) and GPS (Global Positioning System) in a provincial electricity authority electric zero emission bus (PEA-Zebus), developed by Suranaree University of Technology (SUT). The data sets were recorded every 1 second via CAN (Control Area Network) bus as shown in Fig. 6. The bus was driven for 12.54 km around SUT route. Then the result was compared to the result from the simulation using EVSED program using input data from GPS and the results of the simulation were presented in Fig. 6 and Table 4.

Received: February 19, 2019

226

Table 2. Route parameter in simulation comparison

Route parameters	LA92	US06	NYCC
Max. speed (km/h)	108.15	129.23	44.58
Ave. speed (km/h)	39.60	77.84	11.43
Traveling distance per cycle (km)	15.80	12.89	1.89
Driving time (s)	1435	596	598
Max. acceleration (m/s ²)	3.08	3.75	2.68
Max. deceleration (m/s ²)	-3.93	-3.08	-2.64

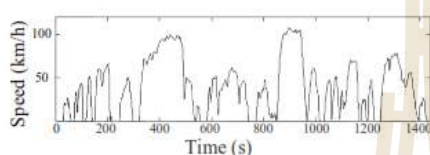


Figure 2 Velocity trajectory and time of LA92 route

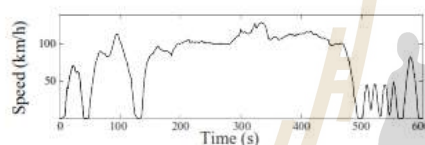


Figure 3 Velocity trajectory and time of US06 route

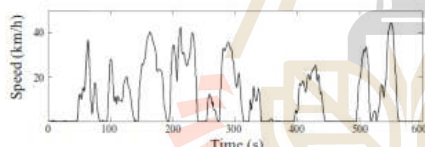


Figure 4 Velocity trajectory and time of NYCC route

LA92 route, when compared to driving in urban area such as NYCC route, had higher maximum speed and average speed, but had less stops per distance and also had higher maximum acceleration.

US06 route was the route with the highest acceleration of all the routes in the test drive route used to compare in this study. This driving in the simulation represented aggressive driving.

NYCC route used low speed and often had stop-and-go traffic which was the unique characteristic of driving in city.

Table 3. Comparison of traction energy

Driving cycles	Traction energy (kWh)		% Error
	Ref.*	EVSED	
LA92	2.3559	2.3577	0.0764
US06	2.2655	2.2490	0.7283
NYCC	0.2960	0.2941	0.6419

Remark: Ref. refers to the test result from [3]

Table 4. Measurement of energy consumption and calculation result

Driving cycle	Traction energy (kWh)		% Error
	CAN data	EVSED	
SUT Route	13.347	13.458	0.832



Figure 5 Data measuring and logging via CAN bus

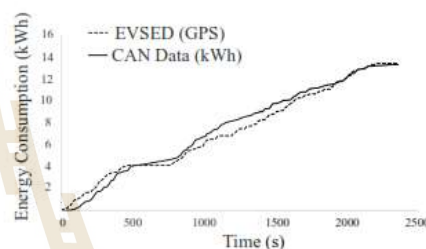


Figure 6 Data measurement of energy consumption and simulation result of SUT route

The result of the simulation in Table 3 revealed that the maximum deviation was no more than 0.728% and the minimum deviation was 0.0764%. The result of verification by the real filed measurement data in Table 4 presented deviation at only 0.832%. This can be assumed that the calculation algorithm, test of electric vehicle for energy management, and EVSED design were accurate and reliable. Therefore, EVSED program that was developed by SUT research team was appropriate to employ in this study for energy management system and investigating electrical energy consumption of the electric vehicle which was reported in this article.

4. Testing route and simulation

This article used UNECE Reg.101 [17] as the reference route in the simulation which consisted of 2 cycles: urban driving cycle and extra urban driving cycle. The researcher also divided the cycles into 13 elementary driving cycles. Each elementary cycle referred to the position from parking or the position where velocity was zero to the next position where the velocity was zero again. As shown in Fig. 7, the data of the simulating routes are as followed: total

Received: February 19, 2019

227

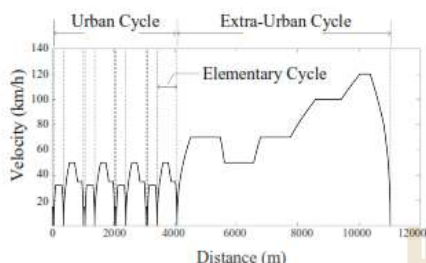


Figure 7 The UNECE Reg.101 testing route velocity profile

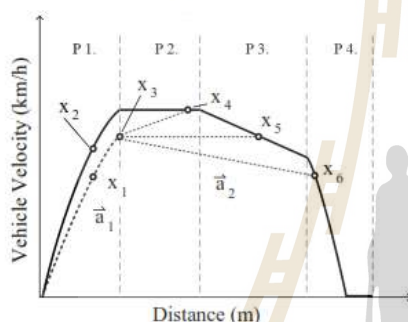


Figure 8 Vehicle velocity profile cycle

distance 11,022 m., maximum velocity 120 km/h, average velocity 33.6 km/h, and driving time 1,180 seconds (s).

In this paper, one elementary cycle velocity profile of electric vehicle can be categorized into 4 segments as shown in Fig. 8. Part 1 – P 1. (segment 1.) was the segment for accelerate velocity when it was accelerated to one point and entered part 2. Part 2 – P 2 (segment 2.) was the stage of constant velocity or zero acceleration. Part 3 – P 3 was the segment when the electric vehicle was moving by coasting or also using brake to slow down the acceleration. The last segment was Part 4 (P 4) where braking was used to lower velocity to zero or to stop. Authentic driving may consist of Part 2 and Part 3 or either one. 1 route cycle consisted of many elementary driving cycles. Shown in Fig. 7 was the test-driving route cycle UNECE Reg. 101 which consisted of 13 elementary cycles.

An algorithm is created to discover new velocity trajectory so that electric vehicle consumed optimum energy under the condition of time determined by drivers. The velocity profile had to resemble to original trajectory so that the newly created trajectory was applicable to the driving condition of the original

route, for both open and closed traffic environment. When drivers determined to arrive at the destination slower or spend more time in driving, the algorithm would calculate the optimal velocity for saving energy consumption and arrived at the destination by the time determined. The algorithm used the original velocity profile as the upper bound velocity limit. In other words, the newly created velocity profile was not faster than the original velocity profile. In Fig. 8, the velocity profile in solid line was the original velocity trajectory while the dashed line was the new velocity trajectory. In this study, the test was a comparison of power and energy consumption when the driver determined to arrive at the destination by 30 seconds and 60 seconds late. The process of creating new velocity trajectory composes of 4 steps as follows.

Steps in Creating the New Velocity Profile Algorithm

Step 1. Categorized velocity profile of original route into elementary cycles as shown in Fig. 7 and presented the process in Fig. 9

Step 2. Investigated each cycle in Part 1 and find optimal acceleration (\bar{a}_{1x}) by finding the result in PSO. The condition was that \bar{a}_{1x} was the acceleration of segment 1 of the elementary cycle number x as shown in Fig. 9 with the condition that the result of vehicle velocity calculation obtained from the simulation must not exceed the original velocity profile as in Fig. 8 at x_1 where the minimum velocity was lower than x_2 on the line of original velocity which was used as the limit of the maximum velocity. Time spent in driving was not exceed the time determined by the driver. (This test was to compare power and energy consumption when the driver determined to arrive at the destination by 30 seconds and 60 seconds late.)

Step 3. Investigated segment 2 and segment 3 together to find acceleration (\bar{a}_{2x}) when \bar{a}_{2x} was the acceleration of segment 2 of elementary cycle number x as shown in Fig. 9. Consider x_3 in Fig. 8 by the same approach as in step 2 but with wider limit. The acceleration obtained was possible to be positive (increasing velocity), zero (steady velocity), or negative (decreasing velocity). This contributed to the 3 possible velocity profiles as followed from x_3 to x_4 , from x_3 to x_5 and from x_3 to x_6 as shown in Fig. 8.

Step 4. Use \bar{a}_{1x} and \bar{a}_{2x} to create the velocity profile under the constrains. when the new velocity profile was equal to the original velocity profile at the same position (at equal distance) and was the position of the acceleration of the original velocity profile

Received: February 19, 2019

228

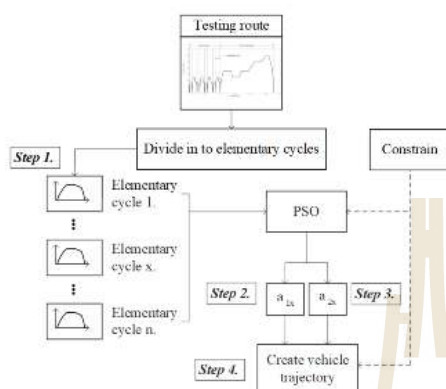


Figure. 9 Steps in creating new velocity trajectory

(used as reference velocity profile) was lower than \bar{a}_{1x} and \bar{a}_{2x} , then fixed the new velocity profile to be equal to the original velocity profile. When entering segment 4 where braking was needed, the brake profiles were the same and always stop at the same position. The mentioned condition was as in Eq. (4). Then repeated step 2 to step 4 for all elementary driving cycles all along the route.

5. Testing results

The test results consist of 2 topics, the comparison of the proposed algorithm to cruise control algorithm and the optimal velocity trajectory of route UNECE Reg. 101 to compare the energy and peak power consumption. movement simulation to compare the proposed algorithm of the researcher to cruise control algorithm which is available in general automobiles. The reference velocity profile (bold black line as in figure 10) has maximum speed at 90 km/h, distance of 4690.7 m, and driving time of 214 seconds. The simulation creates the velocity profile that arrives late at no more than 30 seconds. The results of energy and maximum power consumption when driving are then compared. The result of the simulation can be seen in table 5. From table 5, it is found that energy consumptions of the proposed algorithm and cruise control algorithm decrease when compared to

reference velocity profile by 18.345% and 12.589%, respectively. The maximum power of the proposed algorithm decreases by 21.872% and 12.784% for the cruise control algorithm. When compared to the reference velocity, the algorithm that the researcher proposed consumes less driving energy and is able to decrease more maximum electrical power. It can be concluded that the proposed algorithm is more advanced in energy and power consumption than cruise control algorithm in general automobile.

The testing results of the velocity trajectory of route UNECE Reg. 101 as the reference route which was the route consisting of the characteristics of urban driving cycle and extra-urban driving cycle as shown in Fig.7 and used as the upper bound velocity limit were divided in to 2 cases. Case 1 determined the car to arrive 30 second late and case 2 determined the car to arrive 60 seconds late from the time of the reference route. Then compared the result of the simulations and reference velocity trajectory as shown in Fig. 11 and 12.

In Fig. 11 in the stage of acceleration (segment 1.), it was found that the adjusted optimal velocity trajectory in the case of arriving at the destination 30 and 60 seconds late presented changes of subsequent decreasing velocity and acceleration when compared to the velocity trajectory of the reference route. The acceleration can be observed in Table 6. In part 2 (segment 2.), when investigating the urban route, the elementary cycle 1 and elementary cycle 2 presented increasing deceleration when arriving at the destination spending longer time. In the elementary cycle 3 and extra urban driving or the last elementary cycle presented similar trends that was deceleration (\bar{a}_2) of velocity trajectory with 30s late profile presented the highest value, in other words, the most deceleration. Additionally, the velocity trajectory case 1 (30s late) presented the same value as the reference velocity trajectory. In the velocity trajectory case 2, other parts presented the lower velocity than the reference velocity trajectory but they presented imitation of velocity trajectory. Fig. 12 showed changes of velocity trajectory and time of each case.

Table 5. Results of comparison of algorithms for optimal velocity profile

Speed profile	Energy consumption (kWh)	Peak power (kW)	Average speed (km/h)	Max. speed (km/h)
Reference velocity profile	0.837	87.522	78.542	90.000
Proposed algorithm	0.681	68.379	68.196	82.563
Cruise control algorithm	0.729	76.333	70.830	80.006

Received: February 19, 2019

229

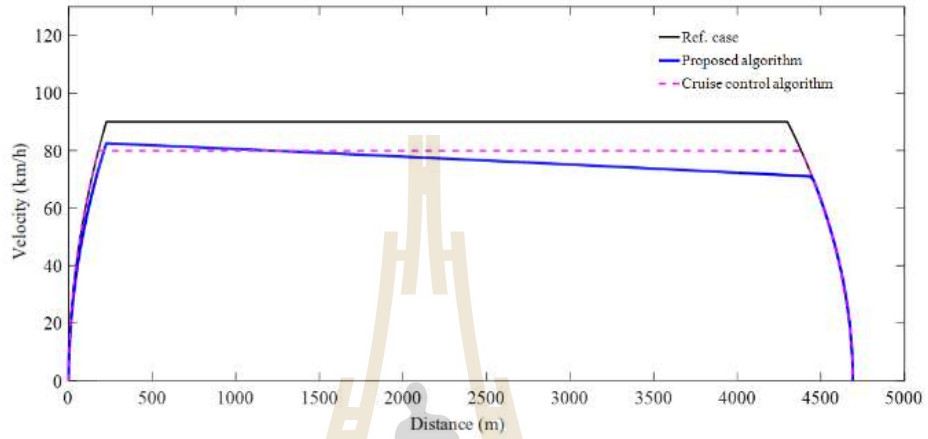


Figure. 10 Comparison of velocity profile from the proposed algorithm and cruise control algorithm

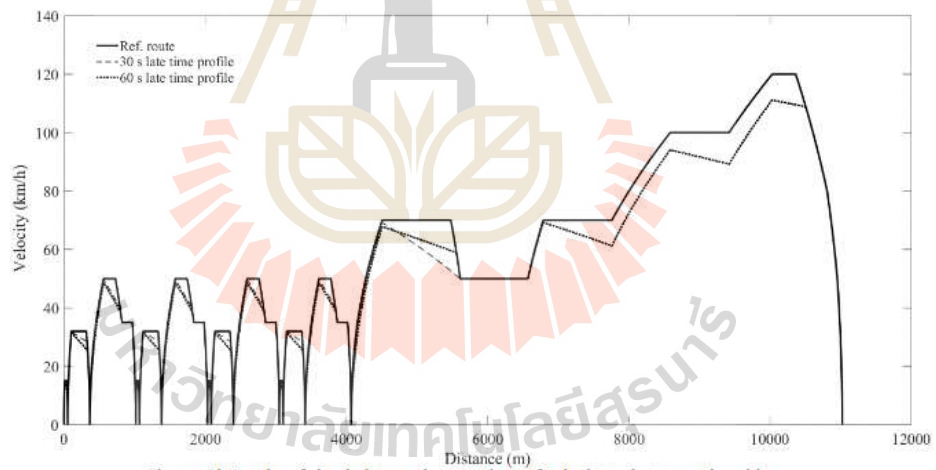


Figure. 11 Results of simulations and comparison of velocity trajectory and position

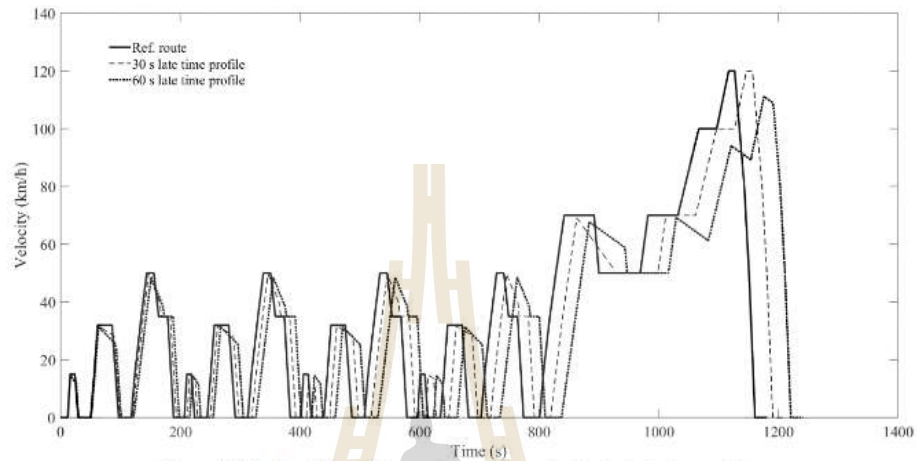


Figure. 12 Results of simulations and comparison of velocity trajectory and time

Table 6 Accelerating parameters comparison

Route information		ref. route	30s late	60s late	
Urban route	The first elementary cycle	a_1	1.042	0.991	0.986
		a_2	0.000	-0.033	-0.080
	The second elementary cycle	a_1	0.787	0.770	0.752
		a_2	0.000	-0.035	-0.058
	The third elementary cycle	a_1	0.694	0.593	0.470
		a_2	0.000	-0.145	-0.140
Extra-urban route	The forth elementary cycle	a_1	0.694	0.480	0.408
		a_2	0.000	-0.080	-0.041

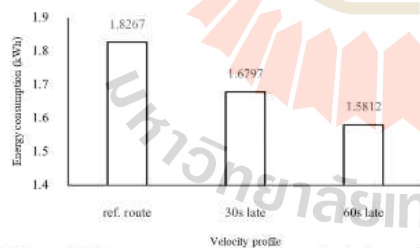


Figure. 13 Energy consumed in driving of velocity profile

In Fig. 13, it was found that consumption of power in driving of electric vehicle in the new velocity profile presented lower value than velocity profile of the reference route in both case 1 and case 2. In case 1 which fixed that the electric vehicle arrived at the destination 30 second late consumed energy of 46.0394 kWh or decreasing by 8.0473% of energy used in reference route. In case 2 which the researcher fixed that the electric vehicle arrived at the destination 60 second late consumed energy of

39.968 kWh or decreasing by 13.44%. Not only that the energy consumption was decreased, but the maximum power was decreased with significance. Fig. 14 showed the comparison of maximum electric power of each velocity trajectory. Case 1 consumed maximum electrical power in driving at 46.0394 kW or decreasing by 1.195% and case 2 consumed peak electrical power at 39.968 kW or decreasing by 14.225%

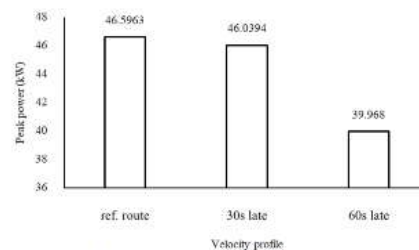


Figure. 14 Peak power consumed in driving of velocity profile

Received: February 19, 2019

231

6. Conclusion

The strength of this study is the improvement of optimal velocity profile under the condition of late arrival at the destination. The optimal velocity profile for the late arrival is crucial. The proposed procedure in the article presented the improvement from optimal velocity profile that brings about the results that the automobile arrives at the appointed time and consumes less energy and maximum driving power than cruise control algorithm, a control algorithm that automobiles generally have nowadays. The proposed algorithm was flexible and drivers can input the required late time to arrive at the destination. Moreover, the algorithm can reduce energy consumption with significance. It was an alternative efficient choice to use the algorithm to reduce energy consumption. The results revealed that the algorithm can reduce electrical peak power and was attributable to prolonging of batteries expiration. In terms of energy storage system, the algorithm supported reduction batteries size since the limitation of lower electrical power density had an effect on the design to be oversized and overweighed to support highest electrical power supply. Additionally, the velocity trajectory resulted from the proposed algorithm resembled the original velocity trajectory or the reference velocity trajectory and allowed drivers to be able to drive in the optimal velocity trajectory so that it is applicable to traffic conditions or environments similar to the reference velocity profile.

References

- [1] M. Chris, M.A. Masrur, and D.W. Gao, "Hybrid Vehicles Principles and Applications with Practical Perspectives", John Wiley & Sons Inc. Publication, Singapore, 2011.
- [2] U.S. Environmental Protection Agency, *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2014*, Final Report. EPA 430-R-16-002, 2016.
- [3] M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, "Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design", Power Electronics and Applications Series (2nd), CRC press, 2010.
- [4] A. Davide, "Battery management systems for large lithium-ion battery packs", Artech house Norwood, MA, 2010.
- [5] Y.J. Jang, E.S. Suh, and J.W. Kim, "System Architecture and Mathematical Models of Electric Transit Bus System Utilizing Wireless Power Transfer Technology", *IEEE Systems Journal*, Vol. 10, No. 2, pp. 495-506, 2016.
- [6] S. Rohkämper, M. Hellwig, and W. Ritschel, "Energy optimization for electric vehicles using dynamic programming", In: *Proc. of International Conference on Research and Education in Mechatronics*, pp. 1-5, 2017.
- [7] Tv. Keulen, Bd. Jager, D. Foster, and M. Steinbuch, "Velocity trajectory optimization in Hybrid Electric trucks", In: *Proc. of American Control Conference*, pp. 5074-5079, 2010.
- [8] P. Hao, K. Boriboonsomsin, G. Wu, and M.J. Barth, "Modal Activity-Based Stochastic Model for Estimating Vehicle Trajectories from Sparse Mobile Sensor Data", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.18, No. 3, pp. 701-711, 2017.
- [9] X. Shan, P. Hao, X. Chen, K. Boriboonsomsin, G. Wu, and M.J. Barth, "Probabilistic model for vehicle trajectories reconstruction using sparse mobile sensor data on freeways", In: *Proc. of IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 689-694, 2016.
- [10] X. Qi, G. Wu, P. Hao, K. Boriboonsomsin, and M.J. Barth, "Integrated-Connected Eco-Driving System for PHEVs With Co-Optimization of Vehicle Dynamics and Powertrain Operations", *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Vol. 2, No. 1, pp. 2-13, 2017.
- [11] I.C. Trelea, "The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection", *Information Processing Letters*, Vol. 85, No. 6, pp. 317-325, 2003.
- [12] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization", In: *Proc. of the 4th IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942-1948, 1995.
- [13] R. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory", In: *Proc. of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science*, pp. 39-43, 1995.
- [14] Y.L. Zheng, L.H. Ma, L.Y. Zhang, and J.X. Qian, "On the convergence analysis and parameter selection in particle swarm optimization", In: *Proc. of International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, pp. 1802-1807, 2003.
- [15] W. Saikong, and T. Kulworawanichpong, "Comparative Study of Energy Consumption for Electric Vehicles with Various On-board Energy Storage Systems", *Energy Procedia*, Vol. 138, pp. 81–86, 2017.
- [16] United States Environmental Protection Agency, "Dynamometer Drive Schedules", [online], 2018, Available: <https://www.epa.gov/vehicle-and->

Received: February 19, 2019

232

fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules#vehicleDDS

- [17] The United Nations Economic Commission for Europe, "UN Vehicle Regulations – 1958. UN Regulation No. 101 - Rev.3", [online], 2018, Available: <https://www.unece.org/?id=39146>





Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Energy Procedia 138 (2017) 81–86

Energy

Procedia

www.elsevier.com/locate/procedia

2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies
2017 AEDCEE, 25 - 26 May 2017, Bangkok, Thailand

Comparative Study of Energy Consumption for Electric Vehicles with Various On-board Energy Storage Systems

Waiard Saikong, Thanatchai Kulworawanichpong*

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

Abstract

Electric vehicles are driven by traction motor with intermittent load characteristic. The use of appropriate batteries type is a crucial factor resulting in energy consumption, battery sizing and vehicle design. This paper focuses on the comparison of energy consumption of the electric vehicles in three different energy storage systems consisting of lead-acid battery, lithium-ion battery and hybrid energy storage system (HESS) incorporating with lithium-ion battery and ultracapacitor. The mathematical approach is used to simulate three route vehicle movement which are i) New York city cycle (NYCC), ii) UNECE reg. 83 or extra-urban driving cycle and iii) field measured driving profile in Bangkok. Sequential quadratic programming (SQP) is employed to find optimal weights of the energy storage system. The simulation results were consistent for all three routes. The lead-acid battery is heaviest weight but highest energy recovery from the regenerative braking and the energy consumption is greatly different from the others.

© 2017 The Authors. Published by Elsevier Ltd.
Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies.

Keywords: Electric vehicles simulation; Hybrid energy storage; Regenerative braking

* Corresponding author. Tel.: +66-44224400; Fax: +66-44224601.
E-mail address: thanatchai@gmail.com

1876-6102 © 2017 The Authors. Published by Elsevier Ltd.
Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies.
10.1016/j.egypro.2017.10.060

1. Introduction

Nowadays, the energy storage system plays important role in electric vehicles. The batteries are still the main energy source for electric vehicles. Due to its high specific energy compares to other energy storage devices as illustrate in [1–6]. A number of life cycles and specific energy are more technologically advanced. However, there seem an inadequate power density to supply the intermittent traction loads with suddenly high power requirements. The batteries are not appropriate to be charged or discharged as suddenly as ultracapacitors. It also has a shorter lifespan than ultracapacitors, especially when it uses with high current. Overcharging and overdischarging may cause of over temperature and safety issue. To supply the fluctuated load, the batteries of electric vehicles seem to be oversizing design.

The main study presented in this paper aims to compare the study of energy consumption for electric vehicles with three different on-board energy storage systems. The NYCC is the driving information in New York city cycles route, USA, where vehicles run at low speeds and also stop and accelerate frequently. NYCC is used as a test route 1 in this research. Test route 2 and 3, in which UN/ECE reg. 83 is applied to represent in extra-urban driving cycle route and a bus transports of the Provincial Electricity Authority (PEA) employees to work, are PEA headquarters-Samakkee road route, respectively. Besides, the speed profile of the test routes and altitudes obtained from the global positioning system (GPS) is used to estimate a gradient. Three different types of energy storage system, including lead acid, lithium-ion and hybrid energy storage system incorporating with lithium-ion battery and ultracapacitors are compared. Energy storage weight optimization is applied under regenerative braking condition. Finally, the lead-acid battery, lithium-ion battery, and lithium-ion battery-ultracapacitors hybrid storage system (HESS) have been used in the simulation for each route and their important parameters were compared.

This paper organizes a total of five sections. Next section, Section two, illustrates the brief of traction performance and vehicle movement simulation. Section three gives the optimal energy storage weight calculation. Section four is the section describing simulation results and discussion. Conclusion remark is in the last section.

2. Traction performance calculation

In this section mathematic modeling is applied to describe characteristics of vehicle movement and to find the power consumption of electric vehicle. The vehicle mechanical power consumption by tractive force multiplying with velocity is described in (1).

$$P_v = F_t v \quad (1)$$

Where P_v is vehicle's mechanical power consumption
 v is vehicle's velocity
 F_t is vehicle's tractive effort



Fig. 1. Free-body diagram of a vehicle on a gradient.

Suppose that a vehicle of mass M , is on a slope making an angle α to the horizontal as shown in Fig. 1, the vehicle motion is opposed by various forces, e.g. aerodynamic drag (F_{ad}), gradient force (F_{rg}), and rolling resistance force (F_{rr}) [3,7]. By applying Newton's second law, the dynamic equation of vehicle movement is expressed in (2), where a is an acceleration and F_{acc} is an acceleration force [3].

$$F_{acc} = M \cdot a = M \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

The total tractive effort of the vehicle is expressed by (3)

$$F_t = F_{rr} + F_{ad} + F_{rg} + F_{acc} \quad (3)$$

From (1) and (3) yield (4)

$$P_e = \frac{v}{\eta_t} (F_{rr} + F_{ad} + F_{rg} + F_{acc}) \quad (4)$$

Where P_e is the electric power consumption and η_t is a total efficiency [8, 9]

3. Optimal energy storage weight calculation

Lead-acid battery (Pb) is favourite battery in the vehicle market. It is a widely used energy storage device in the automotive industry and in other applications. The advantage of this battery is cheap and high power capacity. However the lead-acid battery have some disadvantages, such as heavy weight due to specific power and specific energy are too low. Lithium-ion battery (Li-I) is high both specific power and specific energy compared with Lead-acid battery. Ultracapacitor is the highest specific power and fast respond charging and discharging but lack of specific energy. Consequently, it may be a good choice to incorporate lithium-ion battery and ultracapacitor together or hybrid energy storage system (HESS)

In order to optimise the weight of an energy storage system using the sequential quadratic programming (SQP) [11]. The objective function is shown in (5).

$$\min_w f(w) = (E_0(W) + nE_{ch} + E_{regen} - E_D) \quad (5)$$

Where $W = W_c + W_b$ and E_0 is the initial energy in an energy storage system, E_D is the required tractive energy of an electric vehicle, E_{regen} is the regenerative braking energy, E_{ch} is the electrical energy obtained from wireless charging, W_c and W_b are the weight of a ultracapacitor and a battery, respectively [3,7,10]

To prepare the data for an optimisation process under a regenerative braking energy condition. The limit of the weight of an energy storage system is considered as a mass factor (MF) of less than 3.26 and acceptable tolerance of less than 10^{-4} . The MF can be calculated by equation (6).

$$MF = (M_{tare} + M_{load} + M_{HESS}) / M_{tare} \quad (6)$$

Where M_{tare} is the tare mass of an electric vehicle, M_{load} is the payload of an electric vehicle, and M_{HESS} is the mass of an energy storage system.

4. Simulation results

The NYCC route, where vehicles run at low speeds and also stop and accelerate frequently. NYCC or a test route 1 in this research. Test route 2, in which UN/ECE reg. 83 is applied to represent in extra-urban driving cycle route and a bus transports of PEA employees to work, are PEA headquarters-Samakkee road route is test route 3. Three different types of energy storage system, including lead acid, lithium ion and hybrid energy storage system incorporating with lithium-ion battery and ultracapacitor are compared. Energy storage weight optimisation is applied under regenerative braking condition. In order to comparative study of energy consumption for electric vehicle in three different energy storage systems and three different route as shown in Fig. 2. to 4. The simulation processes are proposed which consisted of vehicle movement calculation and the optimal energy storage weight. The simulation results are shown in Table 1. to 3.

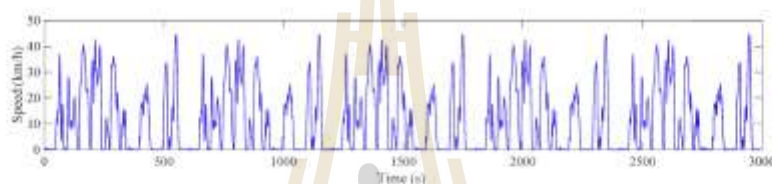


Fig. 2. Repeated five time speed profile of NYCC route.

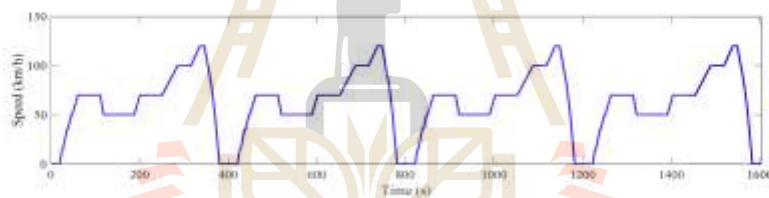


Fig. 3. Repeated four time speed profile of UN/ECE reg. 83 extra-urban driving cycle route.

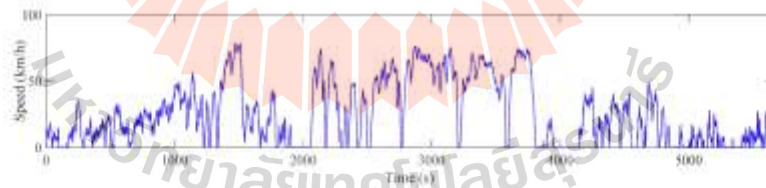


Fig. 4. Speed profile of field measured driving profile in Bangkok route.

4.1 Simulation results of NYCC

The relationship between vehicle velocity and time are illustrated in figure 2. The simulation base on the repeated five-time of NYCC route which the maximum speed is 44.58 km/h, driving time is 49.54 minute and 9.49 km is a distance of the simulated route. Comparative studies of different types of energy storage parameter under the regenerative braking condition are expressed as Table 1.

Table 1. Simulation result of NYCC.

Parameter	Pb	Li-I	HESS
Energy storage system weight	787.13 kg	44.38 kg	23.29 kg
Peak power load	59.04 kW	44.72 kW	41.39 kW
Energy consumption	2.55 kWh	1.82 kWh	1.79 kWh
Regenerative braking energy	0.94 kWh	0.671 kWh	0.66 kWh
%SOC	93.19 %	72.72 %	1.53 %

Table 1, compares the crucial parameter of an electric vehicle in different energy storage system. The highest weight of energy storage, peak power load and energy consumption are the lead acid battery while lithium ion and HESS follow a similar pattern. Although the lead acid battery is the highest regenerative braking, the remained capacity or state of charge percentage (%SOC) of lead acid and lithium battery seem to be oversize.

4.2 Simulation results of UNECE reg. 83 extra-urban driving cycle

The relationship between vehicle velocity and time are shown in Fig. 3. The simulation bases on the repeated four-time the UNECE reg. 83 route which the maximum speed is 120 km/h, driving time is 26.43 minute and 27.82 km is a distance of the route. Comparative studies of different types of energy storage parameter under the regenerative braking condition are shown in Table 2.

Table 2. Simulation result of UNECE reg. 83 extra-urban driving cycle.

Parameter	Pb	Li-I	HESS
Energy storage system weight	819.79 kg	50.99 kg	51.04 kg
Peak power load	61.48 kW	48.60 kW	48.60 kW
Energy consumption	6.99 kWh	5.42 kWh	5.42 kWh
Regenerative braking energy	0.62 kWh	0.41 kWh	0.41 kWh
%SOC	74.10 %	1.70 %	1.70 %

Table 2, it is the comparison of the crucial parameter of an electric vehicle in different energy storage systems. All parameters of lithium-ion and HESS follow a similar trend. Although the lead acid battery is the highest return energy from regenerative braking, the remained capacity of lead acid battery seems too oversize.

4.3 Simulation results of field measured driving profile in Bangkok

The relationship between vehicle velocity and time are expressed in Fig. 4. The simulation bases on a real field measurement of speed and gradient profile from GPS tool. The maximum speed of a vehicle on the route is 78.44 km/h, used driving time 94.20 minute and 41.50 km is a distance of the simulation route. Comparative studies of different types of energy storage parameter under the regenerative braking condition are illustrated in table 3.

Table 3. Simulation result of field measured driving profile in Bangkok.

Parameter	Pb	Li-I	HESS
Energy storage system weight	2819.07 kg	85.51 kg	70.99 kg
Peak power load	197.47 kW	79.88 kW	79.25 kW
Energy consumption	15.84 kWh	6.41 kWh	6.36 kWh
Regenerative braking energy	5.51 kWh	2.22 kWh	2.20 kWh
%SOC	87.79 %	50.93 %	32.80 %

In both cases, the simulation result of field measurement driving profile in Bangkok as shown in table 3 and simulation result of NYCC as expressed in Table 1, following as similar pattern.

5. Conclusions

In conclusion, the simulation results are shown in table 1 to 3. The heaviest lead acid battery has an effect on the peak power and energy consumption, therefore the electric vehicle with lead acid power source needs more power and energy to supply the load than other types, but it has a highest regenerative braking energy. Lowest specific energy and power cause battery oversizing of the lead acid type to use with an intermittent load. For city traffic under frequently stop and drive condition, HESS is an appropriate solution however, both lithium ion battery and HESS are not a significant difference on the extra-urban driving cycle route.

Acknowledgements

We would like to express our sincere gratitude to the Provincial Electricity Authority of Thailand (PEA), through the research grant given to Waiard Saikong and Thanatchai Kulworawanichpong.

References

- [1] Davide Andrea, Battery management systems for large lithium-ion battery packs, Artech house Norwood, MA; 2010.
- [2] Azad Ahmed, Tarak Saha, Regan Zane and Zeljko Pantic, Design of hybrid energy storage systems for wirelessly charged electric vehicles IEEE 82nd Vehicular technology conference (VTC Fall); Boston, MA, 6-9 Sept. 2015, pp. 1 - 5.
- [3] Ehsani Mehrdad, Yimin Cao and Ali Emadi, Modern electric hybrid electric and fuel cell vehicles fundamentals theory and design second Edition, CRC Press Taylor & Francis Group; 2010, The United States of America.
- [4] Huang Xiaoliang, Joao Marcos Abreu Cinti and Hori Yoichi, Energy management strategy with optimized power interface for the battery supercapacitor hybrid system of Electric Vehicles, Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE; Vienna, 10-13 Nov. 2013, pp. 4635 - 4640.
- [5] Karangia Rahul, Mehulsinh Jodeja, Chetan Kumar Upadhyay and Hima Chandwani, Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System used in Electric Vehicle, International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS); pp. 688 - 691, 10-12 April 2013.
- [6] Masnur, M.A. Penalty for fuel economy - system level perspectives on the reliability of hybrid electric vehicle during normal and graceful degradation operation, IEEE Systems Journal, 2 (4), 476-483, 2008.
- [7] Mi Chris, M. Abul Masnur and David Wenzhong Gao, Hybrid Vehicles Principles and Applications with Practical Perspectives, John Wiley & Sons, Ltd. 2011, Singapore.
- [8] Ming Tingyou, Weiwen Deng, Jian Wu and Qiao Zhang, A hierarchical energy management strategy for battery-supercapacitor hybrid energy storage system of electric vehicle, IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Beijing, Aug. 31 2014-Sept. 5 2014, pp. 1 - 5.
- [9] Sadoun, R, N. Rizoug, P. Bartholomets and B. Barbedette, Influence of the drive cycles on the sizing of hybrid storage system battery-supercapacitor supplying an electric vehicle, IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society; Melbourne, VIC, 7-10 Nov. 2011, pp:4106 - 4112.
- [10] Sarang R. Soni, Chetan K. Upadhyay and Hima Chandwani, Analysis of battery-super capacitor based storage for electrical vehicle, International Conference on Energy-Economics and Environment (ICEEE); Noida, 27-28 March 2015, pp. 1 - 7.
- [11] Won young Yang, Wenwu Cao, Tae-Sung Chung and John Morris, Applied numerical methods using MATLAB, John Wiley & Sons, Inc., Publication, Hoboken; New Jersey; 2005.

ประวัติผู้เขียน

นายวัยอาจ สายคง เกิดเมื่อวันที่ 13 ตุลาคม พ.ศ. 2523 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) และระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น จากนั้นได้เข้าทำงานในตำแหน่งอาจารย์ ที่สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา เป็นเวลา 1 ปี (พ.ศ. 2555-2556) และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ด้วยทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก กองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุน OROG) สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

